innovations agronomiques

n°107 / Novembre 2025

Développement Agricole
Rural
Innovation
Partenariat
Recherche Technologique

Ce numéro traite de résultats de projets lauréats en 2019 de l'appel à projet CASDAR (Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural), «Innovation et Partenariat» et «Recherche Technologique. Ces projets sont financés par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire.

31 projets qui traitent de systèmes agricoles plus durables, de bien-être animal : repenser les pratiques pour des élevages plus respectueux, de sécurité sanitaire : nouvelles méthodes pour maîtriser les risques, de méthodes d'évaluation pour des sélections animales et végétales efficientes, d'améliorer les qualités organoleptiques des produits et de nouveaux modes de travail en agriculture.



/// Crédits photos : Bertand NICOLAS / INRAE • Jean-Michel HILLAIREAU / INRAE • Baptiste HAMOUSIN / INRAE • Tymur KHAKIMOV / Pexel • Schwoaze / PIXABAY

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

Innovations Agronomiques
Agriculture / Alimentation / Environnement

Innovations Agronomiques

Volume 107 - Novembre 2025

CASDAR 2019

Ce numéro traite de résultats de projets lauréats en 2019 de l'appel à projet CASDAR (Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural), « Innovation et Partenariat » et « Recherche Technologique ». Ces projets sont financés par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire.

Directeur de la publication : Philippe Mauguin, Président directeur Général INRAE

Rédaction en chef : Christian Huyghe, Chargé de mission à la Direction Scientifique Agriculture INRAE, et Isabelle Litrico, Directrice Scientifique Agriculture INRAE

Coordination éditoriale : Aurélie Gauguery, Responsable des Carrefours de l'Innovation INRAE

Comité scientifique : Claire Rogel-Gaillard, Sophie Thoyer et Christian Lannou, Directrices et directeur scientifiques Agriculture adjoints ; Sophie Nicklaus, Directrice scientifique Alimentation et bioéconomie adjointe ; Alban Thomas et Pierre Renault, Directeurs scientifiques Environnement adjoints, INRAE ; Nathalie Munier-Jolain, Directrice générale déléguée à la science et à l'innovation adjointe, INRAE ; Isabelle Pion, Chargée de mission agroécologie et transition des systèmes agricoles, Direction de l'Appui aux Politiques Publiques, INRAE ; Marianne Sellam, Directrice scientifique et technique, ACTA, Luc Mounier, Enseignant-chercheur, VetAgro Sup ; Nicolas Brault, Directeur adjoint de l'unité de recherche Interact, Institut Polytechnique UniLaSalle ; Alessia Lefébure, Directrice, Sciences Po Aix.

Coordination scientifique du numéro : Christian Huyghe et Véronique Saint-Gès

Initiée en 2007, la revue de transfert *Innovations agronomiques* a pour ambition de diffuser les savoirs et de favoriser les échanges entre les acteurs de la recherche et les professionnels de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, et de faciliter leur appropriation par les acteurs de la chaîne de valeur agri-alimentaire (professionnels du secteur, chercheurs, conseillers, R&D, agriculteurs, enseignants et apprenants, décideurs publics, société civile, etc.). Elle complète la démarche générale de transfert des Carrefours de l'Innovation INRAE (https://ciag.hub.inrae.fr/) qui réunissent ces acteurs impliqués dans les travaux au cœur des défis mondiaux et sociétaux de notre siècle : production et performance économique, santé, changement climatique, raréfaction des ressources non renouvelables, préservation de la biodiversité, des ressources naturelles et de l'environnement, qualité de vie et des emplois…

La revue est une propriété d'INRAE, intégralement financée sur des fonds publics.

Revue en accès libre diamant, publiée par INRAE. Les articles sont relus et validés par des experts scientifiques et opérationnels.

Site de la revue : https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques

Contact : innovations-agronomiques@inrae.fr

Adresse : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – 147 rue de l'Université – 75338 Paris Cedex 07

ISSN : 1958-5853 (édition électronique)

ISBN (PDF) : 978-2-7380-1487-0

ISBN (ePub) : 978-2-7380-1488-7

DOI : https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol107

Pour citer ce numéro : Collectif. Innovations Agronomiques. CASDAR 2019, 2025, 107. https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol107

Photo de couverture : Bertand NICOLAS / INRAE ; Jean-Michel HILLAIREAU / INRAE ; Baptiste HAMOUSIN / INRAE ; Tymur KHAKIMOV / Pexel ; Schwoaze / PIXABAY

Licence : CC BY 4.0

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

Sommaire

Vers des systèmes agricoles plus durables

Sylvain BETOLAUD, Frédéric COULON, Lucas LESAINT, Catherine MORET, Laurent NEVOUX, Baptiste SANSON et Valérie VIAUD, 2025 - RESP'HAIES - **Méthodologies innovantes d'évaluation de la biomasse et des stocks de carbone des haies françaises.**
Innovations Agronomiques 107, 1-12
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art01

Christophe DAVID, Benoit MELEARD, Sonia GEOFFROY et Laurent CHIPPAUX, 2025 - **CERPET : Des valeurs nutritionnelles et technologiques d'intérêt pour une valorisation du Kernza (Thinopyrum intermedium) en alimentation humaine.**
Innovations Agronomiques 107, 13-28
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art02

Jean-Charles DESWARTE, Alexandra DUTAY, Antoine MAINEMARE et Fanny RINGUET et , 2025 - **Evaluation de la croissance et du développement de l'agropyre intermédiaire en conditions françaises – une production en retrait par rapport aux espèces de référence.**
Innovations Agronomiques 107, 29-40
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art03

David LAFOND, Pascale GUILLERMIN, Raphaël METRAL, Pascal NEVEU, Sylvaine SIMON et François WARLOP, 2025 - **AgroÉcoPérennes : Vers des systèmes de culture pérennes agroécologiques.**
Innovations Agronomiques 107, 41-54
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art04

Pierre MISCHLER, Jean Louis ROUJEAN, Alizée CHOUTEAU et Eric CESCHIA, 2025 - **Albédo-Prairies : exploiter l'effet refroidissant de l'albédo des prairies comme levier d'atténuation du**

changement climatique, un atout majeur pour la durabilité de l'élevage de ruminants. Innovations Agronomiques 107, 55-67 https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art05

Sophie SADET-BOURGETEAU, Daniela MORA-SALGUERO, Camille CHAUVIN, Pierre BARRE, Daniel CLUZEAU, Pascal PIVETEAU, Cécile VILLENAVE, Anne HERMANT, Aurélie SCHERER, Virginie RIOU, Mariana MOREIRA, Kevin HOEFFNER, Adeline HAUMONT, Gregory VRIGNAUD0, Vincent JEAN-BAPTISTE, Thierry MORVAN, Manon GILLES, Arthur BAILLY, Margaret JOHNSON, Véronique STANGRET, Aurélie LEVET, Aurélie REIBEL, Samuel DEQUIEDT, Pierre-Alain MARON, Julie TRIPIED, Lionel RANJARD, Pierre MULLIEZ et Mario CANNAVACCIUOLO, 2025 - **Metha-BioSol : Impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles.** Innovations Agronomiques 107, 68-82 https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art06

Bien-être animal : repenser les pratiques pour des élevages plus respectueux

Didier BASTIEN, Philippe BRIAND, Virginie LEFOUL, Manuel TOURTIER et Mathilde VAILLANT avec la collaboration de : Magdéléna CHANTEPERDRIX, Léa DROSNE, Etienne LABUSSIERE, Yannick LE-COLZER, Lucile MONTAGNE, Marie-Anne LEFEBVRE, Christophe MARTINEAU , Jocelyn PRIGENT, Lola REVERCHON-BILLOT et Jean-Baptiste VANHAM, 2025 - **RenouVeau – Réinventer les modèles de production de veaux de boucherie alliant enjeux sociétaux, qualité des produits et viabilité économique.** Innovations Agronomiques 107, 83-94 https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art07

Sarah LOMBARD, Armelle PRUNIER, Rodolphe VIDAL, Florent MASSOULIER, Bénédicte LEBRET, Chloé VAN BAELEN, Alexandre POISSSONNET, Florence MAUPERTUIS, Alexandre TORTEREAU, Samuel FROIS et Antoine ROINSARD, 2025 - **Farinelli : Elevage de porcs mâles non castrés et valorisation des carcasses en agriculture biologique.** Innovations Agronomiques 107, 95-112 https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art08

Agathe CHEYPE, Béatrice MOUNAIX, Jérôme MANCEAU, Vincent GAUTHIER, Quentin DELAHAYE, Claire DUGUE, Laure-Anne MERLE et Xavier BOIVIN, 2025 - **BeBoP : Evaluer le bien-être des taurillons : des indicateurs revus pour gagner en faisabilité sans perdre en fiabilité.** Innovations Agronomiques 107, 113-122 https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art09

Laurine MESSAGER, Aude KLEIBER, Violaine COLSON, Ségolène CALVEZ, Vanessa GUESDON, Mohamed MOUSTAPHA et Aurélien TOCQUEVILLE, 2025 - **AQUA BIEN-ÊTRE : Amélioration du bien-être des truites d'élevage : besoins, indicateurs spécifiques et effets des enrichissements.** Innovations Agronomiques 107, 123-137 https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art10

Protection des cultures : innovation et stratégies pour des récoltes saines et productives

Benjamin GARD, Amélie BARDEL, Laurent CAMOIN, Nicolas DESNEUX, Hervé FLOURY, Valérie Fontaine, Jérôme LAMBION, Anthony GINEZ, Caroline Baconnier, Olivier ROUDIL, Roselyne SOURIAU et Solène TREHIOU, 2025 - **ACOR : Améliorer l'installation des punaises prédatrices dans la culture grâce aux plantes relais – exemple en tomate hors sol.** Innovations Agronomiques 107, 138-149 https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art11

Ange LHOSTE-DROUINEAU, Marie-Anne JOUSSEMET, Marine LITZLER, Benjamin GARD, Jérôme LAMBION et Nicolas DESNEUX, 2025 - **Conserver les auxiliaires de culture avec le gîte et le**

couvert.
Innovations Agronomiques 107, 150-162
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art12

Sébastien PICAULT, Anne-Marie CORTESERO, Hélène GAUTIER, Laurent GOMEZ, Juliette PELLAT et Christele ASSEGOND, 2025 - **Repulse : Mise au point et évaluation de stratégies de protection des cultures légumières contre les ravageurs basées sur l'utilisation de plantes répulsives.**
Innovations Agronomiques 107, 163-176
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art13

Anne MOUSSART, Coralie BRIER, Sophie PERROT, Isabelle SERANDAT, Claude-Emmanuel KOUTOUAN, Quentin LAMBERT et Agathe PENANT, 2025 - **Ascolup : Ascochytose du pois chiche, de nouveaux outils pour la gestion du risque.**
Innovations Agronomiques 107, 177-188
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art14

Cécile LE GALL, Françoise LE CAHEREC, Mohammed BENBRAHIM, Laurent KREMMER, Marie Françoise NIOGRET, Cécile BARON, Vanessa CLOUET, Philippe ETIENNE, Jean-Christophe AVICE et Jacques TROUVERIE, 2025 - **Biostim Colza : Mettre au point une méthode d'évaluation de la réponse du colza aux biostimulants en conditions de stress, du labo au champ.**
Innovations Agronomiques 107, 189-214
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art15

François JOUDELAT, François BRUN, David ROUSSEAU et Fabienne MAUPAS, 2025 - **CERCOCAP - pilotage de la CERcosporiose de la betterave par COuplage entre modèle agroclimatique et CApteurs connectés.**
Innovations Agronomiques 107, 215-226
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art16

Bruno PARIS, Léo KERAUDREN, Roxane CALVAIRE, Emilie MAUGIN, Jacques FILLATRE, Isabelle CABEU, Sophie DESCAMPS, Laurent CAMBOURNAC, Stephen AMBROGIO et Fabien ROBERT, 2025 - **SAMOSA : Des capteurs climatiques et des outils numériques pour piloter des systèmes horticoles bas intrants phytosanitaires.**
Innovations Agronomiques 107, 227-241
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art17

Sécurité sanitaire : nouvelles méthodes pour maîtriser les risques

Jean-Michel SAVOIE, Rodolphe VIDAL, Camille VINDRAS, Marie-Hélène ROBIN, Gwenaëlle JARD et Delphine SICARD, 2025 - **Myco3C : Identifier et limiter les risques de mycotoxines dans les céréales produites, stockées et transformées en circuit court.**
Innovations Agronomiques 107, 242-257
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art18

Stéphanie LA CARBONA, Maëlle ROBIN, Julie CHALLANT, Marion BICHET, Maxime LE BLOND, Sébastien MASSIER, Marion GARDETTE, Christophe GANTZER, Isabelle BERTRAND et Nicolas BOUDAUD, 2025 - **NOROSTAN : potentiel d'indicateurs viraux pour estimer le caractère infectieux des norovirus humains dans les salades 1ère et 4ème gammes.**
Innovations Agronomiques 107, 258-270
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art19

Alice ROUSSEAU, Gaëlle COQUEREAU, Marine MINIER, Alice HUBERT, Cécile LAITHIER, Jean-Louis POULET, Renée DE CREMOUX, Claire BOYER, Christophe HUAU, Laurent DELATTRE, Pierre MARTIN, Apolline BAILLYS SALINS et Pierre-Guy MARNET, 2025 - **CapriMam3D : les technologies 3D au service de la traite caprine de demain.**

Innovations Agronomiques 107, 271-287
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art20

Méthodes d'évaluation pour des sélections animales et végétales efficientes

Amandine LAUNAY, Philippe BOULESTEIX, Marine BARBAT, Emeric DUGAS, Romain FOUGEROLLAS, Lola CROUE et Caroline MOULIN, 2025 - **UniGéno : vers une évaluation génomique unifiée et en une seule étape.**
Innovations Agronomiques 107, 288-300
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art21

Juliette MAGADRAY, Romain SAINTILAN et Pauline BRENAUT, 2025 - **Pic'Let : Développement d'un outil de phénotypage du niveau de maturité du porcelet par intelligence artificielle.**
Innovations Agronomiques 107, 301-315
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art22

Sandrine SCHWOB, Mathieu MONZIOLS, Delphine LOISEAU, Claire HASSENFRATZ et Maxime BANVILLE avec la collaboration de : Guillaume LENOIR, Bruno LIGONESCHE, Florence YTOURNEL et l'équipe de l'INRAE de l'UE3P du Rheu, 2025 - **EFFISCAN : Nouveaux critères d'efficience alimentaire et de composition corporelle par scanner dédiés à la sélection porcine.**
Innovations Agronomiques 107, 316-327
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art23

Marie-Agnès DUCASSE, Amélie ROY, Denis CABOULET, François DAVAUX, Jean-Michel DESSEIGNE, Philippe COTTEREAU, Yannick SIRE, Magali BES, Evelyne AGUERA, Jean-Marie SABLAYROLLES, Jean-Roch MOURET et Marc PEREZ, 2025 - **Vinimag : système automatisé de microvinification (<1 kg) dédié aux vins rouges pour l'expérimentation viti-vinicole.**
Innovations Agronomiques 107, 328-341
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art24

Améliorer les qualités organoleptiques des produits

Christophe MONNET, Eric DUGAT-BONY, Céline DELBÈS, Cresciense LECAUDÉ, Yvette BOUTON, Elisa MICHEL, Isabelle VERDIER-METZ, Sarah CHUZEVILLE, Cécile CHARLES, Ronan LASBLEIZ et Blandine POLTURAT, 2025 - **ADAMOS - Un nouveau regard sur les écosystèmes microbiens laitiers et fromagers apporté par les méthodes omiques.**
Innovations Agronomiques 107, 342-356
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art25

Pascal POUPARD, Frédéric CHARRIER, Philippe COTTEREAU, Stéphane DELPECH, Elise SALANOUVE, Laurent DAGAN, Erick CASALTA, Jean-Roch MOURET et Rémi BAUDUIN, 2025 - **DiVin Cidre : Développement d'itinéraires techniques pour optimiser le caractère fruité des vins et des cidres.**
Innovations Agronomiques 107, 357-369
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art26

Valérie MÉRENDET, Onrawee LAGUERRE, Sophie ANNIBAL, Evelyne DERENS, Jean MOURET, Denis FLICK, Steven DURET, Elsa DESNOUES, Valentine COTTET et Christophe AUBERT, 2025 - **FreshQualiTom : étude de l'impact du froid sur les qualités de la tomate, au cours du circuit logistique.**
Innovations Agronomiques 107, 370-386
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art27

Nouveaux modes de travail en agriculture

Blandine PASSEMARD-KALKBRENNER, Hélène BRIVES et Mathilde GRAU, 2025 - **Co-Agil : Accompagner les animateurs de collectifs agricoles dans la durée.**

Innovations Agronomiques 107, 387-397
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art28

Christine GUINAMARD, Jocelyn FAGON, Marie-ODILE NOZIERES-PETIT, Claire LESUR-DUMOULIN, Françoise MORIZOT-BRAUD et Laurence ROUHER, 2025 - **Travail en circuits courts, à la recherche d'équilibres.**
Innovations Agronomiques 107, 398-420
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art29

Pascale METAIS, Nicolas ROGIER, Marine LACOSTE, Pierre DUL, Thomas LEBORGNE, Rémy DUVAL, Annie DUPARQUE, Damian MARTIN, Philippe BILLA, Mathieu LAMANDE et Carolina UGARTE, 2025 - **J-DISTAS : construction d'un outil de calcul des jours disponibles pour les grandes cultures.**
Innovations Agronomiques 107, 421-440
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art30

Anne-Laure LAROCHE, Allan MAIGNANT, Ronan SYMONEAUX, Gaëlle PANTIN-SOHIER, Caroline WIDEHEM et Imène BELBOULA, 2025 - **DEXINNOV : une analyse de l'innovation produit en horticulture de l'amont de la filière à l'aval, jusqu'à sa perception par le consommateur.**
Innovations Agronomiques 107, 441-453
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art31

RESP'HAIES - Méthodologies innovantes d'évaluation de la biomasse et des stocks de carbone des haies françaises

Sylvain BETOLAUD[1], Frédéric COULON[2], Lucas LESAINT[3], Catherine MORET[4], Laurent NEVOUX[1], Baptiste SANSON[4], Valérie VIAUD[3]

[1] SCIC Bois Bocage Énergie, 6, place de Verdun, 61800 Chanu, France

[2] Solagro, 75 Voie du TOEC, CS 27608, 31000 Toulouse, France

[3] INRAE UMR SAS, Centre Bretagne-Normandie, 4 allée Adolphe Bobierre, CS 61103, 35011 Rennes Cedex, France

[4] Réseau Haies France, 38 rue Saint-Sabin, 75011 Paris, France

Correspondance : catherine.moret@reseauhaies.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art01

Résumé

Le projet Resp'haies visait à renforcer les connaissances sur les haies pour guider l'action publique et produire de nouveaux référentiels et outils à l'intention des agriculteurs, des conseillers, des gestionnaires et des enseignants-formateurs. Le présent article valorise les travaux relatifs à l'élaboration de méthodes simplifiées pour mesurer la production de biomasse et le stockage de carbone des haies en vue d'établir des références pour la France entière. À partir d'un échantillon de 98 haies mesurées dans quatre régions différentes (Normandie, Hauts-de-France, Pays de Loire et Bourgogne-Franche-Comté), les auteurs ont modélisé des méthodes simplifiées de cubage des haies de taillis, d'arbustes, d'arbres et de têtards ainsi que de mesure de stockage du carbone dans les sols des haies. Ils ont également produit des données de références dans les territoires étudiés sur la productivité des haies (volume et accroissement, tonnage et compartiment de stockage de carbone).

Mots-clés : haies, biomasse, carbone dans les sols, cubage, bois-énergie, agroforesterie

Abstract: RESP'HAIES - Measuring biomass and carbon stocks of French hedges : innovative methodologies

The Resp'haies project aimed at enhancing knowledge about hedgerows to guide public initiatives and developing news references and tools for farmers, advisors, managers, and teacher trainers. This current article highlights the work on developing simplified methods to measure biomass production and carbon storage in hedgerows, to establish national benchmarks across France. Based on a sample of 98 hedgerows measured in four different regions (Normandie, Hauts-de-France, Pays de Loire et Bourgogne-Franche-Comté), the authors modelled simplified methods for assessing the volume of coppices, shrubs, trees, and pollards, as well as for measuring carbon storage in hedgerow soils. They also provided reference data on hedgerow productivity (volume and growth rates, tonnage, and carbon storage compartments) for the studied regions.

Keywords: hedgerows, biomass, soil carbon, volume estimation, wood energy, agroforestry

1. Introduction

Le Pacte en faveur de la haie engagé par l'Etat en septembre 2023 vise à enrayer la destruction et la dégradation des haies observées depuis une cinquantaine d'années, estimée à 23 500 km/an entre la période 2017 et 2021 (Piveteau *et al*, 2023). Parmi les principaux leviers identifiés pour parvenir à

préserver et développer les haies figure notamment la valorisation durable des produits et services issus des haies. Celle-ci peut s'appuyer sur l'intérêt croissant pour la biomasse issue des haies sous forme de bois déchiqueté (bois plaquette) destiné à approvisionner des chaudières collectives de capacité importante. L'émergence et le développement de la filière bois énergie d'origine bocagère présente cependant un risque d'exercer une pression accrue sur la ressource bocagère (Douet et Lemarchand, 2016) en cas de sur-prélèvement. Les données disponibles actuellement, provenant d'étude réalisées par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) sur l'évaluation de la biomasse en Bretagne et en Normandie s'appuient sur des enquêtes auprès des opérateurs des haies ainsi que d'une étude de Bouvier (2008). Les retours d'enquête réalisées ont cependant été peu nombreux et les résultats ont été jugés peu exploitables. Aujourd'hui, il est donc difficile pour les acteurs locaux de donner des valeurs chiffrées des volumes récoltés et des fréquences de coupe dans les haies de leurs territoires. Pour évaluer de manière plus robuste la biomasse bocagère et les prélèvements possibles, il est nécessaire de disposer d'une base de données de mesures de terrain, s'appuyant sur un cubage (évaluation du volume) des haies obtenu par une méthodologie maitrisée qui puisse être utilisable à grande échelle, en association avec un dispositif exhaustif de description du linéaire bocager.

Les haies ont également un potentiel de stockage de carbone intéressant, notamment dans le cadre de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, porté par la Stratégie Nationale Bas Carbone (Pellerin *et al*., 2020). Une méthode Haies[1] du Label Bas Carbone a été approuvée en 2021. Promue par la Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire, cette méthode Haies s'appuie sur les résultats du projet Carbocage (Colombie *et al*., 2020) des bocages de l'Ouest et sur l'état de connaissances bibliographiques. Cependant, sa construction butte sur le manque de références disponibles sur le stock de carbone des haies dans les différents compartiments, suivant les types de haies et les situations pédoclimatiques en France. Pour remédier à ce manque de connaissance, de nombreux abattements sont réalisés afin de prendre en compte les incertitudes sur le stockage additionnel de carbone des projets de haies accompagnés dans le cadre de cette méthode. Il est donc nécessaire de poursuivre les suivis pour préciser les données de références nécessaires aux modèles.

Pour répondre à ces enjeux, les travaux du rapport n°3 du projet de recherche et développement Resp'haies[2], « Resilience et Performances des exploitations agricoles liées aux Haies » ont porté sur l'évaluation de la biomasse et du carbone dans les compartiments aériens et sols des haies de différentes situations pédoclimatiques caractéristiques.

Les trois objectifs principaux de ce rapport n°3 étaient de (1) concevoir et tester une méthode simplifiée de calcul des stocks et des flux de biomasse et de carbone dans les compartiments aériens et sols des haies sur des zones de test de la méthodologie, (2) actualiser les références existantes à partir de données consolidées de terrain, et (3) produire des éléments de références chiffrés de biomasse et de stock de carbone dans les compartiments aériens et sols. L'étude a été menée dans quatre contextes pédoclimatiques différents en France : Normandie, Hauts-de-France, Pays de la Loire et Bourgogne-Franche-Comté.

Méthodologie

Cet article détaille la méthodologie employée pour évaluer la biomasse aérienne et les stocks de carbone des haies. Il présente les résultats obtenus, incluant de nouvelles données de références de biomasse pour la Normandie, les Hauts-de-France et les Pays de la Loire et de carbone pour la Normandie, les Hauts-de-France et la Bourgogne-Franche-Comté. Une section de discussion explore

[1] Cette méthode Haies est consultable sur : https://label-bas-carbone.ecologie.gouv.fr/la-methode-haies

[2] Les huit rapports du projet Resp'haies (2019-2022) sont consultables sur : https://reseauhaies.fr/resphaies/

ensuite les implications des résultats obtenus avant de conclure. Chacune des parties de l'article comporte un volet « biomasse » et un volet « carbone ».

2. Matériels et méthodes

2.1. Volet biomasse

Les types de haies en France sont nombreux et parfois complexes dans leur composition. Pour une première approche méthodologique, il été fait le choix d'étudier les types de haies les plus simples et uniformes en gestion : têtards et taillis d'arbustes et d'arbre (Figure 1). Pour en connaitre le descriptif précis, il est conseillé de se référer au référentiel national sur la typologie des haies (Réseau Haies France, 2017).



Figure 1 : Types de haies étudiées. 1 et 2 : taillis simple de cépées d'arbustes, 3 et 4 : taillis simple de cépées d'arbres, 5 et 6 : alignement de têtards. Crédits photos : Réseau Haies France.

Les types des haies étudies dans le projet sont les suivants :

- taillis simple de cépées d'arbustes ;
- taillis simple de cépées d'arbres ;
- taillis fureté de hêtres ;
- taillis mixte de cépées d'arbres et d'arbustes ;
- alignement de têtards ;
- taillis sous futaie de têtards et cépées d'arbustes ;
- taillis sous futaie de têtards et cépées d'arbres.

Il s'agit de types de haies qui, lorsqu'elles sont exploitées, le sont entièrement, ce qui facilite le suivi des chantiers et de la quantité de biomasse. Cette proposition permet de ne pas avoir trop d'indicateurs explicatifs des données tout en permettant la valorisation des résultats en les associant proportionnellement dans des types de haies plus complexes (par exemple les types taillis et futaies croisés dans le type taillis sous futaies). Les données de biomasse s'appuient sur un échantillon de 98 haies réparties en Hauts-de-France, Normandie, Pays de la Loire et Bourgogne-Franche-Comté.

Les structures locales ont réalisé un cubage de bois sur pied de l'ensemble de l'échantillonnage des haies prévues (sur un linéaire de 100 mètres linéaire (ml) homogène). Elles ont également effectué des mesures à des points différents de la haie : hauteur, largeur au sol, largeur à 1,30 m, largeur du houppier, longueur, nombre de cépées, nombre de brins seuls, inventaire exhaustif de tous les individus et taille estimée). Une fois mesurées, les haies ont été exploitées et broyées. Il est donc possible de comparer le volume estimé sur pied au volume broyé obtenu.

Par ailleurs, les remorques ont été pesées afin d'avoir les équivalents en tonnage. Ces données ont permis de vérifier les tableaux de conversion entre le poids pesé directement après le déchiquetage (en tonnes) et les volumes de bois (en m^3) à partir de la mesure des volumes de bennes. L'objectif étant de produire un référentiel d'accroissement moyen annuel des différents types de haies, l'âge du bois a été évalué précisément par des comptages des cernes sur les brins coupés.

A partir de ce jeu de données, différents types d'analyses statistiques ont été réalisées, afin de décrire et établir les liens entre les variables. Il a été réalisé des analyses générales sur l'ensemble des haies. Puis, afin d'identifier des corrélations possibles, des analyses exploratoires ont été réalisées, d'abord entre variables deux à deux, puis entre des groupes de variables par la recherche de modèles de régression. Les analyses ont permis de construire une méthode de cubage très simplifiée basée sur deux modèles établis, tout en étant suffisamment robuste au vu des données disponibles statistiquement représentatives.

2.2. Volet carbone

Dans ce volet de l'étude, l'impact des haies sur le stockage additionnel de carbone dans les sols a été estimé au niveau des sites d'étude. Le protocole de mesures était basé sur un échantillonnage des sols sur la base des résultats de Viaud et Künnemann (2021). Ce protocole de mesure a été conçu pour permettre de capter la distribution spatiale des stocks de carbone au voisinage de la haie dans les parcelles adjacentes. Les sols ont été échantillonnés avant les opérations de fertilisation et de travail du sol dans les parcelles en cultures annuelles.

Au sein des trois régions, Bourgogne-Franche-Comté, Normandie et Hauts-de-France, un sous échantillonnage de haies a été sélectionné basé sur l'échantillonnage ayant servi à faire les mesures de biomasse des haies. Les haies ont été sélectionnées dans des zones avec un linéaire de haies dense en contexte de polyculture élevage, et avec un faible gradient climatique (climat tempéré océanique). Les haies sélectionnées correspondaient toutes à des haies matures de plus de 70 ans. Au total, 45 sites d'études (un site d'étude correspondant à une parcelle agricole bordée d'une haie) ont été sélectionnés : 16 en Normandie, 15 en Hauts de France et 14 en Bourgogne-Franche-Comté.

Pour chaque site d'étude, des points d'échantillonnage ont été placés le long de trois transects perpendiculaires à la haie, à des distances de 1 et 3 mètres de la haie et en milieu de parcelles (Figure 2). A chaque distance, des échantillons de sol ont été prélevés à la tarière manuelle à trois profondeurs : 0-30, 30-60, 60-90 cm. Pour une distance et une profondeur donnée, les trois échantillons collectés sur les trois transects ont été mélangés pour obtenir un échantillon composite.

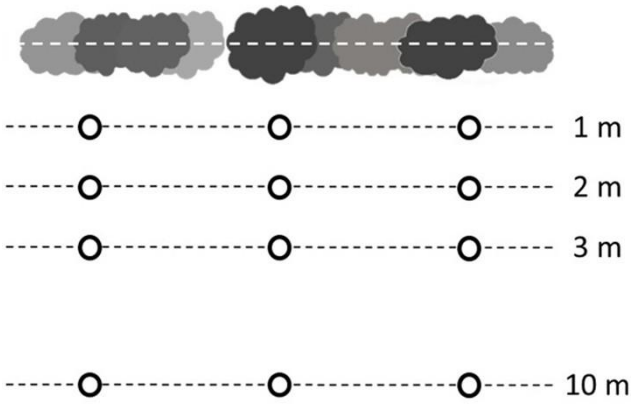


Figure 2 : Stratégie d'échantillonnage des points de prélèvement pour un site d'étude

Pour chaque échantillon, la teneur en carbone (g.kg^{-1}, NF ISO 10694), ainsi que la granulométrie 5 fraction (NF X31-107) ont été analysées. La densité apparente (g.cm^{-3}) a été estimée en s'appuyant sur une fonction de pédotransfert validée par des mesures spécifiques sur le terrain. Les stocks de carbone (t C.ha^{-1}) ont ensuite été calculés et corrigés par une méthode de masse de sol équivalente.

Ce protocole implique néanmoins un échantillonnage dense et des travaux de terrain et de traitements et d'analyse des sols au laboratoire conséquents. Dans une perspective d'opérationnalité et d'étude de la faisabilité du stockage additionnel de carbone dans les sols à plus grande échelle, l'impact de simplifications de ce protocole sur l'estimation du stockage additionnel de carbone dans le sol au voisinage des haies a été estimé.

Ce travail a permis la publication d'un article scientifique (Lesaint *et al.*, 2023) qui contient le « matériel et méthodes » détaillé de ce volet, incluant les analyses de données réalisées.

3. Résultats

3.1. Volet biomasse

3.1.1. Méthode de cubage simplifié des haies de type taillis et têtards

Par la réalisation de modèles avec le logiciel de statistique R, il a été recherché des corrélations entre la masse humide obtenue du chantier, avec les données mesurées sur le terrain. Les variables à mesurer sont la largeur au sol de la haie, la longueur et la largeur au houppier (Figure 3).

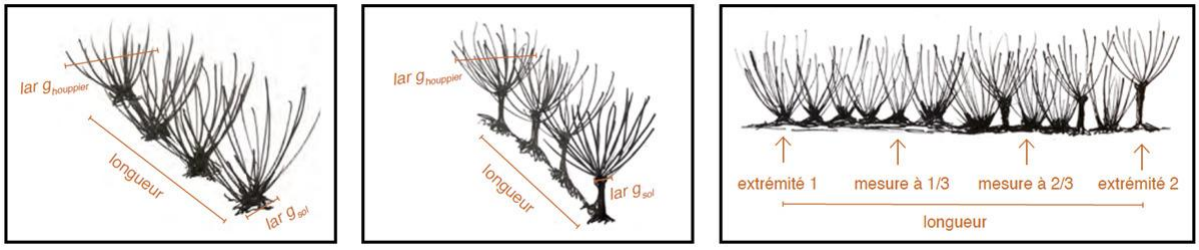


Figure 3 : Variables à mesurer pour les modèles de cubage simplifiés

Formules de calcul pour l'estimation de la masse humide :

- longueur de la haie : distance aux sections extrêmes de la haie, à l'aplomb des houppiers ;
- largeur moyenne au sol de la cépée ou de la tête du têtard : plus grande largeur visible de la base de la cépée ou de la tête du têtard qui représente la zone d'implantation des brins. Pour l'obtention de la moyenne, cette mesure est reproduite pour les individus aux deux extrémités de la haie et environ une fois tous les 25 mètres ou a minima à 1/3 et 2/3 de la haie, pour obtenir au minimum entre quatre et cinq mesures ;
- largeur moyenne du houppier de la haie : projection de la partie la plus large du houppier étudié. Pour l'obtention de la moyenne, les mêmes points de mesures sont pris que ceux pour la largeur précédente.

Deux modèles de calculs pour estimer la biomasse humide ont été établis : un premier modèle qui peut être appliqué sur les haies de taillis constituées de cépées d'arbres et/ou d'arbustes et un deuxième modèle qui peut être utilisé sur des haies constituées de têtards avec ou sans taillis associé (Figure 4). Des ajustements pourront être réalisés en fonction de la facilité estimée des opérateurs de faire les mesures. En effet, la largeur au houppier étant très corrélée à la hauteur de la haie, il serait possible de remplacer la prise de la largeur du houppier par la hauteur de la haie dans les formules.

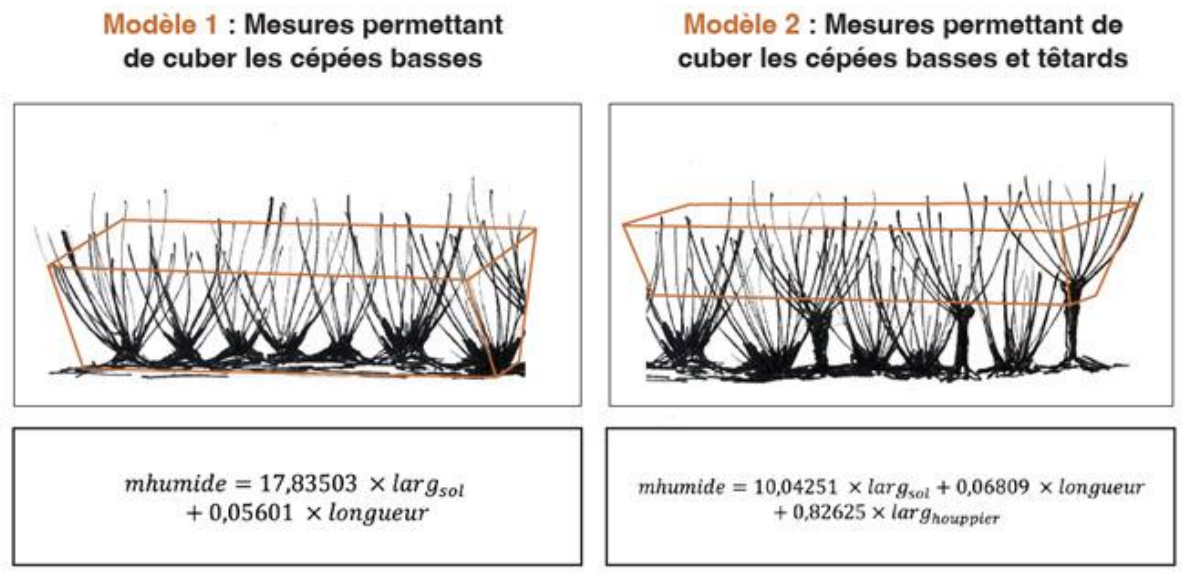


Figure 4 : Modèles de cubage simplifiés

3.1.2. Données de référence de biomasse et de stocks de carbone dans le compartiment aérien des haies

Ces travaux ont permis de produire des références en Normandie, Pays de la Loire et Hauts-de-France.

L'accroissement annuel médian des taillis (dont les têtards, considérés comme des « taillis perchés ») dans ces trois régions est de l'ordre de 1 T humide/100 ml (Tableau 1). L'accroissement annuel en Mayenne est supérieur de 0,20 T humide.

Tableau 1 : Productivité annuelle en bois déchiqueté des haies de taillis en tonne humide pour 100 ml en fonction de la région.

	NORMANDIE	PAYS DE LA LOIRE	HAUTS-DE-FRANCE
ACCROISSEMENT ANNUEL MÉDIAN EN TONNE HUMIDE POUR 100 ML DE HAIE	1,00	1,20	0,98

A partir de ces données de production de volume de bois produit, il est possible d'estimer le stockage de carbone dans la biomasse aérienne produites par les haies de taillis en bon état (Tableau 2).

Tableau 2 : Stock de carbone dans la biomasse aérienne exploitée des haies de taillis

STOCK DE CARBONE MEDIAN EN TONNE DE CO_2 PAR KM DE HAIES ET PAR AN (EN TEQ CO_2/KM/AN)	NORMANDIE	PAYS DE LA LOIRE	HAUTS-DE-FRANCE
DANS LA BIOMASSE AÉRIENNE EXPLOITÉE DES TAILLES D'ARBUSTES, D'ARBRES ET DE TÊTARDS	9,6	11,4	9,3

D'autres données de références plus détaillées ont été publiées :

- les gabarits (hauteur, largeur) des haies en fonction de leur typologie ;
- la caractérisation de la productivité des haies en fonction de leur typologie ;

- la vérification des coefficients de conversion d'unité : volume apparent (MAP) en masse humide (tonne de bois vert) et masse humide (tonne verte) en masse sèche (tonne sèche).

3.2. Volet carbone dans le sol

3.2.1. Stocks de référence dans les sites échantillonnés

L'analyse de variance permettant de comparer le stock de carbone à différentes distances de la haie, montre que les stocks de carbone à proximité des haies sont bien significativement différents des stocks à distance et des stocks considérés comme stock de référence dans une situation sans haie (Figure 5). Pour les horizons 0-30 et 30-60 cm, les stocks de carbone à proximité de la haie sont significativement différents des stocks de référence à 10 m jusqu'à une distance de 2 m du pied de la haie. Au-delà (60-90 cm), les stocks à proximité de la haie sont significativement différents des stocks de référence uniquement à 1 m de la haie. Nous observons cet « effet haie » quel que soit l'usage du sol adjacent à la haie (rotation de cultures annuelles, rotation de prairies temporaires et cultures annuelles, prairies permanentes). Nous pouvons donc calculer un stock additionnel de carbone au voisinage de la haie jusqu'à une distance de 2 m dans la couche 0-60 cm de sol et jusqu'à une distance de 1 m dans l'horizon 60-90 cm.

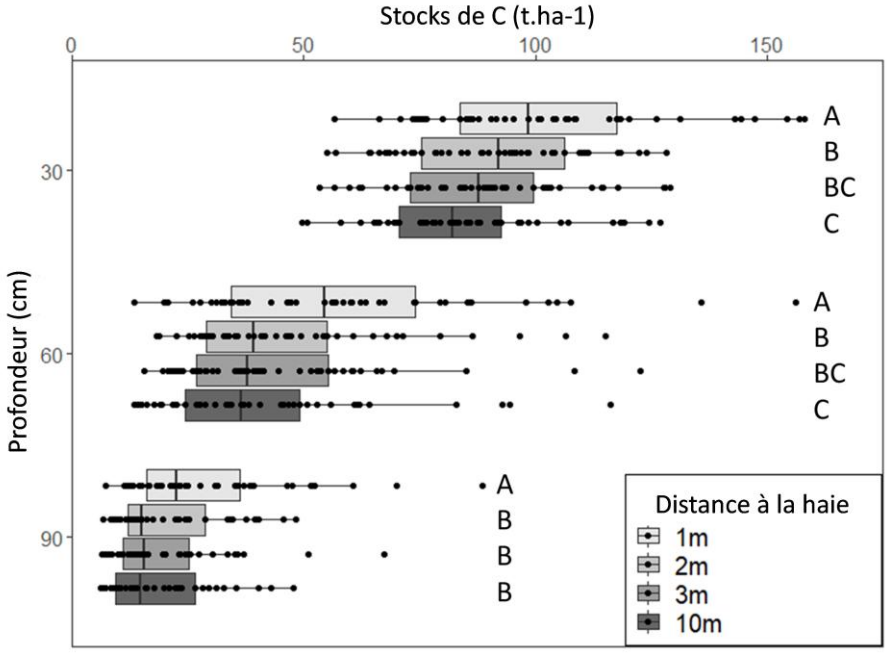


Figure 5 : Box-plots des stocks de carbone à différentes distances de la haie et pour 3 profondeurs de sol (0-30, 30-60 et 60-90 cm). Dans les box-plots, les bords du rectangle représentent les quantiles 25 et 75 %, la ligne à l'intérieur de la boîte représente la médiane des observations, la distance entre les extrémités des « moustaches » figurent 1,5 fois l'espace interquartile. Les points représentent les données individuelles. Les lettres caractérisent la significativité des différences de stocks.

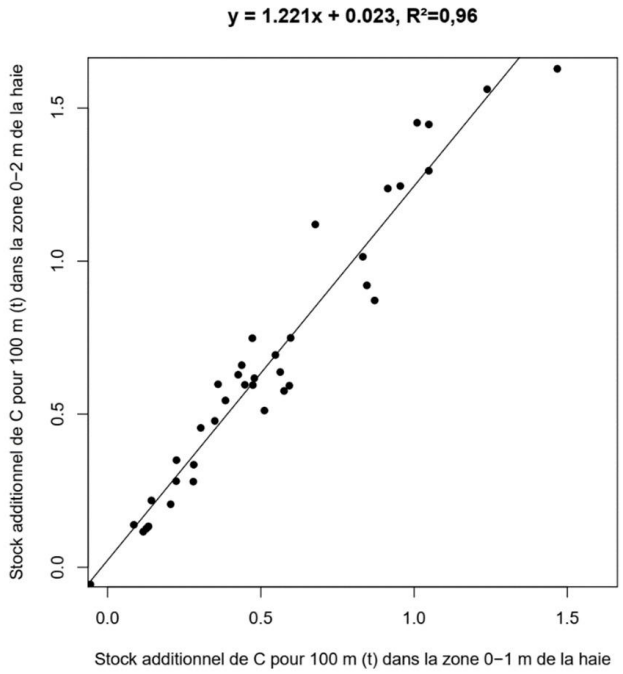
Les stocks additionnels totaux de carbone, liés à la présence de haie, estimés dans cette étude sont en moyenne de 0,69 ; 0,53 et 0,51 t de carbone pour 100 m linéaires de haie, respectivement en Normandie, Bourgogne et dans les Hauts-de-France (Tableau 3). Ils présentent une forte variabilité. Ces stocks additionnels représentent une augmentation relative du stock de carbone de 0,44 ; 0,45 et 0,43 % dans une parcelle de 1 hectare qui serait bordée de 100 m de haie, respectivement en Bourgogne, Hauts-de-France et Normandie. Ils représentent une augmentation relative du stock de carbone de 15 % en Bourgogne et Hauts-de-France et 14 % en Normandie, localement dans la zone d'influence de la haie (bande de 2 m de large à partir du pied de la haie).

Tableau 3 : Stocks additionnels totaux de carbone, liés à la présence de haie dans les différentes régions étudiées

STOCKS ADDITIONNELS POUR 100M / STOCK DE REFERENCE POUR 1HA			STOCKS ADDITIONNELS POUR 100M / STOCK DE REFERENCE DANS LA BANDE AFFECTEE PAR LA HAIE		
BOURGOGNE	**Hauts-de-France**	**Normandie**	**Bourgogne**	**Hauts-de-France**	**Normandie**
0,44 % ± 0,39	0,45 % ± 0,36	0,43 % ± 0,35	15 % ± 13	15 % ± 12	14 % ± 12

3.2.2. Protocole simplifié d'évaluation du stockage additionnel de carbone dans le voisinage des haies

Les résultats montrent, que sur les situations échantillonnées où l'érosion n'est pas un processus majoritaire d'apport ou de perte de carbone au voisinage des haies, une simplification du protocole peut être envisagée en se limitant à deux points de mesures : à proximité de la haie (1 m) et à une distance d'au moins 10 m de la haie servant de référence, sur 90 cm.



Le stock additionnel dans le premier mètre du pied de la haie représente 60 à 100 % du stock additionnel estimé sur l'ensemble des deux premiers mètres. Il existe une relation linéaire forte entre le stock additionnel dans le premier mètre et le stock additionnel estimé sur les deux premiers mètres (Figure 6).

Figure 6 : Stocks additionnels de carbone dans les sols estimés pour 100 m linéaires de haie dans la zone 0 à 2 m du pied de la haie, en fonction des stocks additionnels de carbone estimés pour 100 m linéaires de haie dans la zone 0 à 1m du pied de la haie. La droite représente la régression linéaire entre les deux valeurs, dont l'équation et le R^2 sont inscrits sur le graphique.

En revanche, une réduction de l'échantillonnage aux horizons de surface du sol n'est pas souhaitable dans la perspective d'approcher le stockage additionnel total de carbone associé à la présence de haies. Cette méthodologie conduit en moyenne à sous-estimer de façon significative (p=0,001) le stock de carbone additionnel pour 100 m linéaires de 0.30 tC par rapport à un échantillonnage sur 90 cm. Il n'existe pas de relation simple entre le stock additionnel de carbone mesuré sur 30 cm et le stock additionnel de carbone mesurée jusqu'à 90 cm de profondeur, qui permettrait d'estimer le stock additionnel total à partir d'un échantillonnage des 30 premiers centimètres uniquement.

4. Discussions

4.1. Volet biomasse

L'étude a abouti à la construction d'une méthode simplifiée de cubage sur pied des haies de taillis (arbres et arbustes) et de têtards qui sont aujourd'hui les types de haies les plus exploitées dans les territoires pour produire de la biomasse. Les modèles confirment les résultats des travaux faits en forêt de Auclair et Metayer (1980), dans Bazin et Chevalier (1985), qui mettent en évidence une forte corrélation entre le poids total d'un brin de taillis et sa surface terrière (surface de la section de coupe). En quelque sorte, le houppier de la haie est compris dans un parallélépipède de la forme d'un « moule à cake ». Indépendamment de la taille des branches, de la forme de la cépée ou de l'espèce mesurée, le volume de biomasse produite est déterminé par la place disponible au sein de la cépée et entre les cépées pour développer des branches en fonction de la lumière accessible. La formule permet de calculer ce volume déduit du volume des vides entre les branches. Il est cependant nécessaire de conforter les modèles de cubage simplifiés avec plus de données de mesure de haies afin de renforcer sa fiabilité. Les modèles ont pu être établis avec 46 jeux de données complètes sur les 98 haies mesurées. L'objectif est d'avoir une base de 100 haies minimum.

Les référentiels permettent de confirmer les données du Nord-Ouest de la France sur l'accroissement annuel et le stockage de carbone associé. La différence d'accroissement en Mayenne peut s'expliquer par les modalités de gestion identifiées chez les agriculteurs ayant participé au projet dans cette région : les haies ont déjà été exploitées et recépées sur un cycle précédent suivant les bonnes conduites permettant d'augmenter la productivité grâce à une bonne reprise des brins.

Les données généralement utilisées dans le Grand Ouest sont issues d'une étude ancienne réalisée en 2008 (Bouvier, 2008). Les données issues du projet Resp'haies-ADEME sont très éloignées pour les taillis d'arbustes. Cela pose la question de la typologie des haies, mal définie dans les études antérieures. Les résultats sont plus concordants pour les taillis d'arbres mais avec un accroissement supérieur de 20 % obtenu dans le projet Resp'haies-ADEME. Les données estimées du stockage de carbone permettent de considérer que les références du Grand Ouest utilisées dans la méthodologie nationale Label Bas Carbone sont équivalentes dans la région des Hauts-de-France.

4.2. Volet carbone dans les sols

L'échantillonnage a été réalisé exclusivement dans des zones de polyculture-élevage qui sont à l'échelle nationale les systèmes agricoles auxquels les haies sont historiquement les plus associées. L'étude confirme un stockage additionnel de carbone dans les sols en présence de haies par rapport à une situation sans haie. Le stockage additionnel moyen mesuré sur l'échantillonnage est du même ordre de grandeur que celui rapporté dans la littérature à l'échelle européenne. Par rapport aux références françaises, les stocks additionnels sont inférieurs d'un ordre de grandeur à ceux rapportés par Walter *et al*. (2003). Mais ici, les situations échantillonnées diffèrent par rapport à celles étudiées par Walter *et al*. (2003) en Bretagne. En effet, les situations retenues pour l'étude présentent un relief peu prononcé et sont peu sensibles et peu soumises à l'érosion hydrique ; en particulier les haies situées perpendiculairement à la pente ou interceptant les flux hydriques dans des versants présentant des pentes significatives, ont été exclues de l'échantillonnage, pour s'affranchir des effets d'accumulation de sol en amont de haie par dépôt de particules érodées en amont. La moyenne de stockage additionnel mesurée correspond aux valeurs basses rapportées par Viaud et Kunnemann (2021) – projet ADEME Carbocage – pour des haies de moins de 20 ans situées dans le Nord-Ouest de la France (Bretagne, Pays de Loire). Elle est 2 fois moins élevée que les valeurs rapportées des haies anciennes (1,4 à 4,7 t de carbone pour 100 m linéaires de haie). Comme Viaud et Kunnemann (2021), l'étude montre un stockage additionnel y compris en prairie. Également de façon similaire à la littérature, on trouve une grande variabilité de stockage additionnel dans les sols en leur voisinage

parmi les haies échantillonnées dans l'étude : il ne s'agit pas d'une variabilité entre les trois sites régionaux échantillonnés (Normandie, Bourgogne, Hauts-de-France), mais bien d'une variabilité locale observée au sein même d'une région.

Les résultats montrent, que sur les situations échantillonnées où l'érosion n'est pas un processus majoritaire d'apport ou de perte de carbone au voisinage des haies, une simplification du protocole peut s'envisager en limitant à deux distances de la haie : 1 m et le point de référence à au moins 10 m de distance.

Le traitement des échantillons se fait tel que décrit dans le protocole complet. Le calcul du stock additionnel, présenté ci-dessus, est réalisé pour la distance de 1 m. Le stock additionnel total sur l'ensemble de la zone d'influence de la haie est donné par l'équation 3, tirée des résultats du projet Resp'haies dans 45 situations (Figure 7).

Eq. 3 $$SOC_{0-2m,tot} = 1{,}221 \times SOC_{0-1m,tot} + 0{,}023$$

Figure 7 : Equation du stock additionnel total sur l'ensemble de la zone d'influence de la haie.

Cette simplification du protocole permet de réduire significativement le temps de prélèvements et de traitement des échantillons en le divisant par deux.

5. Conclusion

Plusieurs axes sont identifiés pour poursuivre ce travail autour de la connaissance de la biomasse et du stockage des haies en France.

Dans un premier temps, d'un point de vue méthodologique, il est nécessaire de consolider les modèles de cubage simplifié des taillis par l'acquisition de nouvelles données exhaustives de comparaison de cubages avec des chantiers d'exploitation. Un projet dans ce sens soutenu par l'ADEME et WWF et coordonné par Réseau Haies France a été mené au cours de l'hiver 2023/2024, les résultats en seront prochainement publiés.

Par ailleurs, l'étude n'a pu s'intéresser qu'aux haies de taillis ou têtards. Il conviendra de la compléter par une étude sur les haies d'arbres de haut-jet pour disposer d'une méthode simplifiée complète qui pourra s'appliquer à tous les types de haies en France. Du fait de la difficulté d'obtenir des données de chantier d'exploitation pour cette typologie de haies, il est imaginé de travailler des mesures des gabarits des arbres avec un croisement des volumétries obtenues par des données lidar.

Les données de stockage de carbone additionnels dans les sols aux abords des haies montrent une très forte variabilité La variabilité peut s'expliquer par les propriétés des sols, les usages des parcelles adjacentes mais également les caractéristiques et les modalités de gestion des haies. Une meilleure compréhension de ces facteurs pourra permettre de proposer des adaptations de protocoles ou des guides pour l'échantillonnage en fonction des situations locales. Par ailleurs, ce travail de recherche peut donner des pistes pour pouvoir agir sur certains facteurs humains qui peuvent permettre l'augmentation du stockage du carbone dans les sols aux abords des haies.

Cette construction de méthodologies simplifiées, n'impliquant pas l'obligation d'avoir une exploitation des haies et diminuant fortement les coûts de mise en œuvre, apporte la possibilité de construire sur un pas de temps et à un coût raisonnable un référentiel national biomasse-carbone des haies dans toutes les situations pédoclimatiques.

Il est essentiel de poursuivre les travaux engagés pour permettre le développement de filières locales s'appuyant sur la gestion durable des haies et ainsi de leur redonner une valeur économique, seule garantie de leur préservation sur le long terme.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Catherine Moret et Sylvain Betolaud ont rédigé les parties de l'article portant sur la méthodologie simplifiée de cubage des haies, avec la contribution de Laurent Nevoux pour l'élaboration de cette méthode. Lucas Lesaint et Valérie Viaud ont rédigé les parties de l'article portant sur l'évaluation du potentiel de stockage additionnel de carbone dans les sols par les haies. Baptiste Sanson a assuré la coordination de la rédaction de l'article en tant que coordinateur du projet Resp'haies. Frédéric Coulon a assuré la relecture de l'article en tant que rédacteur du chapitre portant sur l'analyse des contextes pédoclimatiques du rapport du projet Resp'haies dont est issu cet article.

Tous les auteurs et autrices ont lu et approuvé le manuscrit final.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient les structures du Réseau Haies France qui ont participé aux mesures de terrain : la SCIC Mayenne Bois Energie, la SCIC Bois Bocage Energie, l'Atelier Agriculture Avesnois Thiérache et le CPIE Yonne-Nièvre.

Déclaration de soutien financier

Les sous-actions 1.1 et 2.4 du projet Resp'haies dont les résultats sont valorisés dans cet article et le rapport n°3 du projet Resp'haies ont bénéficié du soutien financier du CASDAR, de l'ADEME et de la Fondation Ecotone.

Références bibliographiques

Auclair D., Metayer S., 1980. Méthodologie de l'évaluation de la biomasse aérienne sur pied et de la production en biomasse des taillis. Acta Oecologica / Oecologica Applicata, Vol. 1, n° 4, 357-377.

Bazin P., Chevalier D., 1985. Etude des potentialités et de la valorisation des ressources des haies bocagères de Basse – Normandie, 55 pages.

Bouvier D., 2008. Estimation de la productivité des haies de l'Ouest de la France, Recherche de références pour l'amélioration de la valorisation énergétique des haies, 85 pages

Colombie S. - CRA PdL ; Ligneau L. - CRA BhZ ; Thareau B. - ESA-LARESS ; Viaud V. - INRAE- SAS; Coisnon T. ; Dupraz P. ; Seyni N.A. – INRAE-SmartLereco ; Thomas M. - CCI PdL ; Messager O. - O2MConseil ; Treviosiol A. - ADEME. 2020. Carbocage, vers la neutralité carbone des territoires.40p.

Douet M., Lemarchand F., 2016. Du bon usage du bocage : la haie bocagère au cœur des enjeux de développement durable, Belgeo

Lesaint L., Viaud V., Menasseri-Aubry S., 2023. Influence of soil properties and land use on organic carbon storage in agricultural soils near hedges. Soil Use and Management, 39, 1140-1154.

Pellerin, S. ; Bamière, L. *et al*., 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 108 p.

Piveteau V., De Menthière C., Falcone P., Ory X., 2023. La haie, levier de la planification écologique, 116 pages.

Réseau Haies France, 2017. Référentiel national sur la typologie des haies, modalités pour une gestion durable, 90 pages

Viaud, V.; Künnemann, T. 2021. Additional soil organic carbon stocks in hedgerows in crop-livestock areas of western France. Agriculture Ecosystems and Environment, 305 : 10174.

Walter, C., Merot, P., Layer, B., & Dutin, G. (2003). The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. Soil Use and Management, 19, 201–207.

Pour citer cet article : Sylvain Betolaud, Frédéric Coulon, Lucas Lesaint, Catherine Moret, Laurent Nevoux, *et al*.. RESP'HAIES -Méthodologies innovantes d'évaluation de la biomasse et des stocks de carbone des haies françaises. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.1-12. 10.17180/ciag-2025-vol107-art01

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

CERPET : Des valeurs nutritionnelles et technologiques d'intérêt pour une valorisation du Kernza (*Thinopyrum intermedium*) en alimentation humaine

Christophe DAVID [1], Benoit MELEARD [2], Sonia GEOFFROY [2], Laurent CHIPPAUX [3]

[1] ISARA, AGRIVIA, Equipe Agroécologie et Environnement, 23 Rue Jean Baldassini, 69364 Lyon, France

[2] ARVALIS – Institut du végétal, Station de recherche et d'expérimentation, 91720 Boigneville, France

[3] Alma Pro, 1 rue de la cave, 26260 Saint-Donat-sur-l'Herbasse, France

Correspondance : davidc@isara.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art02

Résumé

La graminée pérenne *Thinopyrum intermedium*, commercialisée sous le nom de Kernza®, est testée en France depuis 2017. Son utilisation en alimentation humaine est cruciale pour assurer sa rentabilité. Le but de ce travail est de caractériser la composition du grain et ses propriétés fonctionnelles mais aussi les processus de traitement de la graine post récolte. *T. intermedium* dispose d'une teneur élevée en protéines, fibres alimentaires, matières grasses et cendres ce qui lui confère une forte valeur nutritionnelle. A l'inverse, les faibles teneurs en amidon et en gluténines à haut poids moléculaire affectent la qualité boulangère. La farine de Kernza® dispose de faibles notes de panification expliquées par des pâtes manquant de résistance. L'optimisation des processus de triage et de décorticage du grain améliore les valeurs technologique et économique du produit fini. Il est alors indispensable d'adapter la fabrication et les usages alimentaires aux caractéristiques spécifiques de la graine.

Mots clés : culture pérenne, Kernza, grain, farine, nutrition humaine

Abstract: Nutritional and technological values of interest for the development of Kernza *(Thinopyrum intermedium)* for human consumption

The perennial grass *Thinopyrum intermedium*, marketed under the name Kernza®, has been tested in France since 2017. Its use in human food is crucial to ensure its profitability. The aim of this work is to characterize grain composition and functional properties, as well as post-harvest seed processing. *T. intermedium* has a high protein, dietary fiber, fat and ash content, giving it a high nutritional value. Conversely, low levels of starch and high-molecular-weight glutenins affect baking quality. Kernza® flour has low breadmaking scores, due to a lack of dough strength. Optimizing the grain sorting and dehulling processes improves the technological and economic value of the finished product. It is therefore essential to adapt manufacturing and food uses to the specific characteristics of the grain.

Keywords: perennial crop, Kernza, grain, flour, human nutrition

1. Le *Thinopyrum intermedium* : une culture émergente à intérêts multiples

Thinopyrum intermedium (Host) Barkworth & D.R Dewey est une graminée fourragère pérenne originaire des plaines eurasiennes (Wagoner, 1990), introduite dans les années 1930 en Amérique du Nord pour le contrôle de l'érosion du sol et la restauration de la végétation. Depuis le début des années 1980, Rodale Research Center en 1988 puis le Land Institute (TLI) en 2003 ont lancé un programme de domestication directe afin notamment d'augmenter la production de grains de la culture et ce sur plusieurs années. Depuis, une variété commerciale de *Thinopyrum intermedium,* déposée sous le nom

de Kernza® par le Land Institute, fait l'objet d'un programme de domestication et de développement auprès des agriculteurs nord-américains (i.e. programme d'amélioration génétique, appui aux producteurs et au développement de filières). A ce jour, l'utilisation de la culture peut être double, cultivée comme fourrage pour l'élevage ou pour ses grains pour l'alimentation humaine. Son insertion au sein des systèmes agricoles offre plusieurs services environnementaux tels que la protection des sols (i.e., éviter l'érosion et le lessivage des nutriments) et, par conséquent, celle des eaux superficielles (Jungers *et al*., 2019) grâce à sa couverture permanente et à un système racinaire dense et profond (Crews *et al*., 2016 ; Ryan *et al*., 2018). La culture peut également contribuer à la régulation du changement climatique par une séquestration du carbone dans le sol (de Olivieira *et al*., 2018, 2020 ; Sprunger *et al*., 2019) et une moindre utilisation des intrants de synthèse issus des énergies fossiles. Enfin, l'amélioration de la capture en eau par sa densité racinaire donne à la plante une plus grande résilience face au changement climatique et aux risques de sécheresse (Clément *et al*., 2022).

Cette culture, en phase initiale de domestication, présente un potentiel de rendement faible atteignant un maximum de 10 à 20 % du potentiel des meilleures lignées modernes de blé dans une large gamme de conditions pédoclimatiques (Larkin *et al*., 2014). Malgré un réel potentiel d'amélioration génétique (DeHaan *et al*., 2023), les faibles performances productives peuvent restreindre la viabilité économique de la culture pour les agriculteurs surtout si les qualités technologiques et nutritionnelles n'obtiennent pas le minimum requis par les filières tracées disposant d'un différentiel de prix payé au producteur (i.e. Label Agriculture biologique, HVE).

S'agissant de la valeur d'usage du Kernza®, les travaux récents indiquent des caractéristiques morphologiques et physico-chimiques variables selon le matériel génétique utilisé, l'année de récolte et les conditions de production (i.e. conditions climatiques, mode de production). Malgré la variabilité des résultats, la teneur en protéines élevée (avoisinant les 20 %) et le profil nutritionnel supérieur à un blé annuel (i.e. teneur en cendres et acides aminés) confèrent à *T. intermedium* un intérêt de la part des filières d'alimentation humaine.

2. Comment juger de la qualité technologique et nutritionnelle d'une culture émergente tout en s'appuyant sur des méthodes et valeurs de référence ?

2.1. Objectifs de l'article

Malgré un intérêt croissant en Europe, notamment en France, pour le *T. intermedium*, le faible niveau de production en grains impose de juger des valeurs d'usage de la céréale en alimentation humaine. Le but de cet article est de **caractériser la composition du grain, son comportement rhéologique mais aussi ses qualités technologiques et nutritionnelles**. Par ailleurs, il s'agit **de tester des voies d'amélioration des process de transformation afin de garantir une valeur économique viable** pour un producteur en comparaison des céréales annuelles produites sur l'exploitation mais aussi pour un transformateur (i.e meunier, brasseur).

L'article cherche à répondre aux trois questions suivantes :

- le **Kernza® dispose-t-il d'une structure et d'une composition spécifique** répondant aux valeurs de référence des filières de transformation (i.e. panification, brassage) ?
- les **conditions de préparation de la graine avant mouture sont-elles faciles d'accès** pour toute utilisation en alimentation humaine ?
- le **Kernza® peut-il être valorisé par le biais de process de transformation standardisés et utilisés en industrie** (i.e. panification, brassage), faut-il une **adaptation des process** pour garantir un produit de valeurs reconnues et, par conséquent rentable à moyen terme ?

Le but de l'article est d'établir un bilan des connaissances actuelles issues, pour partie, du projet CASDAR *Céréales Pérennes pour une Transition agroécologique des systèmes de cultures* (CERPET) et du projet *Les céréales pérennes pour une transition agroécologique Accompagner le développement de filières* (DEVILCERPER) financé par la Compagnie Nationale du Rhône.

2.2. Matériels et méthodes

2.2.1. Matériel végétal utilisé

Les lots utilisés sont issus d'essais expérimentaux menés dans le cadre du projet CASDAR CERPET soit :

- un essai de Kernza® (cultivar TLI C3) comparant des niveaux de fertilisation et l'apport ou non d'irrigation. Cet essai a été mené sur la station expérimentale SaintEx Innov (Pusignan, 69) implanté de 2019 à 2021 ;
- un réseau d'agriculteurs testant la culture de Kernza® (cultivar TLI C3) mené de 2018 à 2023 ;
- un essai en pépinière testant 8 céréales pérennes dont 3 espèces de *Thinopyrum intermedium* (TLI C3, TLI C5, MN1504) mené sur la station INRAE (Crouël, 63) implanté de 2020 à 2023. Deux modalités ont associé les cultivars TLI C5 et MN 1504 avec du trèfle violet.

Les cultivars utilisés dans cet article sont issus pour deux d'entre eux du Land Institute TLI C3 et TLI C5 et un de l'Université du Minnesota commercialisé par Clearwater (MN1504) (DeHaan *et al*., 2018).

2.2.2. Méthodes

Structure, composition et qualités rhéologiques

Les choix des méthodes d'analyses pour la description de la composition et des qualités rhéologiques des grains se sont appuyés sur les indications de la littérature. Aussi, comme les auteurs des différents travaux disponibles (Murphy, 2009 ; Marti *et al*, 2015), il a été décidé de caractériser les grains à partir des descripteurs de qualité usuels. Ainsi, ont été déterminés, la masse de 1000 grains (PMG) selon la méthode NF EN ISO 520, la teneur en cendres (norme NF EN ISO 2171), la teneur en protéines par la méthode DUMAS (norme NF EN ISO 16634-2), la quantité (gluten humide) et la qualité (gluten index) du gluten (norme NF EN ISO 21415-2), la teneur en matières grasses (norme NF EN ISO 11085 - Méthode Randall) et l'amidon Ewers (règlement CEE 152/2009 – méthode par polarimétrie).

Plusieurs échantillons de farines ont été produits, sur lesquels ont été analysées la teneur en protéines par la méthode DUMAS (norme NF EN ISO 16634-2), la teneur en cendres (norme NF EN ISO 2171), la distribution des agrégats protéiques par SE-HPLC selon une méthode interne profil protéique, le comportement viscoélastique des pâtes au moyen de l'alvéographe de Chopin (norme NF EN ISO 27971), l'absorption d'eau et les caractéristiques rhéologiques au cours du pétrissage avec le Mixolab (NF V03-765) ainsi que la valeur boulangère avec le test de panification type pain courant français (NF V03-716).

Ces méthodes sont couramment utilisées en France pour caractériser les céréales à paille et leurs qualités technologiques. Elles présentent l'avantage d'être standardisées, normalisées pour la plupart et reproductibles. Par ailleurs, les utilisateurs sont familiarisés avec l'interprétation des valeurs qui en sont issues. Aussi, nous faisons le postulat que, même si les résultats obtenus avec ces méthodes n'étaient pas équivalents à ceux généralement observés sur blé tendre, un utilisateur pourrait déduire les ajustements à opérer s'il voulait utiliser cette matière première en fonction de ses applications et diagrammes de fabrication.

Process de transformation de la graine en farine

Les grains de *Thinopyrum intermedium,* de petite taille, présentent plusieurs enveloppes qu'il convient d'extraire avant le passage en mouture. L'expérimentation proposée dans le cadre du projet CERPET

avait pour but de mesurer les différentes fractions issues des étapes de nettoyage, de décorticage et de mise en mouture.

Le but des opérations de traitement de la graine est de garantir un produit fini de qualité technologique, nutritionnelle et gustative répondant aux exigences du consommateur. Il convient d'augmenter la valeur économique de la récolte en optimisant les opérations de traitement post récolte (qualité du nettoyage et décorticage, rendement meunier) et en garantissant une valeur qualitative spécifique (par ex. goût, valeur nutritionnelle).

Les travaux présentés ont été menés en atelier en mars 2023 et en avril 2024 grâce à une collaboration avec la société Alma Pro (Saint Donat sur L'Herbasse, 38). Les tests ont été effectués sur des équipements classiques de nettoyage, de décorticage et de mouture soit un trieur Zanotti M10, un module de décorticage Horn US1500 et un moulin Alma Pro à meules granit MELIA30 (Ø30 cm pour les pierres, 700 W, 220 V, 50 Hz). De plus, les essais menés avaient pour but de mettre au point un pilote industriel adapté aux spécificités du *T. intermedium* qui pourrait être utilisé à terme par un groupe d'agriculteurs, une coopérative ou un transformateur indépendant.

3. Structure et composition du grain de *T. intermedium*

3.1. Structure physique du grain

Les grains de Kernza® se caractérisent par des enveloppes successives, un germe de petite taille, un faible poids (PMG de 5 à 7 g vs 42 à 54 en blé tendre) expliqué par une taille limitée, longueur (5 à 6 mm proche du blé) et épaisseur (1 à 1.2 mm vs 2.5 mm pour le blé) (Figure 1). La structure physique du grain doté d'un fort ratio enveloppe / endosperme explique largement la composition chimique du grain.



Figure 1 : Représentation de grains de Kernza® a et b (Université du Minnesota) et blé (type hard red wheat) issue de Banjade *et al*. 2019

3.2. Composition chimique du grain

De 2019 à 2021, plusieurs échantillons ont été analysés afin de juger de la variabilité des résultats potentiellement expliquée par :

- la gestion agronomique de la parcelle (i.e. expérimentation SaintEx Innov – valorisation ou pas de l'irrigation) ;
- le traitement du grain (i.e. grains avec enveloppes ou nus) ;
- le matériel végétal (i.e. essai INRAE testant plusieurs variétés).

Tableau 1 : Composition chimique des grains de Kernza. MS : Matière sèche.

Echantillons	Traitement	TLI Cycle	Année	Teneur en eau (%)	Taux de protéines (% MS)	Taux de cendres (% MS)	Amidon Ewers Grain (% MS)
SaintEx Innov		**C3**	**2019**	13,1	**18,2**	2,7	**53,8**
Agriculteur		**C3**	**2019**	13,8	**16,1**	2,6	**54,1**
SaintEx Innov	**Non irrigué**	**C3**	**2020**	13,6	**17,2**	2,8	45,7
SaintEx Innov	**Irrigué**	**C3**	**2020**	13,0	**16,2**	3,2	45,0
SaintEx Innov	**Nus (décortiqué)**	**C3**	**2020**	14,5	**16,2**	2,6	**53,9**
SaintEx Innov	**Avec enveloppes**	**C3**	**2021**	11,6	9,9	**4,5**	29,5
SaintEx Innov	**Nus (décortiqué)**	**C3**	**2021**	12,0	**17,1**	2,8	**55,5**
INRAE		**C3**	**2021**	12,1	12,5	**5,7**	39,2
INRAE		**C5**	**2021**	12,1	11,6	**6,0**	35,0
INRAE		**MN1504**	**2021**	12,1	12,7	**5,7**	38,8
INRAE		**Seigle pérenne**	**2021**	13,3	11,7	1,9	**62,0**

Les programmes de sélection interviennent de façon indirecte sur la composition chimique du grain, ce qui peut générer une certaine variabilité dans les valeurs de composition mesurées et rapportées dans les différents travaux. Il en résulte par exemple, une diminution relative des taux de cendres et de protéines suite à l'augmentation de la taille du grain – et donc du rendement primaire (Bharathi *et al*., 2021). A l'inverse, les autres composantes chimiques évoluent assez peu. L'expérimentation menée sur le site de Crouël INRAE montre peu de différences entre les trois cultivars de *T. intermedium*. A l'inverse, la composition est bien différente de celle du seigle pérenne qui présente peu d'enveloppes externes.

Les résultats sont présentés dans le tableau 1. La teneur en protéines des grains obtenus sur les différents essais est variable (de 12 % à 18 % MS) selon la conduite agronomique, les conditions pédo-climatiques et le traitement de la graine post récolte (i.e. avec ou sans décorticage). Ces valeurs sont plus faibles que celles rapportées dans la littérature (de 14 % à 23 % MS) mais supérieures à celle du blé (10 % à 16 % MS g issu de OECD, 2023).

La teneur en amidon est également très variable, les valeurs s'étalant de 29,5 % à 55,5 %. Dans tous les cas, elle est faible en comparaison aux valeurs connues pour le blé tendre (69,5 % en moyenne 2018-2022, FranceAgriMer) mais tout à fait comparable aux valeurs identifiées dans la littérature (Kantar, 2016).

Ces faibles taux sont probablement en lien avec la très faible taille des grains illustrée par les poids de mille grains (PMG) situés entre 9 et 10 g soit 3 à 4 fois inférieurs au PMG moyen du blé tendre. Corollairement, le rapport albumen/enveloppe est probablement faible ce qui conduit d'une part à de faibles rendements en farine lors de la mouture et d'autre part, à des teneurs en cendres beaucoup plus élevées que pour le blé tendre. Sur les échantillons analysés, celles-ci sont en effet régulièrement proches de 3 % quand la teneur en cendres moyennes du blé tendre en France se situe à 1,6 % (enquêtes FranceAgriMer/ARVALIS).

Le taux de matières grasses compris entre 2,2 et 4,0 % est plus élevé que chez le blé où il est inférieur à 2,0 %. Enfin, la teneur en fibres est plus élevée (de 15 à 21 %) que celle du blé (11 à 18 %) du fait de la taille limitée du grain et de la part d'enveloppes plus importante ce qui confère à la culture un profil

nutritionnel supérieur (i.e. teneurs en protéines, fibres et cendres plus élevées, teneurs en acides aminés essentiels à l'exception de la lysine, en caroténoïdes et en antioxydants plus élevées) (Becker *et al*., 1991 ; Marti et el., 2015).

En bref

Le grain de *Thinopyrum intermedium* se caractérise par une teneur en amidon plus faible que celui d'un blé tendre mais un profil nutritionnel supérieur. Le grain présente une teneur en matières grasses et en fibres plus élevée, ce qui apporte des avantages nutritionnels.

4. Valeurs technologique et fonctionnelle des farines de Kernza® (*T. intermedium*)

Bien que la teneur moyenne en protéines soit élevée, toutes les protéines n'ont pas la capacité à produire un réseau viscoélastique, la quantité n'est donc pas synonyme de qualité. Le profil des protéines et les propriétés rhéologiques qui en découlent sont à investiguer. Les travaux antérieurs font état d'un réseau moins résistant que le blé tendre en raison d'un faible taux de gluténines de haut poids moléculaire et d'une teneur élevée en fibres qui limitent les capacités de panification (Rahardjo *et al*., 2018). Nous avons donc souhaité évaluer le profil protéique et ses fonctionnalités et le comportement rhéologique des échantillons testés dans CERPET.

4.1. Profil protéique et fonctionnalités associées

En France, le procédé de panification repose essentiellement sur les propriétés des protéines de réserve constituées de gluténines et de gliadines les rendant aptes à s'agréger en réseau (gluten) lorsqu'on les hydrate. Ce réseau a plusieurs fonctions, la principale étant de retenir les gaz produits par la fermentation des levures jusqu'à la cuisson pour permettre l'obtention d'un volume aéré. Même si les protéines conférant de l'extensibilité sont importantes, celles qui apportent de la résistance sont primordiales. Ce sont les plus gros agrégats, notamment les gluténines de haut poids moléculaire et parmi elles, les plus insolubles, qui sont responsables de ces propriétés. Aussi, si un grain est pauvre en protéines de réserve, ses capacités panaires seront limitées et son utilisation ne pourra s'envisager qu'en mélange avec un blé tendre au risque de perdre une partie des propriétés nutritionnelles de la céréale pérenne.

L'expérimentation menée a permis de comparer sur deux années (2020 et 2021) et sur un site (Saint Ex Innov) deux échantillons avec enveloppes vs. nus décortiqués, le blé tendre servant de référence. Le profil protéique observé en SE-HPLC (Morel, 2000) se caractérise par deux points majeurs de divergence avec le profil d'une farine de blé tendre (Tableau 2). La première tient à la concentration en gliadines, beaucoup plus élevée sur Kernza® que sur blé tendre, de l'ordre de 30 % supplémentaires au détriment des fractions les plus insolubles (donc la fraction F1 des gluténines de haut poids moléculaire). La fraction la plus insoluble (Fi) est 2 fois plus faible dans la farine de Kernza® que dans la farine de blé tendre. Ce constat est en accord avec les travaux de Rahardjo *et al*., (2018) et Zhang *et al*., (2014). Il devrait en résulter des pâtes aux propriétés très extensibles et beaucoup moins résistantes que celles fabriquées avec du blé tendre.

Tableau 2 : Profil protéique mesuré par chromatographie d'exclusion stérique SE-HPLC sur des échantillons de farine de Kernza issues de grains avec enveloppes ou décortiqués de différentes années de récolte comparés à une farine de blé tendre. F1 : Fraction à haut poids moléculaire de type glutéine, F2 : macromolécules de taille intermédiaire de type gluténine de plus faible poids moléculaire, F3 à Fi : fractions de taille plus réduite de type gliadines, albumines, globulines et oligopeptides, UPP : fraction des protéines polymérisées non extractibles.

Echantillons	Traitement	Année (TLI C3)	F1	F2	F3	F4	F5	Fi	UPP	F1/F2	(F3+F4)/Fi

SaintEx Innov	Avec Enveloppes	2020	3,48	16,19	20,55	31,17	19,48	9,13	0,32	0,21	14,88
SaintEx Innov	Nus (décortiqué)	2020	3,83	16,81	21,07	29,44	19,32	9,52	0,32	0,23	13,18
SaintEx Innov	Avec enveloppes	2021	3,67	15,63	20,04	29,09	25,40	6,18	0,24	0,23	13,39
SaintEx Innov	Nus (décortiqué)	2021	3,56	15,77	21,09	31,45	19,11	9,02	0,32	0,23	14,78
Arvalis Référence	Blé tendre		2,66	17,18	18,08	20,81	19,74	21,52	0,52	0,15	14,60

4.2. Propriétés rhéologiques

Les échantillons de farine ont été évalués à l'aide de l'alvéographe de Chopin sans succès, les pâtes générées n'étant pas « machinables », elles n'ont pas pu être extraites du pétrin. Compte tenu de ces résultats sur un échantillon de farine pure, il a été décidé d'étudier le seuil maximal d'incorporation acceptable avec 2 nouveaux lots de farine à disposition. Ces 2 farines sont issues du même lot de grains mais produites selon 2 diagrammes de mouture différents, l'un réalisé par ALMA PRO l'autre par ARVALIS.

Une caractérisation à l'alvéographe est ainsi réalisée sur une gamme d'échantillons avec des proportions croissantes de Kernza® dans un mélange avec une farine commerciale de blé tendre type panifiable.

L'incorporation de farine de Kernza® produit un effet dégradant sur la force boulangère du mélange dès le plus faible taux, avec une perte de 40 points environ par rapport à la farine de blé habituelle utilisée comme base. L'incorporation à un taux de 30 % conduit à une force boulangère très affaiblie autour de 100, la rendant probablement inapte à la panification.

La dégradation de la force boulangère est d'abord liée à une perte de résistance de la pâte avec la baisse de sa ténacité (P) et de son élasticité (Ie) tandis que les propriétés d'élongation (L) semblent conservées (Figure 2). Ce comportement est cohérent avec la distribution des protéines observée par SE-HPLC qui témoigne d'une faible proportion de gluténines de haut poids moléculaire.

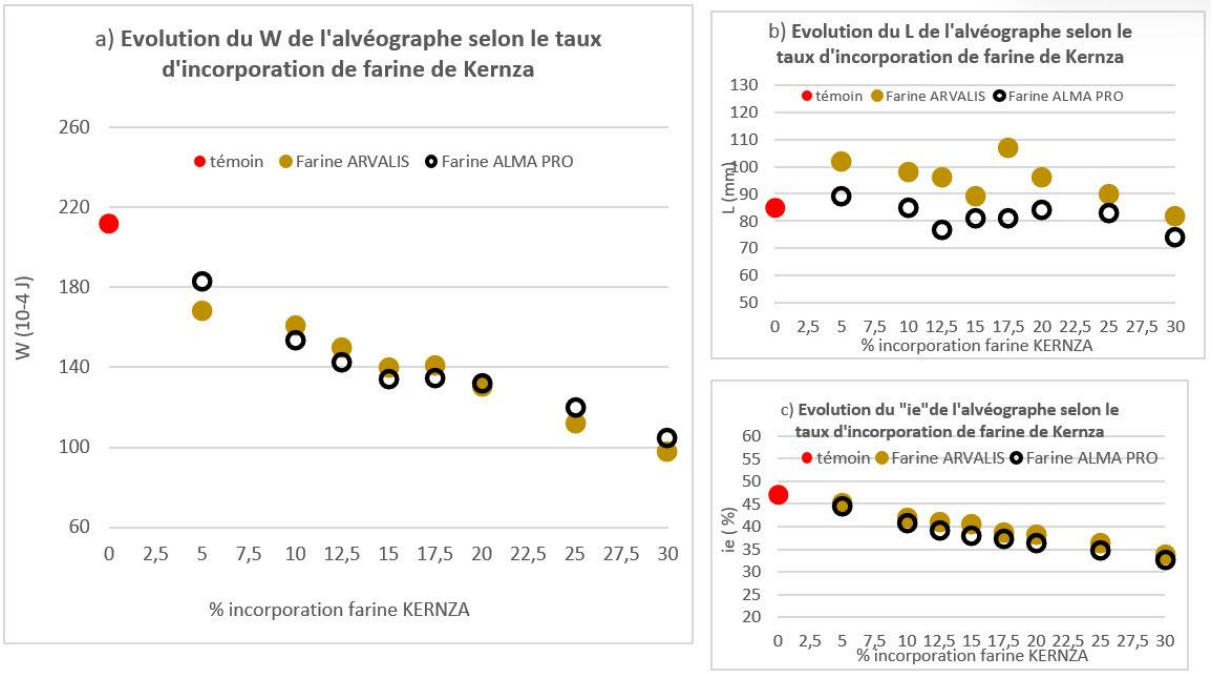


Figure 2 : Evolution des propriétés rhéologiques mesurée à l'alvéographe de Chopin selon le taux d'incorporation de Kernza® dans le mélange de farine ; paramètre force boulangère W (a), allongement L (b) et indice d'élasticité le (c).

4.3. Comportement à l'essai de panification

A partir des résultats observés à l'alvéographe, nous avons retenu 2 taux d'incorporation, 5 et 17,5 % afin d'évaluer le comportement des mélanges en panification (Figure 3). Deux mélanges avec une base commerciale de très bonne qualité ont été réalisés puis analysés à l'essai de panification selon la méthode Pain Courant Français.

La baisse de force boulangère constatée à l'alvéographe pour un taux d'incorporation de 5 % se retrouve en panification avec (i) une forte baisse de l'absorption d'eau (-3 points), (ii) une légère perte de volume (entre 5 et 250 cc selon farine), et (iii) une dégradation de la note de panification totale (entre 20 et 35 points selon la farine). Toutefois, la panification reste possible si les techniques s'adaptent pour compenser certains défauts (i.e. repos de la pâte plus important) (Barathi *et al*., 2022). À 17,5 % d'incorporation, la farine est trop fortement altérée pour donner un résultat acceptable en panification industrielle avec une pâte très collante, relâchante et des pains qui s'aplatissent à la mise au four.

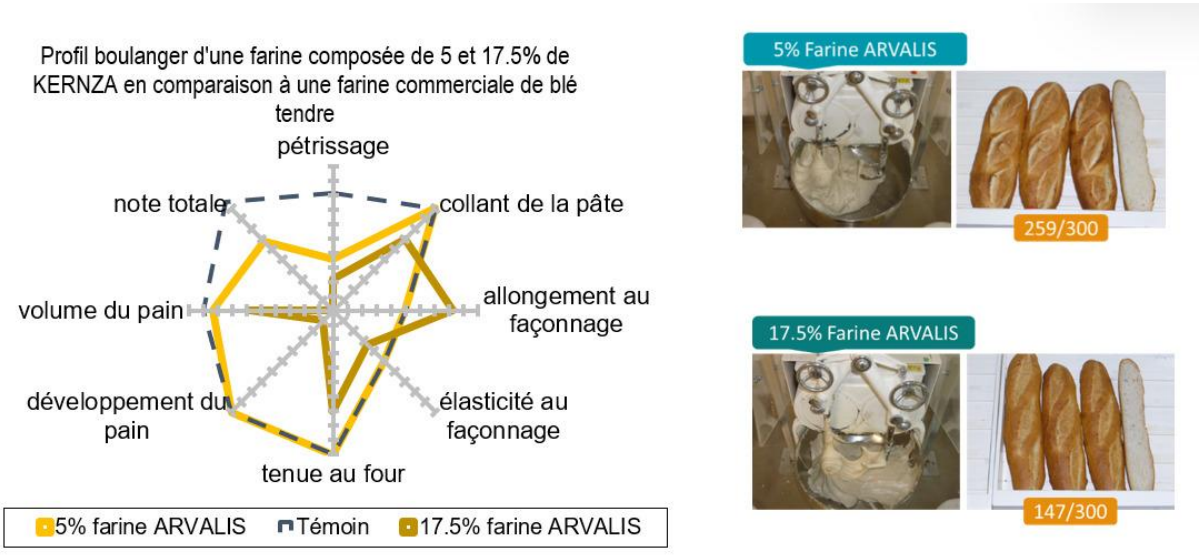


Figure 3 : Principales caractéristiques relevées à l'essai de panification type pain courant français de 2 farines hybrides à 2 niveaux de concentration en farine de Kernza® comparées à une farine de blé tendre commerciale de très bonne qualité.

En bref

Malgré de bonnes teneurs en protéines, le profil protéique déséquilibré ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants lors de la mise en place de techniques de panification traditionnelle. Le déséquilibre des fractions protéiques limite la levée de la pâte ce qui rend quasi impossible la panification de farine exclusive de *T. intermedium*. Les mélanges avec des farines de blé tendre de bonne qualité ne peuvent garantir de panification jugée satisfaisante par le boulanger uniquement si les process de panification sont adaptés. Les farines de *T. intermedium* pourraient convenir aux produits céréaliers qui ne nécessitent pas de propriétés de rétention de gaz (i.e. biscuits, crackers) ou de produits qui ne dépendent pas entièrement du réseau gluténique (i.e. pâtes).

5. Optimisation des process de transformation

5.1. Process de décorticage et de nettoyage des grains

5.1.1. Questions posées, matériels et méthodes

La qualité du nettoyage et du décorticage des grains intervient directement sur la qualité du produit fini mais aussi sur sa valeur économique. Par exemple, les travaux de Banjade *et al*. (2019) mettent en évidence l'effet du décorticage sur la composition chimique des grains soit une diminution de la teneur en fibres insolubles, une augmentation de l'extensibilité et du volume spécifique du pain. La présence de fibres dans les enveloppes, de lipides dans le germe et de caroténoïdes contribue à la valeur nutritionnelle de la graine. A l'inverse, la composition protéique (i.e. faible part de gluténines de haut poids moléculaire, moindre teneur en amidon limitant la visco-élasticité) intervient directement sur les propriétés structurelles et fonctionnelles de la pâte (cf. partie 4).

Par ailleurs, la valeur économique du produit fini (farine ou produit transformé) dépend des conditions de nettoyage, de décorticage et de mouture afin d'extraire la plus haute valeur économique (exprimée en quantité et en qualité) à partir des grains récoltés.

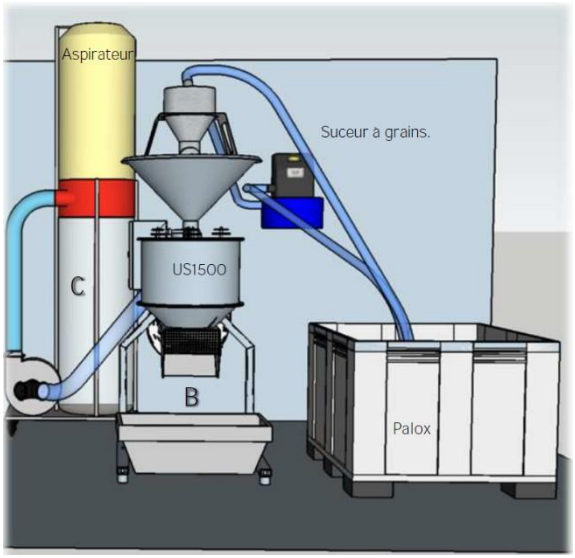
Les buts recherchés dans le traitement post-récolte sont de :

- limiter les contaminations potentielles par un nettoyage et triage des lots collectés ;
- garantir un produit fini de qualité technologique, nutritionnelle et gustative répondant aux exigences du transformateur (cf. partie 4) ;
- augmenter la valeur économique en optimisant les opérations de traitement post récolte.

Les travaux de recherche publiés[3] ont pour la plupart été menés en laboratoire. Le but est ici de mettre au point un pilote industriel utilisant de petits équipements industriels. Les 4 étapes de tests sont répertoriées ci-après (Figure 4) :

Etape 0 (optionnelle) : le grain est nettoyé dans le trieur M10 si le lot testé dispose de nombreux débris ou autres impuretés (fraction A).

Etape 1 : le grain est mis en palox. Il est transmis dans la décortiqueuse US1500 qui extrait deux fractions, B : grains décortiqués et non décortiqués et C : poussières et balles.



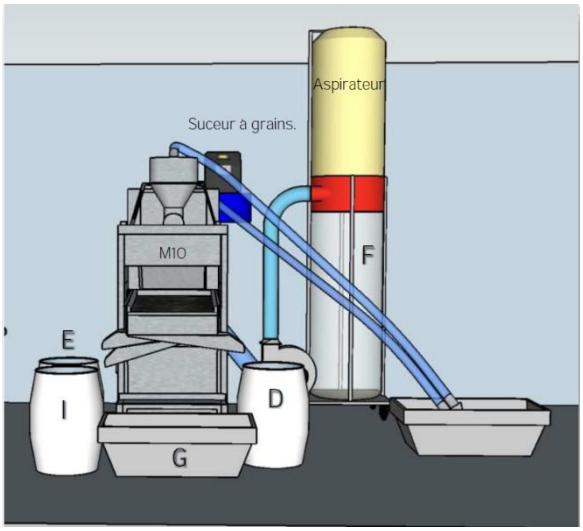
[3] Ces travaux sont principalement menés par l'Université du Minnesota dans le cadre de l'initiative Forever Green.

Etape 2 : un suceur à grain amène la fraction B dans la trémie du trieur M10.

Obtention des fractions :

- D : grosses graines + balles ;
- E : petites graines ;
- F : poussières et balles ;
- G : balles ;
- I : impuretés + poussières.

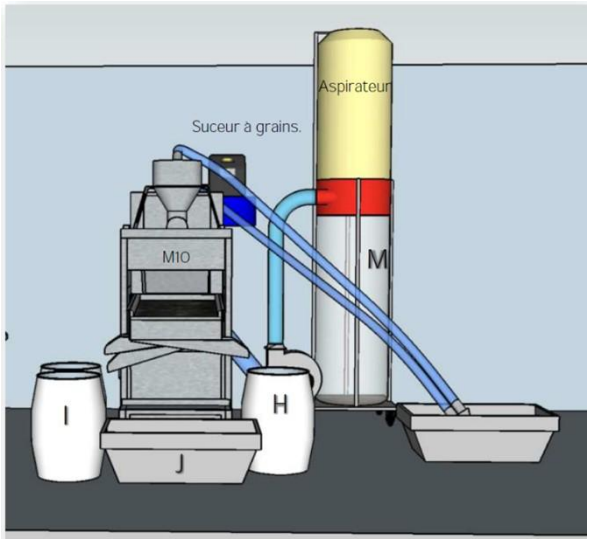
Le fonctionnement du trieur M10 a été amélioré pas à pas, avec la production de nouvelles grilles de tri pour calibrage (8 grilles différentes) et l'adaptation des sorties pour extraire des impuretés (fraction I) qui intervenaient significativement sur la qualité finale de la farine (sensation de sable).



Étape 3 : les fractions D+E repassent dans le trieur M10.

Obtention des fractions :

- H : grosses graines + balles résiduelles
- I : impuretés + poussières
- J : balles
- M : poussières et balles



Étape 4 : réalisation des tests farine sur Melia 30.

Passage des fractions H et E pour les tests farines.

Production de 4 fractions de farine par granulométrie soit < 180 µm, 180 µm << 224 µm, 224 µm << 350 µm et > 350 µm.

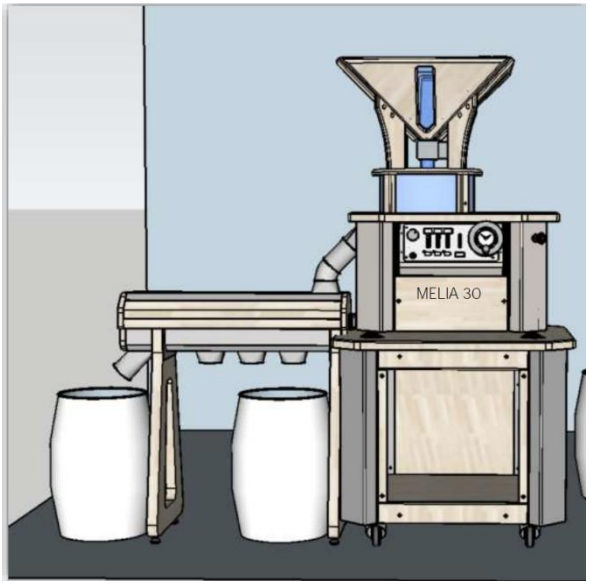


Figure 4 : Etapes de traitement post récolte du grain.

11 tests ont été réalisés à partir des échantillons collectés sur la pépinière de l'INRAE et sur une parcelle d'agriculteur. Les échantillons collectés en 2021 et 2022 sont caractérisés par :

- le mode de production soit 4 échantillons en Bio et 7 en Conventionnel ;
- le mode de conduite en culture pure K (Kernza seul) ou associé K+TV (Kernza + Trèfle violet) ;
- le type de cultivar issu du Land Institute Cycle 3 (TLI C3) ou de l'Université du Minnesota (MN1504).

Les résultats sont présentés dans le tableau 3 ci-après.

5.1.2. Les principaux résultats

Tableau 3. Part des différentes fractions grains et résidus (balles et impuretés) après décorticage et triages successifs.

MODE	TYPE	CYCLE	A	B	C	E	I	D	G	F	(D+E)/A
	K Kernza TV Trèfle violet		Poids initial (kg)	Grains décortiqués (kg)	Balles (kg)	Petits Grains nus (kg)	Impuretés (kg)	Gros Grains nus (kg)	Balles (kg)	Balles (kg)	% grains nus
BIO	K	TLI C3	12,5	9,85	2,58	1,12	0,16	7,43	0,87	0,18	**68 %**
BIO	K	TLI C3	19,4	14,96	4,39	0,91	0,2	12,5	0,76	0,44	**69 %**
CONV	K+TV	TLI C3	2,11	1,55	0,56	0,68	0,02	0,31	0,1	0,43	**47 %**
CONV	K+TV	TLI C3	2,27	1,86	0,41	0,81	0,023	0,47	0,12	0,42	**57 %**
CONV	K	MN1504	0,88	0,79	0,09	0,36	0,009	0,12	0,04	0,24	**56 %**
CONV	K	MN1504	0,9	0,68	0,22	0,31	0,01	0,12	0,05	0,19	**48 %**
CONV	K+TV	MN1504	2,27	2,23	0,04	0,90	0,036	0,77	0,5	0,01	**74 %**
CONV	K+TV	MN1504	1,41	1,13	0,28	0,48	0,035	0,33	0,12	0,15	**58 %**
CONV	K	TLI C3	3,97	3,38	0,59	1,17	0,148	1,43	0,47	0,15	**66 %**
BIO	K+TV	TLI C3	3,96	3,47	0,49	1,29	0,047	1,49	0,44	0,19	**70 %**
BIO	K	TLI C3	7,17	5,83	1,34	1,70	0,07	2,35	1,05	0,65	**57 %**

Les tests mettent en évidence (Tableau 3) :

- une forte variabilité des lots induite par les conditions de récolte et de production (i.e. salissement de la parcelle) ;
- des ratios de triage et décorticage en moyenne de 60 % - de 47 à 74 %, plus élevés que les références obtenues aux Etats-Unis (de 30 à 50 % selon le rapport AURI, Université du Minnesota, 2022) ;
- une opération de tri et de décorticage qui, pour augmenter le taux d'extraction, nécessite des temps de travaux conséquents soit un rendement moyen de 190 kg/heure pour le décorticage et de 50 kg/heure pour le triage.

En bref

L'enjeu du nettoyage et la qualité du résultat qui en découle sont fortement liés à la gestion sanitaire de la parcelle (contrôle des adventices) mais aussi aux conditions de récolte (part de débris et impuretés collectés). Les conditions de récolte interviennent directement sur les risques de contamination du grain (humidité, impuretés), elles sont déterminantes pour la qualité du produit fini.

Le choix des équipements post-récolte permet d'optimiser le process de décorticage et de nettoyage. L'augmentation du taux d'extraction permise par l'adaptation des outils permet d'améliorer la valeur économique du produit, qui, sortie-parcelle, reste faible suite à des rendements à l'hectare limités.

La qualité du produit à la récolte doit conduire le gestionnaire à choisir le produit final (bière, produits panaire, pâtes) dont les exigences sont variables.

5.2. Process de mouture

5.2.1. Questions posées, matériels et méthodes

La composition spécifique des grains de *T. intermedium* (i.e. teneur en amidon, en matière grasses, en fibres) (cf. partie 3) est-elle compatible avec l'utilisation d'outils de meunerie traditionnellement utilisés en panification ? Pour répondre à cette question, des tests de la mise en mouture de lots de grains triés et décortiqués en utilisant des équipements industriels utilisés en minoterie traditionnelle ont été effectués. Le tamisage du moulin MELIA permet le fractionnement des farines pour obtenir différentes granulométries, et maintenir une présence variée de sels minéraux (enveloppe de la céréale) dans la farine. En fonction du besoin et de la recette choisie, il y a aura la possibilité d'avoir une farine plus ou moins typée. L'outil a été légèrement adapté au cours du test afin de faciliter l'écrasement des grains (cf. 5.2.2).

5.2.2. Les principaux résultats

La production de farines à partir des grains décortiqués (fractions D+E) de Kernza conduit aux résultats suivants (Tableau 4).

Le test 1 effectué à partir d'un lot de 11,2 kg (mars 2023) combine les fractions D et E (cf. 5.1.2). Le débit a été limité suite au colmatage lors de l'écrasement des grains (du fait du taux de lipides élevé de la graine de Kernza®). Le moulin a alors été adapté (ALMA PRO a développé un caisson d'aspiration permettant la dissipation thermique des meules, liée à l'écrasement de la graine entre ces dernières) afin de faciliter le process pour éviter tout colmatage. Les tests 2 à 4 ont été effectués en mai 2023 sur les fractions E de petites graines nues (échantillon 2) et D de grosses graines (échantillons 3 et 4). Le taux d'extraction est meilleur sur les fractions D de l'ordre de 50 %. Ce taux est plus faible sur les fractions E (36 %). Toutefois, la faible quantité testée limite la pertinence du test. En conclusion, le taux d'extraction sur Kernza® (de l'ordre de 50 % au max) est moindre que celui du blé tendre. Il est à noter qu'à l'instar de céréales riches en matières grasses, ou pour des légumineuses, il faudrait descendre le taux d'humidité du Kernza® avant mouture à environ 10 %.

Tableau 4 : Résultats des différentes fractions de farine issues de tests d'écrasement et de tamisage sur Moulin Mélia (tests numérotés de 1 à 4) – caractéristiques de la farine (Température et g)

Tests farine	1		2		3		4	
Température (°C)	16°C		18,9°C		21°C		21,9°C	
Hygrométrie (%)	52 %		56 %		53 %		51 %	
Débit (KG/H)	6,4		12,6		9,9		10,3	
Fractions	kg	Taux	kg	Taux	kg	Taux	kg	Taux
<180 µm	3,76	33,6 %	0,63	31,3 %	3,15	42,5 %	3,59	42,2 %
180 µm << 224 µm	0,51	4,6 %	0,05	2,5 %	0,28	3,8 %	0,3	3,5 %
224 µm << 350 µm	0,25	2,2 %	0,05	2,5 %	0,2	2,7 %	0,24	2,8 %
> 350 µm	6,34	*56,7 %*	1,04	*51,7 %*	3,46	*46,6 %*	4	*47,1 %*
taux d'extraction < 350 µm	4,52	**40,4 %**	0,73	**36,3 %**	3,63	**48,9 %**	4,13	**48,6 %**
Pierres	0,06	0,5 %	0,09	4,5 %	0,03	0,4 %	0,04	0,5 %
Tamis	0,27	2,4 %	0,14	7,0 %	0,17	2,3 %	0,3	3,5 %

Des tests complémentaires de mouture ont été effectués par ARVALIS sur un moulin de laboratoire MCKA Bülher équipé de trois passages de broyage (cylindres cannelés), trois passages de convertissage (cylindres lisses) et 11 tamis (taille d'ouverture de 630 à 160 µm) permettant l'obtention

de farine d'essai. La mouture est complétée par le brossage des sons sur une brosse à sons MLUB Bühler (tamis 125 µm), la farine de brosse est incorporée à la farine issue de la mouture de laboratoire. Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le blé tendre. Les farines issues de lots décortiqués ont des teneurs en cendres peu éloignées de farines de blé tendre de type T65 à T80 classiquement fabriquées. Le mélange de farine de blé et de Kernza®, testé précédemment (Crain, E.B., DeHaan, L.R. 2024), conduit à des caractéristiques intéressantes tant en matière de valeur nutritionnelle (par ex. teneur en caroténoïdes et autres anti-oxydants) qu'en aspect visuel (présence de pigment jaune) et gustatif (goût de noisette).

En bref

Pour la première transformation en vue d'un usage en alimentation humaine, les réglages et diagramme usuels appliqués sur blé tendre semblent compatibles pour travailler les lots en mouture. Toutefois, la transformation des grains ne peut s'envisager qu'après une opération préalable de décorticage. Celle-ci permet une augmentation du débit de passage à la mouture et un gain de rendement meunier, donc un gain global au plan énergétique.

En contrepartie, la valeur utile de la matière première diminue à chaque étape, avec une première perte au décorticage de l'ordre de 40 % suivie d'une seconde perte lors de la mouture de l'ordre de 50 %. Autrement dit pour 100 kg de graines mises en œuvre, on produit 25 à 30 kg de farine.

S'agissant des caractéristiques des farines ainsi produites, les teneurs en cendres sont peu éloignées de farines de blé tendre de type T65 à T80. En revanche ces travaux confirment les faibles proportions en gluténines de haut poids moléculaire et en particulier celles constituant les agrégats les plus insolubles au profit des gliadines. Il en résulte une fonctionnalité très altérée par rapport à du blé tendre avec pour conséquence une faible aptitude à la panification quand la proportion de Kernza® augmente au-delà de 10 % dans le cas de farine multi-graines. S'il semble peu envisageable d'utiliser le Kernza® en process industriels ou fortement mécanisés, l'utilisation de levain plutôt que de levure, la réduction de la quantité d'eau ajoutée à la farine et l'application de long temps de fermentation pourraient constituer des adaptations envisageables en boulangerie artisanale pour une incorporation plus importante de Kernza® dans la maquette. La valorisation du Kernza par d'autres produits à exigences fonctionnelles moindres (par ex. bière et pâtes) reste intéressante.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Christophe DAVID 0000-0003-3998-2040

Contributions des auteurs

Conceptualisation : Christophe David et Benoit Méléard, Essais : Sonia Geoffroy et Laurent Chippaux, Analyse : Christophe David et Benoit Méléard, Ecriture : Christophe David et Benoit Méléard, Correction : tous les auteurs.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme CERPET réunissant ARVALIS - Institut du Végétal, ISARA, INRAE et Secobra grâce au soutien des crédits CASDAR (2019-2024). Il s'appuie aussi sur l'initiative DEVILCERPER coordonnée par l'ISARA avec la contribution de la Compagnie Nationale du Rhône à travers ses missions d'intérêt général.

Remerciements

Nous tenons à remercier les agriculteurs du réseau Kernza, l'équipe Alma Pro ainsi que l'ensemble des collègues INRAE Crouel, Arvalis, station de Saint Exupéry et Villiers le Bacle et ISARA ayant participé à la collecte de données de terrain.

Références bibliographiques

Banjade, J. D., Gajadeera, C., Tyl, C. E., Ismail, B. P., Schoenfuss, T. C. (2019). Evaluation of dough conditioners and bran refinement on functional properties of intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*. *Journal of Cereal Science,* 86, 26–32. https://doi.org/10.1016/j. jcs.2019.01.001

Barathi, R., Muljadi, T., Tyl, C., Annor, G.A. (2022) Progress on breeding and food processing efforts to improve chemical composition and functionality of intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) for the food industry. *Cereal Chemistry*, 99 :235-252

Becker, R., Wagoner, P., Hanners, G. D., Saunders, R. M. (1991). Compositional, nutritional and functional evaluation of intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*). *Journal of Food Processing and Preservation,* 15, 63– 77.

Clement, C., Sleiderink, J., Svane, S. F., Smith, A. G., Diamantopoulos, E., Desbroll, D. B., and Thorup-Kristensen, K. (2022). Comparing the deep root growth and water uptake of intermediate wheatgrass (kernzaR) to alfalfa. *Plant and Soil*, 472 :369–390.

Crain, E.B., DeHaan, L.R. (2024) Nutritional quality of Early-Generation Kernza perennial grain. *Agriculture*, 14, 919.

Crews, T. E., Blesh, J., Culman, S.W., Hayes, R. C., Jensen, E. S., Mack,M. C., Peoples, M. B., and Schipanski, M. E. (2016). Going where no grains have gone before: From early to mid-succession. *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 223 :223–238.

DeHaan, L., Christians, M., Crain, J., and Poland, J. (2018). Development and evolution of an intermediate wheatgrass domestication program. *Sustainability,*10 :1499.

DeHaan, L. R., Anderson, J. A., Bajgain, P., Basche, A., Cattani, D. J., Crain, J., Crews, T. E., David, C., Duchene, O., Gutknecht, J., Hayes, R. C., Hu, F., Jungers, J. M., Knudsen, S., Kong, W., Larson, S., Lundquist, P.-O., Luo, G., Miller, A. J., Nabukalu, P., Newell, M. T., Olsson, L., Palmgren, M., Paterson, A. H., Picasso, V. D., Poland, J. A., Sacks, E. J., Wang, S., Westerbergh, A. (2023). Discussion: Prioritize perennial grain development for sustainable food production and environmental benefits. *Science of The Total Environment,* 895 :164975.

de Oliveira, G., Brunsell, N. A., Crews, T. E., DeHaan, L. R., Vico, G. (2020). Carbon and water relations in perennial kernza (*Thinopyrum intermedium*) : An overview. *Plant Science,* 295 :110279.

de Oliveira, G., Brunsell, N. A., Sutherlin, C. E., Crews, T. E., DeHaan, L. R. (2018). Energy, water and carbon exchange over a perennial kernza wheatgrass crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249 :120–137.

Jungers, J., DeHaan, L., Mulla, D., Sheaffer, C., Wyse, D. (2019). Reduced nitrate leaching in a perennial grain crop compared to maize in the upper midwest, usa. *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 272 :63–73.

Kantar, M. B., Tyl, C. E., Dorn, K. M., Zhang, X., Jungers, J. M., Kaser, J. M., Schendel, R. R., Eckberg, J. O., Runck, B. C., Bunzel, M., Jordan, N. R., Stupar, R. M., Marks, M. D., Anderson, J. A., Johnson, G. A., Sheaffer, C. C., Schoenfuss, T. C., Ismail, B., Heimpel, G. E., Wyse, D. L. (2016). Perennial grain and oilseed crops. *Annual Review of Plant Biology,* 67, 703– 729.

Larkin, P.J., Newell, M.T., Hayes, R.C., Aktar, J., Norton, M.R., Moroni, S.J., Wade, L.J.B, (2014). Progress in developing perennial wheats for grain and grazing. *Crop and Pasture Science*, 65 :1147–1164.

Marti, A., Qiu, X., Schoenfuss, TC., Seetharaman, K., 2015. Characteristics of perennial wheatgrass (Th. Intermedium) and refined wheat flour blends: impact on rheological properties. *Cereal Chem*, 92(5) :434-440.

Morel, M-H., Dehlon, P., Autran, J.C., Leygue, J.P., Bar-L'Helgouac'h, C. 2000. Effects of Temperature, Sonication Time, and Power Settings on Size Distribution and Extractability of Total Wheat Flour Proteins as Determined by Size-Exclusion High-Performance Liquid Chromatography. *Cereal Chem*, 77: 685-691.

Murphy K.M., Hoagland L.A., Reeves P.G., Baik B-K., Jones S.S., 2009. Nutritional and quality characteristics expressed in 31 perennial wheat breeding lines. *Renewable Agriculture and Food Systems*: 24(4); 285-292.

Rahardjo, C. P., Gajadeera, C. S., Simsek, S., Annor, G., Schoenfuss, T. C., Marti, A., Ismail, B. P. (2018). Chemical characterization, functionality, and baking quality of intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*). *Journal of Cereal Science*, 83, 266– 274.

Ryan, M., Crews, T., Culman, S., Dehaan, L., Hayes, R., Jungers, J., and Bakker, M. (2018). Managing for multifunctionality in perennial grain crops. *Forum BioScience*, 68 :294–304.

Sprunger, C. D., Culman, S. W., Peralta, A., DuPont, S. T., Lennon, J., Snapp, S. S. (2019). Perennial grain crop roots and nitrogen management shape soil food webs and soil carbon dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 137 :107573.

Wagoner, P. (1990). Perennial grain development: Past efforts and potential for the future. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 9 :381–408.

Zhang, X., DeHaan, L. R., Higgins, L. A., Markowski, T. W., Wyse, D.L., & Anderson, J. A. (2014). New insights into high- molecular weight glutenin subunits and sub- genomes of the perennial crop *Thinopyrum intermedium* (*Triticeae*). *Journal of Cereal Science*, 59, 203– 210.

Documents techniques

AURI Agricultural Utilization Research Institute University of Minnesota, (2022) Using perennial grain crops in wellhead protection areas to protect groundwater: determining optimal end-uses for IWG. 63 pages

Pour citer cet article : Christophe David, Benoit Meleard, Sonia Geoffroy, Laurent Chippaux. CERPET : Des valeurs nutritionnelles et technologiques d'intérêt pour une valorisation du Kernza (Thinopyrum intermedium) en alimentation humaine. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.13-28. 10.17180/ciag-2025-vol107-art02

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Evaluation de la croissance et du développement de l'agropyre intermédiaire en conditions françaises – une production en retrait par rapport aux espèces de référence

Jean-Charles DESWARTE[1], Alexandra DUTAY[1], Antoine MAINEMARE[1], Fanny RINGUET[1]

[1] ARVALIS – Institut du végétal, Station expérimentale, Route de Chateaufort, ZA des graviers, 91190 VILLIERS-LE-BACLE, France

Correspondance : jc.deswarte@arvalis.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art03

Résumé

L'agropyre intermédiaire (*Thinopyrum intermedium*) est une graminée pérenne proche du blé. Deux expérimentations ont été menées pour comparer l'agropyre au blé tendre et à la fétuque, en modulant les apports d'eau ou l'azote. Les résultats obtenus corroborent les publications existantes : la variété d'agropyre intermédiaire étudiée (Kernza) s'est révélée tardive, peu productive en biomasse (-15 à -80 % par rapport au blé). La production de grains est affectée par les faibles poids moyens des grains (entre 5 et 8 mg), et la forte variabilité des densités d'épis fertiles et le nombre de grains portés. La concurrence des adventices, la présence fréquente de verse et la difficulté à nettoyer les grains génèrent des pertes qui pourraient être réduites par une conduite et une récolte adaptée. L'enracinement de l'agropyre est similaire aux deux autres espèces en première année, mais s'accroit au fil des cycles.

Mots-clés : *Thinopyrum intermedium*, Kernza, croissance, phénologie, allocation, enracinement, blé tendre, fétuque élevée

Abstract: Evaluation of the growth and development of intermediate wheatgrass under French conditions - experimental comparison with reference species

Intermediate wheatgrass (Thinopyrum intermedium) is a perennial grass closely related to wheat. Two experiments were carried out to compare wheatgrass with bread wheat and fescue, by modulating water or nitrogen inputs. The results corroborate existing publications: the intermediate wheatgrass variety studied (Kernza) proved to be late, with low biomass productivity (-15 to -80% compared to wheat). Grain production was affected by low average grain weights (between 5 and 8 mg), and high variability in fertile spike density and number of grains borne. Competition from weeds, frequent lodging and difficulty in cleaning the kernels generate losses that could be reduced by appropriate management and harvesting. Wheatgrass rooting is similar to that of the other two species in the first year, but progresses during the following cycles.

Keywords: *Thinopyrum intermedium*, Kernza, growth, phenology, allocation, rooting, soft wheat, fescue

1. Introduction

L'intensification des systèmes de grande culture a permis une forte augmentation des rendements, répondant ainsi à l'augmentation des besoins alimentaires mondiaux. Elle a, à l'inverse, induit différents impacts environnementaux préjudiciables (ex. transfert de nutriments en excès dans les eaux et l'air). Elle s'est également accompagnée d'une spécialisation des exploitations agricoles sur quelques espèces sélectionnées sur leur productivité, sans pour cela contribuer au maintien de l'ensemble des services écosystémiques permettant de réguler les recours aux ressources naturelles et aux intrants de

synthèse (Kremen and Miles, 2012). Compte-tenu de la hausse de la population mondiale et de ses besoins alimentaires, auxquels il faudrait ajouter les besoins de production biosourcée, il est nécessaire d'accroitre la production agricole mondiale. Cependant, les rendements sont déjà en stagnation dans différents pays et pour un ensemble de cultures. Les causes de cette stagnation sont multiples : évolution climatique, moindre usage d'intrants, modification des rotations, altération des sols (Brisson *et al*., 2010 ; Petersen *et al*., 2010 ; Lin and Huybers, 2012 ; Ray *et al*., 2019).

Le développement de nouveaux modes de production associant productivité suffisante et processus écologiques et biologiques est nécessaire pour réduire la dépendance des systèmes de culture aux intrants exogènes et leur sensibilité aux aléas et diminuer l'impact de l'agriculture sur son environnement et améliorer la fourniture de services écosystémiques associés (Wezel *et al*., 2014 ; Casagrande *et al*., 2017). Le recours à des espèces de céréales pérennes (productives sans re-semis plusieurs années consécutives) est une piste à explorer afin de diversifier les systèmes de culture et d'éviter une forte utilisation des intrants de synthèse. La pérennité du couvert doit permettre la mise en place d'un système racinaire développé et durable, apte à une utilisation plus efficace des ressources hydriques et minérales du sol (Pimentel *et al*., 2012 ; Culman *et al*., 2013 ; Jungers *et al*., 2019), et donc conduire à une moindre dépendance vis-à-vis des intrants. Cette pérennité pourrait également se traduire par une intensification des interactions sol-plante (Culman *et al*., 2010).

L'agropyre intermédiaire (*Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey) est une graminée en C3, pérenne, originaire d'Eurasie et domestiquée par des agronomes américains pour limiter l'érosion et maintenir une ressource fourragère au sein des milieux secs et peu fertiles. Elle présente une croissance végétative cespiteuse préférentielle, avec émission limitée de rhizomes. Elle est essentiellement auto-incompatible *et al*logame. Elle produit un nombre variable de grains de petite taille (<5 mg) au sein d'épis allongés portés par des tiges de 1 m à 1,8 m de haut. Ces grains présentent un fort ratio enveloppe-endosperme, conduisant à une forte teneur en protéines et en minéraux. Les glutéines de haut poids moléculaire sont déficientes, ce qui limite la formation d'un réseau de gluten. De précédentes études tant américaines qu'européennes ont documenté la croissance, le développement et la productivité de cette espèce, et en particulier une variété commerciale sélectionnée par le Land Institute : le Kernza. Le projet CERPET (Casdar 2019) s'est intéressé à la place potentielle du Kernza dans des exploitations agricoles françaises : niveau de productivité comparée à des espèces de références, freins agronomiques à sa mise en culture, freins technologiques à sa valorisation. Des essais agronomiques ont permis de fournir de nouvelles références sur la physiologie et la croissance de l'agropyre (présentées dans cet article), alors que des suivis de parcelles en exploitations agricoles ont permis d'étudier l'adaptation du Kernza à une grande diversité culturale et pédologique (non publié). Enfin, une évaluation technologique (tests de panification) a été réalisée sur des lots de grains récoltés lors du projet (article de David *et al*., 2025 dans ce numéro). L'objectif de ce travail était de consolider les connaissances disponibles sur l'agropyre intermédiaire, dans des contextes représentatifs de la France : productivité en grain et en fourrage, réponse aux intrants (eau, azote), intégration dans les rotations (date de semis, conduite) et aptitude à la transformation et à la panification.

2. Matériels et méthodes

Deux dispositifs expérimentaux ont été mis en place pour étudier la réponse de *Thinopyrium intermedium* aux conditions de croissance, en comparaison à une (blé tendre) ou deux (blé tendre et fétuque) espèce(s) de référence, respectivement à Pusignan (PUS) (69), de 2018 à 2022, et à Villiers-le-Bâcle (VLB) (91), de 2020 à 2024.

Les dispositifs expérimentaux étaient non randomisés pour des raisons de conduite des cultures. Les microparcelles d'étude (2 m de large sur 10 m de long) ont été répliquées autant de fois que nécessaire pour garantir 3 à 4 répétitions statistiques, et éviter de réintervenir dans une même microparcelle au cours d'une année ainsi que la suivante pour éviter des arrières-effets sur la croissance de la culture.

2.1. Modalités expérimentées et conditions de croissance

L'essai de Pusignan (PUS) a été implanté sur un sol limono-sableux caillouteux sur alluvions anciennes, drainant et relativement séchant. Une modalité « Irriguée » a été comparée à une modalité « Pluviale » pour les deux espèces comparées : *Thinopyrum intermedium* (variété Kernza) et *Triticum aestivum* (variété Rubisko), cette seconde espèce n'étant pas systématiquement cultivée à proximité immédiate de la première pour des raisons de rotation des cultures. Le déclenchement de l'irrigation a été adossé aux règles Irrinov® pour le blé ; les mêmes seuils de tension en eau du sol ont été utilisés pour déclencher les apports d'eau sur l'agropyre intermédiaire. L'essai a été initié en septembre 2018 (semis de l'agropyre le 18/09/2018, derrière un précédent Tournesol ; semis du blé tendre au cours de la dernière décade d'octobre 2018 à 2021, précédents variables : colza ou tournesol) et a été conduit sur 4 campagnes culturales (récoltes 2019 à 2022).

L'essai de Villiers-le-Bâcle (VLB) a été conduit sur une parcelle de limons profonds hydromorphes sur argile, à forte réserve en eau et présentant des excès d'eau temporaires malgré la présence d'un système de drainage. Trois espèces ont été comparées au sein d'un dispositif compact non randomisé : *Thinopyrum intermedium* (variété Kernza), *Festuca arundinacea* (variété Tower) et *Triticum aestivum* (variété Rubisko) ont été cultivées en bandes, côte à côte, derrière un précédent de trèfle violet. Le blé tendre a été semé alternativement sur 2 bandes, en rotation biennale avec du colza, afin de disposer chaque année de la comparaison entre les 3 espèces. Elles ont été fertilisées selon 2 niveaux d'apports azotés : absence d'apport (sur les 4 années), et fertilisation selon une dose pivot ajustée à la culture et aux reliquats azotés constatés en sortie d'hiver (dose X calculée par la méthode du bilan pour le blé tendre - 160 à 200 unités -, répartie en 3-4 apports entre fin tallage et fin montaison ; 50 % de la dose d'azote X définie sur blé apportée à la fétuque et l'agropyre, répartie en 3 apports : début et milieu de montaison, et début d'automne). L'agropyre et la fétuque ont été implantées le 03/09/2020, et le blé tendre était semé au cours de la 2nde décade d'octobre, pour 4 campagnes de suivi (récoltes 2020 à 2024).

La fétuque était exploitée par une fauche et une exportation 2 à 3 fois dans l'année (mai, août et éventuellement octobre-novembre), alors que l'agropyre et le blé étaient conduits pour produire des grains (récolte en juillet-août) et éventuellement un regain en octobre-novembre (agropyre).

2.2. Protocole de suivi des cultures

Le protocole de suivi s'est focalisé sur la dynamique de croissance des parties aériennes (phénologie, suivi de la couverture du sol et de la biomasse) et racinaires (profils d'enracinement à différentes dates). Les composantes de rendement (densité d'épis, poids moyen des grains et rendement grain) de l'agropyre et du blé ont été déterminées lorsque les conditions de récolte le permettaient. Les biomasses ont été mesurées au minimum à 4 stades phénologiques par campagne : Z25, Z30, Z37, Z65 et Z89 pour le blé selon l'échelle de Zadoks (Zadoks *et al*., 1974), Z37, Z65, Z89 et Z25 (regain fin novembre après fauche/récolte estivale, uniquement pour les campagnes N1 à N3) pour la fétuque et l'agropyre.

Les deux niveaux de conduite (pluvial vs irrigué à PUS, non fertilisé vs fertilisé à VLB) d'une même espèce ont été observés/mesurés simultanément ; les différences de phénologie entre espèces ont par contre pu conduire à des observations/mesures asynchrones.

Les placettes d'observation étaient constituées de 2 rangs adjacents sur 1 m de long lorsque les rangs étaient discernables (blé tendre ; agropyre et fétuque en début d'expérimentation) ou de quadrats (0,25 m²), répétés 3 fois dans chaque parcelle.

Les mesures de biomasse « parties aériennes » ont été réalisées en coupant les plantes à ras du sol, et les teneurs en azote ont été dosées par la méthode Dumas. Les profils d'enracinement ont été décrits à l'aide d'une grille (1 m de large, carreaux 2*2 cm) posée perpendiculairement aux rangs ; la présence

de racine dans chaque case de la grille a été notée de manière binaire (0 : absence de racine ; 1 : présence de racine(s)), jusqu'aux profondeurs respectives de 130 cm à VLB et 180 cm à PUS. La cinétique de progression des racines a été captée par une réalisation de 2 (blé tendre) ou 3 (agropyre, fétuque) profils successifs en cours de première année (février, mai et juillet). L'évolution d'interannuelle pour l'agropyre a été suivie par la poursuite des observations lors des campagnes suivantes, à maturité. Les données sont exprimées pour fournir un taux de colonisation de mailles explorées par les racines par horizon, regroupées par tranches de 10 cm de profondeur de sol. La profondeur maximale d'enracinement efficace est retenue comme la profondeur maximale observée où le taux de colonisation atteint ou dépasse 20 % (soit en moyenne une racine tous les 10 cm). En l'absence de différences notables entre modalités environnementales intra-sites (Pluvial/Irrigué, Témoin 0N/dose Pivot), les données des 2 profils sont moyennées.

Le développement foliaire (variable fiPAR) a été mesuré à l'aide de l'outil de phénotypage LITERAL au cours d'acquisitions réalisées courant montaison et à floraison des couverts.

2.3. Analyse et expression des résultats

Les données ont été traduites à l'échelle du traitement (moyenne et écart-type entre répétitions statistiques).

Pour valoriser et interpréter les données climatiques interannuelles et les cinétiques de croissance aérienne, un modèle de culture simplifié a été utilisé : SIMPLE (Zhao *et al*., 2019). Celui-ci n'intègre pas de stress azoté ; cependant, après mise en œuvre distincte sur modalités fertilisées et non fertilisées (modérément carencées), il a été décidé d'intégrer l'ensemble des données. Après optimisation empirique des paramètres sur la base des observations (biomasse, fiPAR), des descripteurs de la phénologie et de croissance ont été obtenus et comparés entre espèces pour la phase de croissance printanière.

3. Résultats

3.1. Conditions de croissance et de conduite des essais

Les conditions climatiques rencontrées pendant le cycle d'expérimentation ont été contrastées entre lieux et entre années. Elles sont résumées dans le tableau 1, en comparaison avec les normales climatiques de la station météorologique locale.

Tableau 1 : Synthèse des conditions pédo-climatiques observées au cours des 4 campagnes d'expérimentation, exprimées en écart aux normales saisonnières. PUS : Pusignan, VLB : Villiers-le-Bâcle.

	N1	N2	N3	N4
PUS	2018-2019 : Conditions globalement sèches	2019-2020 : Manque de pluie Hiver/Printemps Douceur hivernale marquée	2020-2021 : Campagne humide (+ 40 % de pluie sur Hiver/Printemps/Eté)	2021-2022 : Sécheresse printanière
VLB	2020-2021 : Humidité Hiver & Eté, fraicheur Printemps & Eté	2021-2022 : Année globalement sèche, surtout printemps et été. Douceur hivernale.	2022-2023 : Automne/hiver sains. Températures moyennes.	2023-2024 : Excès d'eau durable. Hiver très doux.

Les conditions hydriques se sont donc avérées très variables : très sèches en 2020 (PUS) et 2022 (PUS, VLB), et à l'inverse parfois très humides : année 2024 (VLB). Les conditions thermiques ont été

le plus souvent supérieures aux températures moyennes de saison, avec notamment des hivers très peu rigoureux (Tmin les plus basses rencontrées respectivement de -5,4 et -7,3°C pour PUS et VLB) et à l'inverse des vagues de chaleur ponctuelles (2019, 2022) conduisant à des Tmax très élevées (+39,4 et +38,8°C pour PUS et VLB respectivement).

La problématique culturale majeure des expérimentations a été la gestion des adventices, en particulier les graminées annuelles (ray-grass, vulpin, paturin, agrostis). L'absence de solution de désherbage chimique pour ces adventices a contraint à procéder à des interventions manuelles courant tallage et montaison au cours des 2 premières années, sans toutefois réussir à totalement limiter la concurrence.

3.2. Phénologie : tardiveté de l'agropyre par rapport au blé

La phénologie comparée des espèces étudiées a été monitorée à la levée de l'agropyre (année 1), ainsi que chaque année pour les stades Epi 1 cm (Z30), mi-épiaison (Z55) et mi-floraison (Z65) ; la maturité physiologique n'a pas été déterminée faute d'indicateur fiable et adapté.

La levée de l'agropyre a lieu environ 250 à 300°C.j (degrés.jour, exprimé en base 0°C) après le semis (dans le cas d'une implantation dans un sol préalablement réhumecté – cas de PUS) ou après l'occurrence d'un épisode de pluie (dans le cas de VLB : semis dans un sol sec, sans pluie dans les 3 semaines suivant l'implantation) (fig. 1). Cette levée s'avère homogène (peu de levées échelonnées) mais incomplète car seulement 25 à 45 % des grains semés ont effectivement germé. Les levées des autres espèces n'ont pas fait l'objet de suivi dynamique, mais la levée du blé tendre a été constatée entre 150 et 200°Cj (base 0°C) après le semis.

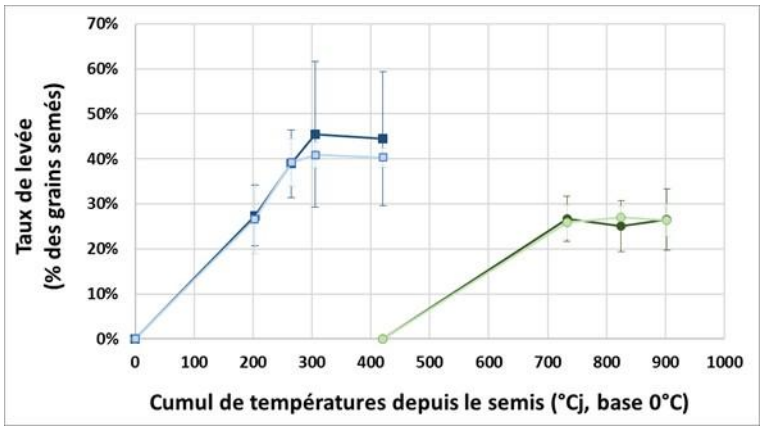


Figure 1 : Dynamique de levée de l'agropyre en première année d'expérimentation pour les essais de Pusignan (bleu) et Villiers-le-Bâcle (vert), exprimé en % de la densité de grains semés. Bleu clair : modalité pluviale ; bleu foncé : modalité irriguée ; vert clair : modalité sans azote ; vert foncé : modalité fertilisée (NB : les modalités n'étaient pas différenciées à la date d'observation).

Au printemps, les stades observés sur l'agropyre intermédiaire sont décalés par rapport à ceux observés sur blé tendre et sur fétuque (fig. 2). A PUS, ce décalage est en moyenne de 23 jours au stade Z30 (moyenne sur 4 années), soit 250°C.j base 0°C ; il tend à s'accroitre courant montaison (+300°C.j), ce qui conduit à une floraison fortement décalée (autour du 15 juin dans nos conditions expérimentales, contre le 20 mai pour le blé tendre selon les mêmes conditions de culture). La durée de remplissage et de maturation des grains (récolte machine) chez l'agropyre semble par contre plus courte que celle du blé tendre (-100°C.j). Il faut noter que le couvert d'agropyre s'avère plus hétérogène (variation plante à plante et étagement entre talles d'âges différents) que le blé tendre ou la fétuque, avec des stades phénologiques étalés et une maturation asynchrone entre épis. Par ailleurs, nos observations indiquent une plus forte variabilité interannuelle de l'atteinte des stades de l'agropyre

(exprimé en °C.j depuis le 1er janvier) que sur blé tendre ce qui indiquerait un contrôle de la phénologie différent du blé tendre. Enfin, aucune remontée à épi n'a été observée suite à une fauche estivale.

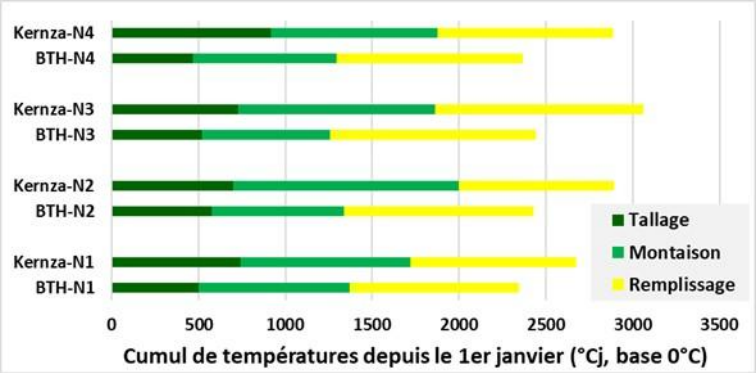


Figure 2 : Comparaison des dates d'apparition de stade et des durées des phases phénologiques pour le blé tendre et l'agropyre intermédiaire, pour l'essai de Pusignan, à partir du 1er janvier de chaque année, en temps thermique (°C.j, base 0°C).

3.3. Des biomasses aériennes peu élevées

Les mesures de biomasse effectuées entre la reprise de végétation (février/mars) et la récolte estivale s'avèrent systématiquement inférieures sur l'agropyre à celles des espèces de référence. La biomasse produite en été (récolte du blé et de l'agropyre, 1ère et 2nde fauches cumulées de la fétuque) en modalités non complémentées en azote (VLB) ou en eau (PUS) présente des niveaux contrastés entre modalités comparées à site et année identique (fig. 3). On note notamment deux situations où l'agropyre n'a pas pu être évalué (forte verse précoce : VLB, 2022 ; salissement et ravageurs : PUS, 2022). Dans 5 cas sur 6, le blé tendre est plus productif que l'agropyre pendant la phase printanière, alors que la comparaison entre fétuque et agropyre est plus délicate (moins de comparaisons) et moins tranchée. Les regains automnaux ont été faibles à modérés : 0,5 à 4 t MS/ha pour l'agropyre, 1 à 5 t MS/ha pour la fétuque. Cette croissance automnale semble s'éroder pour l'agropyre au cours des 3 années de mesure, à la différence de la fétuque qui présente de fortes variations interannuelles (résultats non présentés).

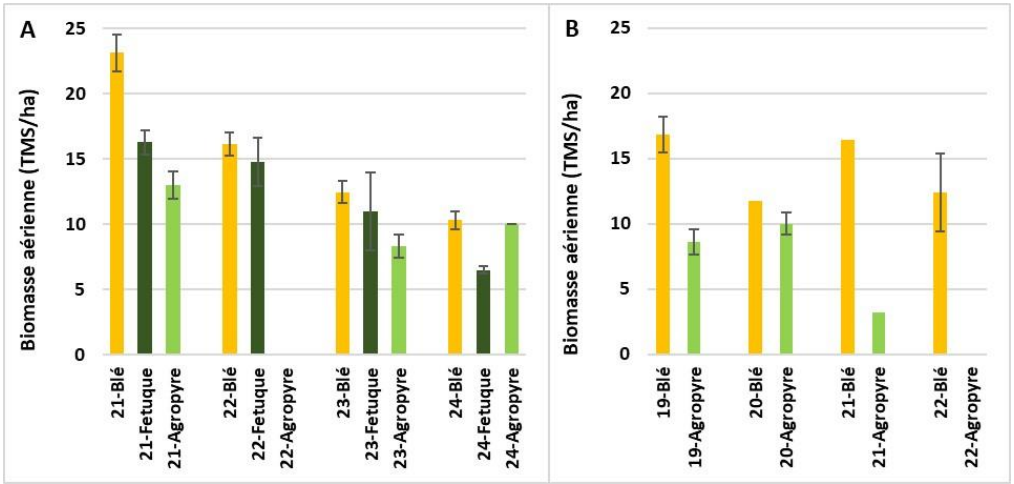


Figure 3 : Comparaison des biomasses aériennes produites en été (maturité du blé et de l'agropyre, 1ère et 2nde coupes cumulées de la fétuque) : A : site VLB (Villiers-le-Bâcle), modalité non fertilisée ; B : site PUS (Pusignan), modalité non irriguée. La barre d'erreur indique l'écart-type de mesures entre répétitions statistiques. Absence de données (VLB, Agropyre en 2022 ; PUS : agropyre en 2022) : mesure impossible pour cause d'altération majeure des parcelles (verse, adventices, moulots)

La réponse aux intrants a été explorée à travers les comparaisons Irrigué/Pluvial (PUS) et Fertilisé/Non fertilisé (VLB). Compte-tenu de la verse systématique de l'agropyre et de la recrudescence d'adventices à VLB en situation fertilisée, la réponse à la fertilisation n'a pas pu être évaluée. La réponse à l'irrigation de l'agropyre s'avère fortement variable et non corrélée à celle du blé tendre (tab. 2), notamment pour des raisons de conduite et de récoltabilité. L'efficience d'eau d'irrigation s'est avérée plus faible que celle du blé en 2019, où le stress hydrique a été marqué et le suivi des cultures a pu être convenablement mené. En 2020 et 2021, l'interprétation de cette efficience devient plus délicate avec des accidents de culture qui pénalisent différemment les modalités.

Tableau 2 : Réponse de la biomasse récolte à l'irrigation, en % d'écart de biomasse (irrigué par rapport au pluvial) et (en italique) efficience de l'eau d'irrigation (kg MS/mm). NR : non récolté.

Récolte	Blé tendre	Agropyre interm.	Commentaires
2019	+20 % *(+145)*	+21 % *(+54.8)*	Stress hydrique avéré
2020	+31 % *(+115)*	-39 % *(-82)*	Stress hydrique avéré mais dégâts (verse, mulots) sur agropyre
2021	-11 % *(-110)*	-12 % *(-25)*	Piétin échaudage sur blé ; verse, mulots, adventices sur agropyre
2022	+33 % *(+86)*	NR	Stress hydrique avéré ; mulots, adventices sur agropyre

L'optimisation empirique de certains paramètres du modèle SIMPLE aux données mesurées (biomasses pour N1 à N3 à PUS, biomasses et fiPAR pour N1 à N3 pour VLB) permet de décrire les dynamiques de biomasse (parties aériennes) (efficiences comprises en 0,94 et 0,99, Relative Root Mean Squared Error (RRMSE) entre 12,8 et 28,5 %) et l'interception lumineuse (efficience entre 0,95 et 0,99, RRMSE entre 2,7 et 22,1 %) (fig 4).

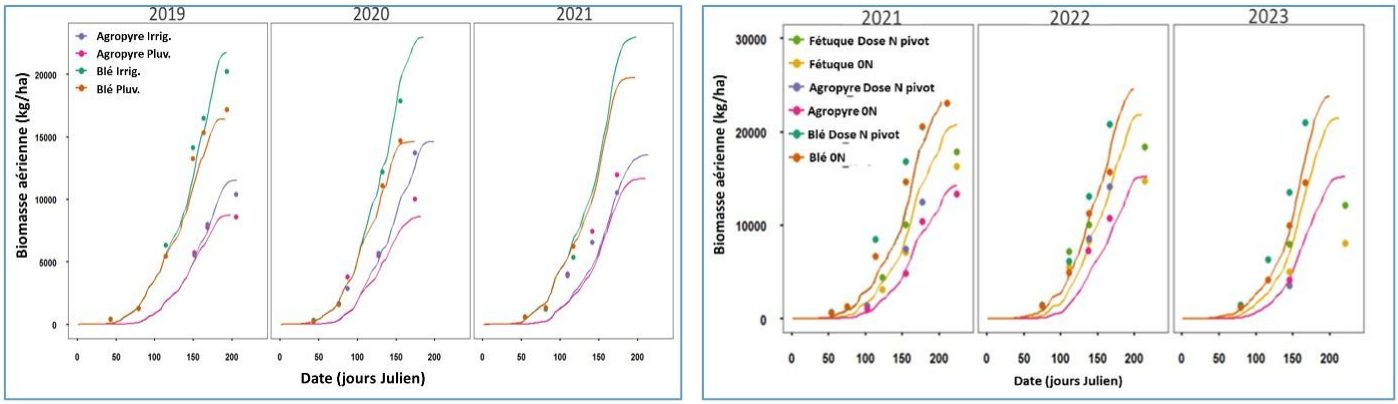


Figure 4 : Dynamiques de biomasse aérienne simulées par le modèle SIMPLE ajusté aux données d'observations des essais de Pusignan (A) et Villiers-le-Bâcle (B).

Les paramètres de RUE (Radiation Use Efficiency) et de dynamique du fiPAR sont différenciés entre les trois espèces (Tableau 3) : l'agropyre se distingue nettement par sa tardiveté à la mise en place de l'indice foliaire (I50A) et à floraison (Tsum), et par sa faible RUE. Il est néanmoins nécessaire de rappeler que la persistance d'adventices au sein de l'agropyre peut conduire à sur-estimer le fiPAR et sous-estimer la RUE.

Tableau 3 : Paramètres spécifiques du modèle SIMPLE ajustés aux données de biomasse aérienne et de fiPAR pour les essais de Pusignan et Villiers-le-Bâcle. RUE : Radiation Use Efficiency ; I50A et I50B : cumul de température pour atteindre respectivement 50 % de fermeture de la canopée en phase de croissance, et 50 % de sénescence en fin de cycle ; MaxIntercept : fraction maximale de fiPAR atteinte par le couvert ; Tsum : cumul de

température requis entre le semis et la maturité ; Tbase : température basale (développement phénologique et croissance) ; Topt : température optimale pour la croissance.

	Blé tendre	Agropyre interm.	Fétuque élevée	Commentaires
RUE (g.MJ-1.m-²)	3,35	1	2,25	
I50A (°Cj)	360	600	465	
I50B (°Cj)	410	400	400	
MaxIntercept (MJ.m-²)	0,95	0,95	0,95	Non optimisé
Tsum (°Cj)	2 350	2 700	2 500	
Tbase (°C)	0	0	0	Non optimisé
Topt (°C)	25	25	25	Non optimisé

3.4. Des composantes de rendements faibles et variables

Les rendements en grain à la maturité récolte ont été mesurés soit à la moissonneuse-batteuse expérimentale (PUS) soit manuellement sur des placettes (VLB). La présence pratiquement systématique de glumes et glumelles adhérentes aux grains de l'agropyre rend la détermination précise des valeurs de composantes de rendement très délicate et fastidieuse. Ainsi, les rendements présentés ici pour l'agropyre sont sur la base de grains triés des principales impuretés, mais non décortiqués, à la différence du blé tendre (grains nus).

Les rendements en grain de l'agropyre s'avèrent particulièrement faibles par rapport à ceux obtenus dans les mêmes conditions pédoclimatiques par le blé tendre. Dans le cas de PUS, les rendements en grain de l'agropyre varient entre 1,2 et 13,8 q/ha en fonction de la conduite et de l'année (Fig 5D). Par rapport au blé tendre, le poids moyen des grains de l'agropyre est systématiquement très faible (entre 5,5 et 8,5 mg) (Fig 5C) ; les densités d'épis et leur fertilité sont par contre très variables, avec des valeurs maximales similaires à celles du blé tendre (Fig 5A et 5B). Les rendements en grain décroissent au fil de l'expérimentation, à la différence de ceux du blé tendre qui fluctuent en lien avec les stress climatiques. On peut rattacher cette chute de rendement à une érosion progressive de la densité d'épis et la fertilité des épis. A VLB, l'évolution n'a pas pu être observée faute d'une série historique complète : la verse est apparue pendant la phase de remplissage des grains en 2021 (modalité fertilisée), 2022 (les 2 modalités) et 2023 (modalité fertilisée), causant l'égrenage et l'impossibilité de récolter les plantes. Les rendements mesurés se sont échelonnés de 15,3 q/ha (Témoin 0N en 2021) à 1,1q/ha (Témoin 0N en 2024).

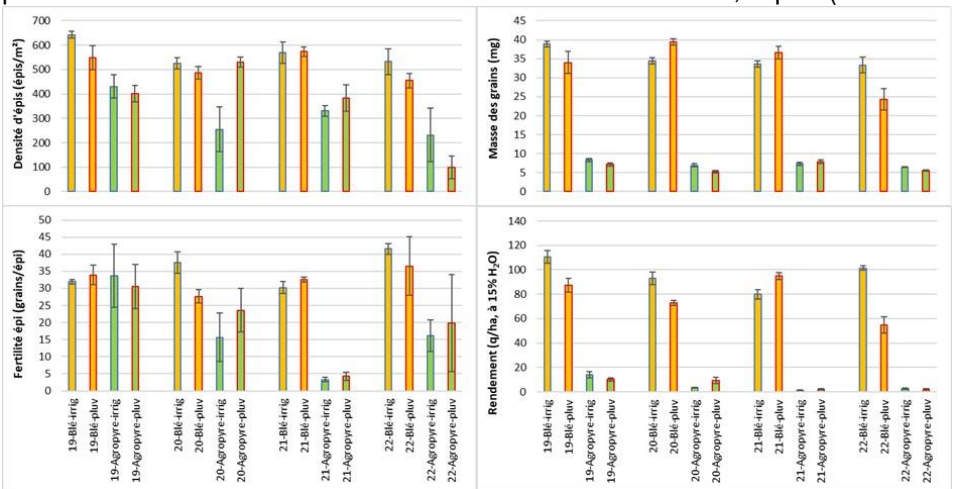


Figure 5 : Détail des composantes de rendement relevées sur le site de PUS (la barre d'erreur représente l'écart-type entre répétitions statistiques). A : densité d'épis, mesurée sur des placettes répétées ; B : fertilité épi, calculée à partir du rendement et des composantes Masse moyenne des grains et Densité d'épis ; C : masse moyenne des grains, mesurée sur échantillon issue d'une récolte mécanisée, après nettoyage sans décorticage ; D : rendement parcellaire obtenu par récolte mécanisée, après nettoyage sans décorticage.

3.5. Un enracinement important qui explore le sol dès la première année

Au cours de la première année de suivi, les profils réalisés à date égale pour comparer les espèces montrent des évolutions assez similaires : une exploration intense des premiers horizons dès la sortie d'hiver, qui se propage vers les horizons plus profonds au fil de la saison de croissance (Fig. 6). Lors de l'observation de février, les différentes espèces présentent les mêmes profils d'enracinement au sein des environnements : une prospection « pionnière » par quelques racines jusqu'à 70 à 100 cm de profondeur, mais seuls les 10 à 30 premiers centimètres sont intensément colonisés. En mai, les enracinements sont fortement densifiés dans les horizons de 20 à 100-120 cm pour les 3 espèces, avec une différence nette entre les sites de PUS et VLB. En juillet, les observations divergent entre sites et espèces : la densité d'enracinement de l'agropyre à VLB se réduit par rapport à l'observation de mai. A l'inverse, ce paramètre progresse sur la totalité du profil pour la fétuque à VLB et pour l'agropyre à PUS.

Au cours des 4 années d'expérimentation, la profondeur maximale d'enracinement efficace a relativement peu progressé sur le site de PUS : elle est restée comprise entre 130 et 150 cm au cours des 4 observations estivales. Le site de VLB n'a pas pu corroborer cette information étant donné que la profondeur d'observation (130 cm) était insuffisante.

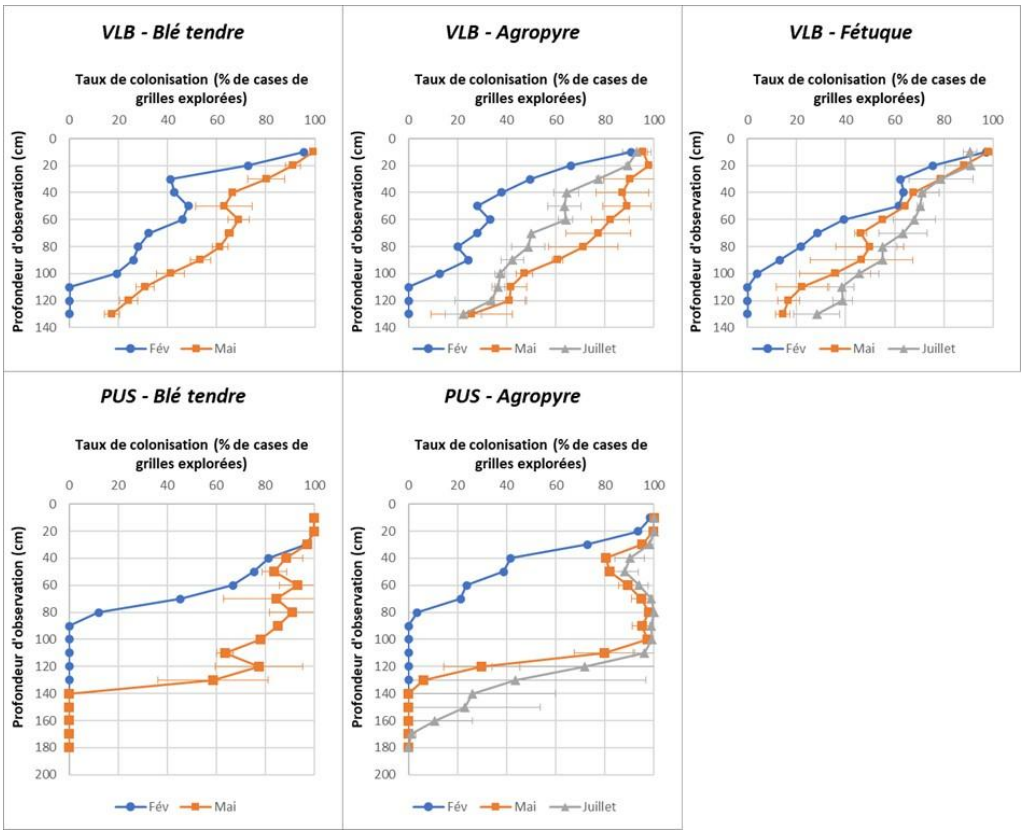


Figure 6 : Description des densités d'enracinement observées au cours de la première année d'expérimentation sur le site de Villiers-le-Bâcle (haut) et Pusignan (bas).

4. Discussion

4.1. Une évaluation expérimentale délicate

L'évaluation expérimentale de la croissance et du développement de l'agropyre s'est heurtée à la difficulté de mener efficacement les suivis culturaux : le salissement rapide des parcelles, le déclenchement fréquent de verse pendant la phase de remplissage des grains et l'installation de ravageurs (mulots) ont fortement affecté le couvert (hétérogénéité, fragilité) et perturbé la mise en

œuvre du protocole. Outre la difficulté technique de mesurer les variables d'intérêt dans les couverts d'agropyre, l'absence de références techniques adaptées à la conduite de cette espèce dans nos contextes et de solutions de gestion (désherbage, verse) a conduit à l'expression de facteurs limitants sur l'agropyre qui ne se sont pas systématiquement exprimés sur les espèces témoins. Ces difficultés d'expérimentation apparaissent inhérentes aux espèces peu ou pas documentées. Cependant, les observations réalisées convergent avec les conclusions de récents travaux menés sur cette espèce (Duchene, 2020 ; Fagnant, 2024).

4.2. Une phénologie peu adaptée aux contextes ouest européens

Le suivi phénologique de l'agropyre a confirmé sa tardiveté par rapport à la référence blé tendre (de l'ordre de 250 à 300°Cj courant montaison dans nos conditions expérimentales soit plus de 20 jours de retard), et les hypothèses physiologiques sous-jacentes (besoins en vernalisation et en durée du jour). Dans l'optique d'une valorisation préférentielle de l'agropyre pour ses grains, le décalage de la montaison et du remplissage des grains peut s'avérer préjudiciable car il expose le couvert à davantage de stress hydrique et thermique. La valorisation fourragère bénéficierait également d'une phénologie anticipée, à la fois pour garantir une production fourragère plus précoce, mais également pour permettre des remontées à épi après des coupes successives, à l'image d'espèces fourragères alternatives exploitées en élevage. Le contrôle phénologique présent dans la variété expérimentée, probablement hérité des conditions climatiques des habitats d'origine (Eurasie) ou des processus de domestication de l'agropyre intermédiaire, garantit une moindre exposition aux épisodes de froid grâce à une durée de tallage rallongée. Dans un contexte ouest-européen soumis à une dérive climatique caractérisée par des hivers moins rudes et des périodes estivales plus chaudes et sèches, il semble nécessaire de gagner en précocité à travers des besoins en vernalisation et en durée du jour moindres.

4.3. Une croissance aérienne lente, possiblement associée à une allocation souterraine importante

La dynamique d'accumulation de biomasse constatée dans nos expérimentations est moins rapide que chez le blé ou la fétuque. Plusieurs éléments semblent concourir à ce résultat : une couverture du sol lente avérée sur nos dispositifs (progression lente du fiPAR, que l'on peut associer en partie à des feuilles fines et de faible surface), une faible efficience d'utilisation du rayonnement (RUE) estimée par l'intermédiaire du modèle SIMPLE, et une concurrence fréquente d'adventices qui étouffent l'agropyre, du moins au cours du tallage et du début de la montaison. L'allocation aux parties souterraines pourrait également expliquer une moindre croissance aérienne, mais l'absence de chiffrage de ce compartiment dans nos expérimentations ne nous permet pas d'étayer cette hypothèse.

4.4. Une prospection racinaire plus importante que le blé tendre

Au cours de la première année de culture, l'agropyre a présenté une progression racinaire similaire à la fétuque et au blé tendre (densité de colonisation des premiers horizons, profondeur efficace maximale). La progression au cours des campagnes suivantes s'est avérée délicate à démontrer compte-tenu des profondeurs atteintes et des contraintes techniques d'observation des racines au-delà de 150 cm. La profondeur et la densité d'enracinement sont susceptibles de garantir un accès accru aux ressources minérales et hydriques de la culture. Cependant, ceci n'a pas contribué à maintenir ou accroitre la production (biomasse, rendement en grains) au cours des 4 campagnes de suivi.

4.5. Une sensibilité aux excès de végétation très préjudiciable

L'agropyre a montré dans nos expérimentations une sensibilité à la concurrence des adventices et à la verse (malgré des biomasses produites modérées et des masses de grain par épi très faibles). Les

plantes ont émis un nombre limité d'épis, mais portés par de longues tiges qui permettent de dominer le couvert. Ceci aboutit à une allocation des ressources peu efficiente (indice de récolte très faible) et à une fragilité structurelle accrue. De précédentes études mentionnent les effets délétères des concurrences internes à la culture (excès de talles qui affectent la fertilité des épis). Il est donc suggéré qu'il s'agisse d'une même réponse à l'environnement : un couvert trop dense (adventices, talles d'agropyre ou plantes compagnes) affecte l'accès aux ressources pour chaque tige et son allocation aux grains.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Conception : JCD ; analyse de données et modélisation : AM, FR et AD ; synthèse et rédaction : JCD.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous tenons à remercier les équipes techniques des stations Arvalis de Pusignan et Villiers le Bacle pour le suivi des essais et la collecte de données de terrain, et les équipes de l'ISARA (Christophe David, Olivier Duchene, Cyrille Thomas) et de l'Université de Gembloux AgroBioTech (Benjamin Dumont, Laura Fagnant) pour leurs conseils techniques.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme CERPET réunissant ARVALIS - Institut du Végétal, ISARA, INRAe et Secobra grâce au soutien des crédits CASDAR (2019-2024).

Références bibliographiques

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., and Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Res.* 119, 201–212. doi: 10.1016/j.fcr.2010.07.012

Casagrande, M., Alletto, L., Naudin, C., Lenoir, A., Siah, A., and Celette, F. (2017). Enhancing planned and associated biodiversity in French farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 57. doi: 10.1007/s13593-017-0463-5

Culman, S. W., DuPont, S. T., Glover, J. D., Buckley, D. H., Fick, G. W., Ferris, H., *et al*. (2010). Long-term impacts of high-input annual cropping and unfertilized perennial grass production on soil properties and belowground food webs in Kansas, USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* 137, 13–24. doi: 10.1016/j.agee.2009.11.008

Culman, S. W., Snapp, S. S., Ollenburger, M., Basso, B., and DeHaan, L. R. (2013). Soil and Water Quality Rapidly Responds to the Perennial Grain Kernza Wheatgrass. *Agron. J.* 105, 735–744. doi: 10.2134/agronj2012.0273

Duchene, O. (2020). Caractérisation fonctionnelle et performances d'une céréale vivace (Thinopyrum intermedium) : une alternative agroécologique pour les systèmes de grandes cultures d'Europe occidentale. AgroParisTech.

Fagnant, L. (2024). Evaluation et Optimisation Agronomique des Services de Production D'une Céréale Pérenne, Thinopyrum Intermedium. Liège université - Gembloux Agro-Bio Tech.

Jungers, J. M., DeHaan, L. H., Mulla, D. J., Sheaffer, C. C., and Wyse, D. L. (2019). Reduced nitrate leaching in a perennial grain crop compared to maize in the Upper Midwest, USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* 272, 63–73. doi: 10.1016/j.agee.2018.11.007

Kremen, C., and Miles, A. (2012). Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecol. Soc.* 17, art40. doi: 10.5751/ES-05035-170440

Lin, M., and Huybers, P. (2012). Reckoning wheat yield trends. *Environ. Res. Lett.* 7, 024016. doi: 10.1088/1748-9326/7/2/024016

Petersen, J., Haastrup, M., Knudsen, L., and Olesen, J. E. (2010). Causes of yield stagnation in winter wheat in denmark. AARHUS UNIVERSITY: FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCES.

Pimentel, D., Cerasale, D., Stanley, R. C., Perlman, R., Newman, E. M., Brent, L. C., *et al*. (2012). Annual vs. perennial grain production. *Agric. Ecosyst. Environ.* 161, 1–9. doi: 10.1016/j.agee.2012.05.025

Ray, D. K., West, P. C., Clark, M., Gerber, J. S., Prishchepov, A. V., and Chatterjee, S. (2019). Climate change has likely already affected global food production. *PLOS ONE* 14, e0217148. doi: 10.1371/journal.pone.0217148

Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., and Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 1–20. doi: 10.1007/s13593-013-0180-7

Zadoks, J. C., Chang, T. T., and Knozak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Reseach* 14, 415–421.

Zhao, C., Liu, B., Xiao, L., Hoogenboom, G., Boote, K. J., Kassie, B. T., *et al*. (2019). A SIMPLE crop model. *Eur. J. Agron.* 104, 97–106. doi: 10.1016/j.eja.2019.01.009

Pour citer cet article : Jean-Charles Deswarte, Alexandra Dutay, Antoine Mainemare, Fanny Ringuet. Evaluation de la croissance et du développement de l'agropyre intermédiaire en conditions françaises - une production en retrait par rapport aux espèces de référence. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.29-40. 10.17180/ciag-2025-vol107-art03

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

AgroÉcoPérennes : Vers des systèmes de culture pérennes agroécologiques

David LAFOND[1], Pascale GUILLERMIN[2], Raphaël METRAL[3], Pascal NEVEU[4], Sylvaine SIMON[5], François WARLOP[6]

[1] IFV Val de Loire Centre, 42 rue Georges Morel, 49070 Beaucouzé, France

[2] Institut Agro Angers, 2 rue André Le Nôtre, 49000 Angers, France

[3] ABSys, Univ Montpellier, INRAE, CIRAD, CIHEAM-IAMM, Institut Agro, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France

[4] UMR MISTEA, Institut Agro, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France

[5] INRAE UERI, Domaine de Gotheron, 460 Chemin de Gotheron, 26320 Saint Marcel lès Valence, France

[6] GRAB, Maison de la Bio, 255 chemin de la Castelette, BP 11283, F 84 911 – Avignon, France

Correspondance : david.lafond@vignevin.com

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art04

Résumé

Concevoir des systèmes de culture agroécologiques passe souvent par la diversification des systèmes, dans l'espace comme dans le temps. En cultures pérennes, c'est principalement une diversification spatiale qui s'opère. Cela entraine de nombreuses interactions, et la conception de ces systèmes dans le cadre d'ateliers impose d'explorer de nombreuses pistes, rendant compliqué sinon impossible la présence d'expertises sur l'ensemble des espèces autour de la table. Le projet AgroEcoPérennes a produit un prototype d'outil informatique capable de gérer des connaissances systémiques (c'est-à-dire relatives à un système complexe et en interaction entre elles), mobilisables dans le cadre d'ateliers de conception, pour pallier l'absence d'expertise sur des sujets nécessaires à la conception. Cet outil, baptisé SYGNAL, repose sur une ontologie de connaissances formalisée dans le cadre du projet qui permet de rendre compte de la diversité d'interactions (« processus ») entre les différents éléments biophysiques du système (« agents »). Un travail complémentaire reste à mener sur l'ergonomie de l'outil et sur son portage pour une diffusion large.

Mots-clés : cultures pérennes, agroécologie, conception, ontologie

Abstract: AgroEcoPérennes: towards perennial agroecological cropping systems

Diversification in space and time of the agroecosystems is a key part of the design of agroecological cultural systems. In perennial crops, this diversification is mainly spatial. This leads to numerous interactions, and the design process of those systems in workshops implies to explore several solutions. This means it is difficult – if not impossible – to gather all the expertise needed in the design process. Project AgroEcoPérennes produced a prototype of IT tool able to handle systemic knowledge, usable in design workshop, to overcome the lack of expertise on a topic. This tool, named SYGNAL, relies on a knowledge ontology formalised during the project that makes it possible to account for the diversity of interactions (« processus ») between the biophysical elements of the system (« agents »). Works remain to be done on the tool ergonomics and its support for a large diffusion.

Keywords: perennial crops, agroecology, design, ontology

1. Introduction

L'agriculture occidentale actuelle est confrontée à de multiples défis, liés en grande partie à la limitation de son impact environnemental (pesticides, biodiversité, nitrates…) et au contexte changeant (changement climatique, guerre en Ukraine, COVID…). Si de nombreux travaux sont conduits actuellement selon des approches factorielles classiques en recherche et en expérimentation afin de proposer des solutions à ces différents défis, de plus en plus de travaux portent non plus sur un levier unique d'amélioration, mais sur une combinaison au sein d'un système, le système devenant alors l'objet d'étude lui-même. En effet, on a souvent affaire à des interactions nombreuses, et les pratiques alternatives aux pratiques conventionnelles sont souvent individuellement moins efficientes, nécessitant de combiner des leviers à effet partiels. On peut par exemple citer le réseau DEPHY EXPE, qui regroupe un grand nombre d'expérimentations système visant à limiter la consommation de pesticides dans les systèmes de culture (Emonet et Rougier, 2018).

Ces expérimentations nécessitent une phase de conception qui peut se faire suivant différentes modalités, faisant généralement appel à des ateliers de conception. Cela permet de s'appuyer sur l'intelligence collective, en s'assurant que l'ensemble des rôles nécessaires à la conception soit représenté (animateur, spécialistes, agronomes de terrain, moteur de changement et opérateur de l'évaluation) (Havard *et al*. 2016). Dans le cas de systèmes agroécologiques, reposant souvent sur une diversification importante des espèces végétales, le nombre d'interactions possibles lors des phases de conception rend impossible la présence de spécialistes sur l'ensemble des combinaisons susceptibles d'être envisagées lors de l'atelier. Dès lors, l'apport de connaissances lors d'un atelier devient un enjeu de réussite. La représentation des connaissances sous la forme de modèles conceptuels peut être une solution, sous réserve que la consultation de ces connaissances soit simple pour ne pas bloquer la dynamique de l'atelier. Le projet AgroEcoPérennes a permis l'élaboration informatique d'un outil de gestion des connaissances pouvant répondre à cet objectif.

2. Contexte du projet AgroEcoPérennes

Dans les années 2010, les filières viticoles et arboricoles ont engagé de nombreuses actions visant à re-concevoir des agrosystèmes à plus faibles niveaux d'intrants en utilisant l'analyse systémique des relations techniques-processus-performances et le prototypage de système par expérimentation (Lafond *et al*., 2013, Simon *et al*., 2017). Ces démarches se sont largement appuyées sur la modélisation conceptuelle des agrosystèmes (Lamanda *et al*., 2012) indispensable pour intégrer des connaissances jusque-là dispersées dans la littérature entre les disciplines mais aussi entre des savoirs scientifiques (sur les processus biophysiques et leurs liens aux performances productives) et des savoirs empiriques (sur les techniques et leur mise en œuvre dans la diversité des régions françaises). Des démarches d'élicitation de ces connaissances par entretien avec des experts et d'intégration/partage en « focus group » ont été élaborées et mises en œuvre avec succès pour formuler des hypothèses testables par expérimentation sur des syndromes complexes (par exemple sur le dépérissement de la Syrah, Claverie *et al*., 2011, 2013). Ces expériences ont montré le potentiel de l'analyse des systèmes complexes pour appuyer la conception de systèmes innovants mais elles ont aussi mis en évidence des points de blocage pour aller plus loin :

(i) la modélisation conceptuelle permet bien d'intégrer des connaissances de nature diverse dans une représentation cohérente des relations et interactions techniques/milieu-processus-performances (rendement, IFT…). Mais cette représentation était trop complexe à utiliser en focus group pour prendre en compte simultanément toutes ces interactions pour concevoir collectivement des prototypes en forte rupture (Metral *et al*., 2015). Dans le cas des grandes cultures, cette conception assistée par modèle conceptuel (ex. Vereijken, 1997), voire numérique (ex. Bergez *et al*., 2010) a été davantage développée car plus facile à travailler par étape à partir de la re-conception des successions culturales que dans le cas des plantes pérennes où ce levier est difficile à activer et où le nombre de techniques interagissant

sur un processus (ex. optimisation de la vigueur) est très important (Grechi *et al*., 2012). Le frein majeur est ici non pas dans la connaissance ou la capacité à l'intégrer dans une représentation systémique mais dans la capacité, sans perdre la complétude de cette connaissance, à en extraire sous une forme partageable par un groupe en réunion (donc plutôt sous forme de graphe) la partie utile à chaque étape de la conception.

(ii) les travaux réalisés aussi bien en viticulture qu'en arboriculture montrent que la construction de prototypes théoriques de systèmes et de règles de décision, leur mise en expérimentation et l'analyse des résultats, qui plus est dans un réseau national, génèrent une masse importante de connaissances sur le continuum techniques–processus-performances. Si elles sont formalisées dans un modèle conceptuel d'un agrosystème (Claverie *et al*., 2011 ; Wery *et al*., 2015), ces connaissances peuvent être qualifiées de systémiques, d'une part parce qu'elles se positionnent clairement en un point de ce continuum et d'autre part parce qu'on peut en extraire le caractère générique (entre variétés, entre régions voire entre espèces) et le caractère spécifique (à une variété, à un sol…).

Pour aller plus loin dans la capitalisation et la mise à disposition, de manière systémique, de cette masse de connaissances, il est apparu indispensable de disposer d'outils informatiques qui combinent une base de connaissances et la capacité d'extraire et de représenter sous forme de graphes (cartes heuristiques) la partie de la connaissance nécessaire et suffisante à chaque étape de la conception (y compris le choix des indicateurs d'évaluation) et pour chaque système à concevoir. Ce domaine de l'ingénierie des connaissances faisait l'objet de développements scientifiques, notamment dans le domaine des ontologies (Neveu *et al*., 2010) qui avaient déjà été mobilisées en œnologie (Mulyarto *et al*., 2014) et qui nous semblaient prometteurs car ils étaient associés à des outils informatiques comme OWL (http://www.cse.lehigh.edu/~heflin/IntroToOWL.pdf) mobilisables à courte échéance par les filières viticoles et arboricoles. Par ailleurs l'expérience de la filière grandes cultures (Guichard *et al*., 2011) pour développer un outil de ce type (AgroPEPS devenu GECO) a été mise à profit dans la construction du cahier des charges et des choix informatiques en lien avec les informaticiens des sites web dédiés aux filières concernées.

L'expérimentation concernant la réduction des usages de produits phytosanitaires en France s'appuie notamment sur des approches système, en particulier dans le cadre du plan Ecophyto, à travers les réseaux DEPHY EXPE. En viticulture, les systèmes étudiés dans ce réseau lors de la première vague de projet (« DEPHY EXPE I ») étaient pour une bonne partie issus du projet CASDAR EcoViti (2010-2014). L'une des critiques au moment du lancement du projet AgroEcoPérennes était le manque d'originalité des leviers mis en œuvre dans les essais mis en place dans le réseau DEPHY EXPE, malgré des réductions d'IFT (Indicateur de fréquence de traitements phytosanitaires) significatives. Ces leviers (réduction de doses, outils d'aide à la décision, alternatives aux herbicides (enherbement, travail du sol)) étaient utilisés également dans les réseaux DEPHY FERME, ce qui renforçait cette critique. Ce diagnostic était partagé avec la filière arboricole dans le cadre de divers projets de conception-expérimentation de vergers économes en pesticides (ex : projet Verger de Demain en pomme (IFPC), le réseau DEPHY EXPE EcoPêche (INRAE Avignon), ou BioREco en pomme (INRAE Gotheron, Simon *et al*. 2011)). Il s'articulait autour des 3 constats suivants :

(i) les limites de tels systèmes venaient du fait qu'ils optimisaient les pratiques actuelles ou substituaient certains intrants (ex. mécanique vs. chimique), sans réduire drastiquement l'utilisation des pesticides, parce qu'ils ne remettaient pas en cause les fondements de l'agrosystème.

(ii) on constatait de fait peu de re-conception globale du système bien qu'à l'issue du projet EcoViti de nombreuses pistes aient été ouvertes lors des différents ateliers de prototypages réalisés mais pas explorées jusqu'à la mise en expérimentation. En arboriculture, un travail de prototypage pour concevoir des systèmes agroécologiques a été initié en fin de programme BioREco, mais il était encore en phase exploratoire.

(iii) la complexité et la lourdeur des expérimentations système ne facilitait pas les interactions avec les agriculteurs (notamment dans EcoViti et BioREco). Or, ces interactions sont essentielles dans l'appropriation et l'adoption de leviers d'action par les agriculteurs pour qu'ils construisent leur propre système en vue de diminuer les impacts environnementaux (Le Bellec *et al*. 2012), d'autant plus que la complexité des systèmes pérennes (habitats pluri-annuels multi-strates) nécessite la mobilisation d'un ensemble de praticiens de la filière pour produire un 'savoir synthétique' issu de connaissances scientifiques et empiriques.

Enfin, les expérimentations mises en place dans le premier volet de DEPHY EXPE touchaient à leur fin (2017 pour les projets de la première vague, 2018 pour ceux de la seconde vague). Parmi les constats sur ces expérimentations, sur plantes pérennes, le fait de se placer sur parcelle déjà plantée limitait fortement les leviers disponibles et participait plutôt à une conception sans forte rupture. En particulier, le choix du matériel végétal, du système de conduite, de la densité de plantation, la possibilité de mettre en place des cultures associées pouvaient être des leviers très pertinents pour aller plus loin. Certains essais prenaient en compte ces éléments, mais relativement peu au regard du nombre total d'essais. Si des réflexions étaient déjà engagées (ex : projet SAFIR en arboriculture avec l'INRAE), le projet AgroEcoPérennes devait permettre de répondre à ce diagnostic issu de la première vague d'expérimentations systèmes lancée dans le cadre Ecophyto, et d'accompagner les nouveaux besoins.

3. Etablissement du formalisme de représentation des connaissances : l'ontologie d'acquisition

La première tâche à laquelle s'est attelé le collectif du projet a été de déterminer de quelle manière représenter des connaissances systémiques. La manière la plus simple de représenter une ontologie est graphique, avec des nœuds reliés par des liens. La principale différence entre une ontologie et une base de données relationnelles est que la nature des nœuds et des liens est documentée, ce qui rend très puissant le requêtage.

Le travail sur cette évolution a pris une bonne partie des deux premières parties du projet, au fur et à mesure que les tests de versions montraient la nécessité de modifier certains éléments du formalisme proposé.

3.1. Principe général du formalisme

Le parti pris initial consiste à ne pas qualifier *a priori* les éléments du système par des termes agronomiques (culture, bioagresseur, auxiliaire, pratique…), mais de déduire ces propriétés des relations entre éléments. Ainsi, si un élément biologique est défavorable à notre plante, on pourra déduire qu'il s'agit d'un bioagresseur, il n'est donc pas utile de le préciser. De même, si un processus est relié à l'agriculteur, il s'agira d'une pratique.

3.2. Agents, processus et liens « Implique »

Le formalisme de départ consistait à avoir des nœuds représentant les éléments physiques du système (les « Agents ») reliés entre eux par des interactions de natures variables (les « Processus »). Nous prendrons ici un exemple pour illustrer cela, que nous déclinerons le long de cette partie. Supposons que l'on veuille traduire la connaissance suivante : « La tavelure parasite le pommier ». Elle serait traduite de la manière suivante (Figure 1) :



Figure 1 : Première itération du formalisme présentant le parasitisme du pommier par la tavelure

La limite de cette représentation apparait toutefois rapidement. Il n'est pas rare en effet qu'un processus fasse intervenir plus de deux agents. Cela rend indispensable d'ajouter un nouveau type de nœud pour les processus (Figure 2).

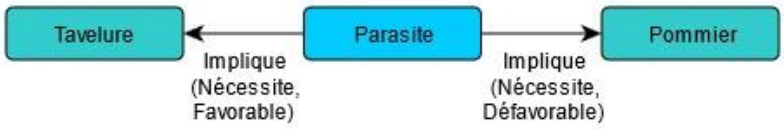


Figure 2 : Intégration d'un nœud « Processus » dans le formalisme

Cela entraîne l'apparition d'un nouveau type de lien : le lien « Implique ». Ce type de lien a en outre un certain nombre de qualificatifs à préciser si nécessaire lors de la création :

- est affecté (« le processus est affecté par l'agent ») ;
  - est inhibé,
  - est catalysé.
- nécessite (« le processus nécessite l'agent ») ;
- agit sur (« le processus agit sur l'agent ») ;
  - fait apparaitre,
  - fait disparaitre,
  - augmente,
  - diminue,
  - est favorable,
  - est défavorable.

Dans notre exemple, les deux liens sont nécessaires, le processus est favorable à la tavelure et défavorable au pommier.

Cette caractérisation a également évolué au cours du projet, avant de se stabiliser sous cette forme.

Enfin, pour permettre de lier l'ontologie ainsi créée à d'autres ontologies, nous avons ouvert la possibilité de créer un agent de manière libre, ou en explorant le National Agricultural Library Thesaurus de l'U.S. Department of Agriculture, une ontologie permettant d'avoir accès à un grand nombre de concepts relatifs à l'agriculture, intégrant entre autres de nombreux taxons. Cette ontologie fait partie des principales ontologies utilisées en agriculture, ce qui pourra permettre d'inclure les informations notamment taxonomiques contenues dans cette ontologie lors de requêtes destinées à l'exploration de la base de connaissances. Il est ainsi inutile de préciser que la tavelure du pommier est un champignon ascomycète. Le lien avec l'ontologie précédente permet d'inférer (déduire) cela sans dupliquer l'information ou bien de l'écrire automatique dans le système.

Il est à noter que pour simplifier la représentation, le nom vernaculaire des espèces est ici utilisé, mais les noms scientifiques sont bien évidemment utilisés dans la base de connaissances.

3.3. Liens « Partie de » et « Membre de »

Rapidement, il est devenu nécessaire d'identifier certains agents comme sous-partie d'un ensemble plus vaste. Un nouveau type de lien est apparu, permettant de relier deux agents, l'un étant une sous-partie de l'autre. Puis il est apparu nécessaire de distinguer deux situations : l'une où le premier agent

est une composante physique du second (liens « Partie de ») et l'autre où le second agent représente une catégorie générale dans laquelle s'inscrit le premier (liens « Membre de »). Si on intègre ces éléments à notre exemple, voici leur représentation (Figure 3) :

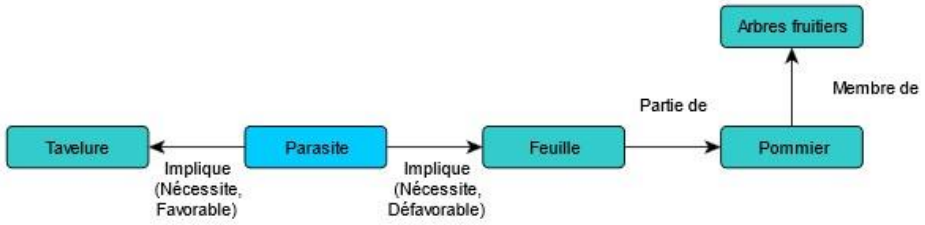


Figure 3 : Formalisme intégrant les liens « Partie de » et « Membre de »

3.4. Liens booléens

Dans le cas où le processus implique différents agents, il est apparu nécessaire de distinguer les cas où le processus devait impliquer l'ensemble des agents auxquels il est relié, des cas où seuls certains pouvaient être présents. Pour gérer les multiples combinaisons possibles, la possibilité de faire explicitement apparaitre des nœuds « Ou » et « Et » a été ajoutée au formalisme (Figure 4).

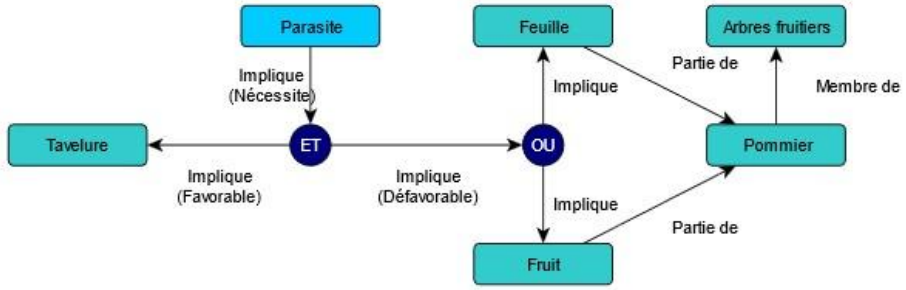


Figure 4 : Intégration de liens booléens au formalisme

3.5. Liens entre processus

Lors de la description d'un système la survenue d'un processus peut dépendre d'un autre processus. Pour gérer ces situations, nous avons ajouté au formalisme un lien « Dépend de » (Figure 5). Il permet de montrer la succession de processus, en particulier dans le cas de cycles (ex : « Eclosion » dépend de « Ponte » dépend de « Accouplement » …).

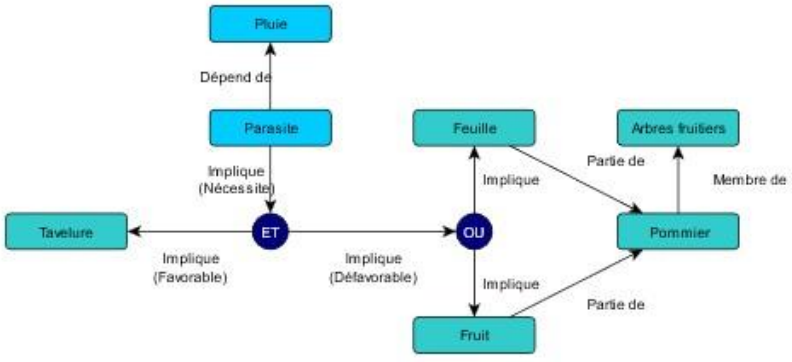


Figure 5 : Intégration du lien de dépendance entre processus « Dépend de » au formalisme

3.6. Gestion du temps

La gestion de la périodicité dans la représentation des connaissances n'est pas triviale. En effet, de nombreux processus sont limités dans le temps, mais il n'est pas évident d'établir une échelle de temporalité unique adaptée pour l'ensemble des processus et des filières concernées. Ainsi, plusieurs échelles temporelles peuvent se superposer selon les besoins (saisons, stades phénologiques des différentes cultures, calendrier) sans qu'il y ait une correspondance systématique entre ces différentes échelles. L'outil n'ayant pas pour ambition de rentrer dans de la modélisation quantitative qui pourrait permettre de faire ces liens en fonction des conditions de l'année, nous avons choisi de laisser toute latitude aux opérateurs pour définir les périodes pertinentes pour décrire leurs processus. Nous avons donc introduit un type de nœud « Période », ainsi que différents liens (Figure 6) :

- « Pendant », pour indiquer qu'un processus à lieu pendant une période donnée ;
- « Commence en », pour indiquer qu'un processus débute pendant une période ;
- « Finit en », pour indiquer qu'un processus se termine pendant une période ;
- « Puis », pour indiquer la succession entre deux périodes.

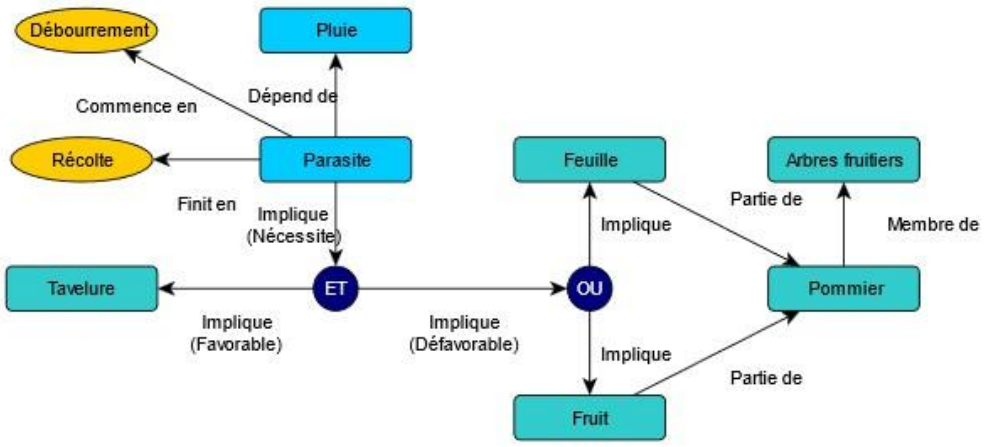


Figure 6 : Intégration de la temporalité au formalisme

3.7. Caractéristique des agents

Pour affiner l'effet des processus sur les agents, nous avons introduit des nœuds « Caractéristique » permettant de préciser des caractéristiques chiffrées relatives à certains agents (Figure 7). Les qualificatifs « Augmente » et « Diminue » des liens « Implique » ont spécialement été introduits pour des liens reliant des processus à des caractéristiques. Cela permet de documenter l'effet de processus sur un agent, sans le jugement de valeur parfois associé aux qualificatifs « Favorable » et « Défavorable ». Du point de vue des objectifs de conception, il est ainsi possible de renseigner des effets sur un agent sans que ceux-ci soient nécessairement perçues comme positifs ou négatif. Par exemple, un processus faisant baisser la quantité d'eau contenue dans le sol (« processus » diminue la caractéristique « teneur en eau » de l'agent « sol ») pourra être « Favorable » ou « Défavorable » selon le contexte ou le point de vue adopté.

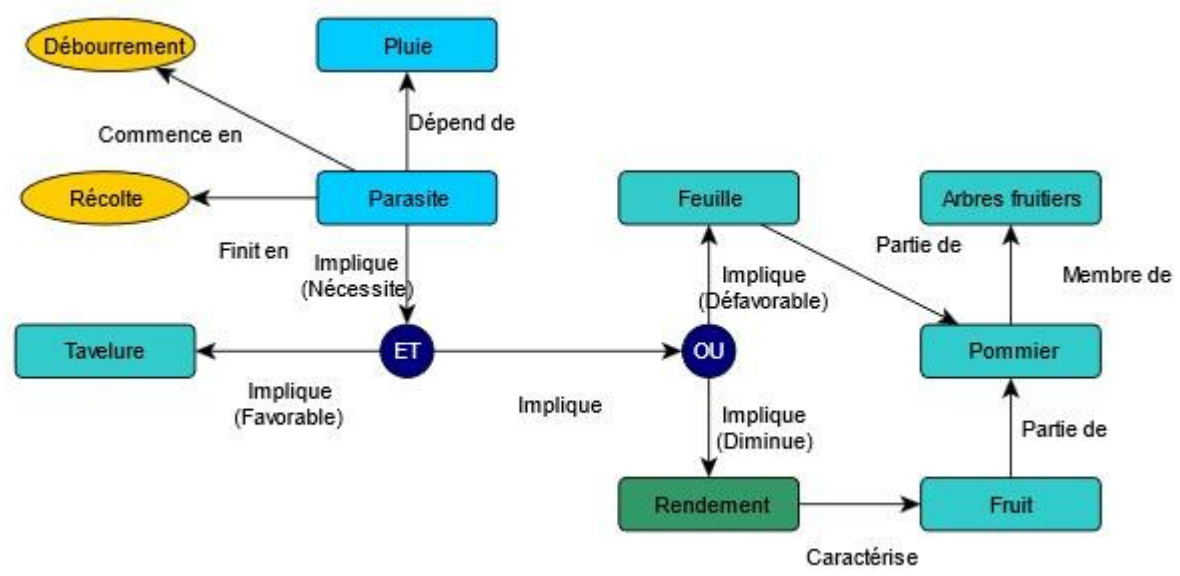


Figure 7 : Intégration d'une caractéristique dans le formalisme

3.8. Documentation des connaissances

Afin de permettre d'entrer plus finement dans la source des connaissances et de fiabiliser l'information, il a été ajouté la possibilité de lier à certains processus des ressources accessibles via une URI (Uniform Resource Identifier) (c'est-à-dire identifiées sur le web). Ces ressources peuvent être reliées à n'importe quel type de nœud, via des liens « Relatif à ».

Ce dernier type de nœud et de lien complète le formalisme. La Figure 7 présente un exemple de déploiement de ce formalisme à travers l'exemple du parasitisme du pommier par la tavelure. Cet exemple est volontairement simplifié par rapport à la représentation du phénomène dans la base de connaissances, qui utilise beaucoup plus d'agents et de processus pour représenter le cycle de la tavelure et les nombreuses interactions avec la plante et l'environnement.

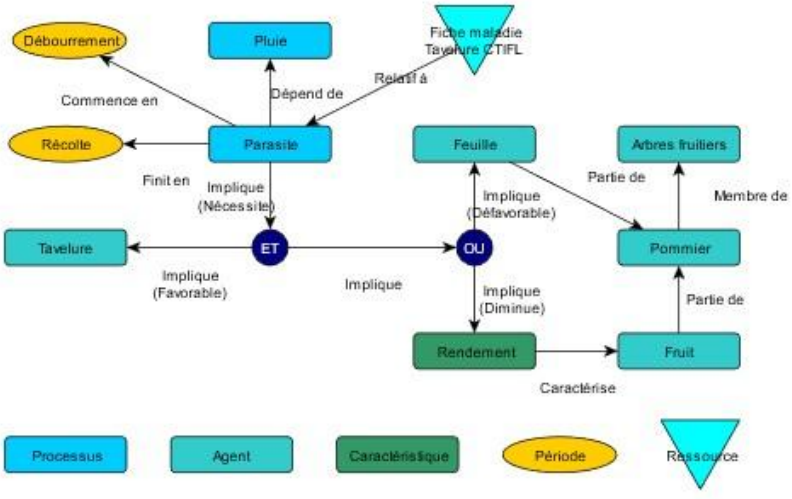


Figure 7 : Vue d'ensemble du formalisme déployé à travers l'exemple du parasitisme du pommier *Malus domestica* par la tavelure *Venturia inaequalis*

A ce jour, la base de connaissances contient les éléments présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Liste des éléments saisis dans la base de connaissances à la fin du projet AgroEcoPérennes

Liens		Nœuds	
Partie de	795	Agent	1365
Membre de	558	Processus	715
Implique	2362	Caractéristique	252
Caractérise	256	ET	158
Dépend de	238	OU	121
Débute en	16	Période	92
Termine en	14	Ressource	8

4. Structuration de l'outil informatique SYGNAL

L'outil utilisé pour déployer ce formalisme, baptisé SYGNAL (Simon *et al*., 2020), permet de gérer une base de connaissances déployée suivant le formalisme exposé ci-dessus, à travers deux interfaces utilisateurs distinctes.

4.1. L'interface d'acquisition

L'interface d'acquisition s'appuie sur un outil baptisé Graph Drawer, développé en angular/typescript. Cette interface permet de créer des graphes intégrant l'ensemble des éléments présentés dans le formalisme ci-dessus (Figure 8).

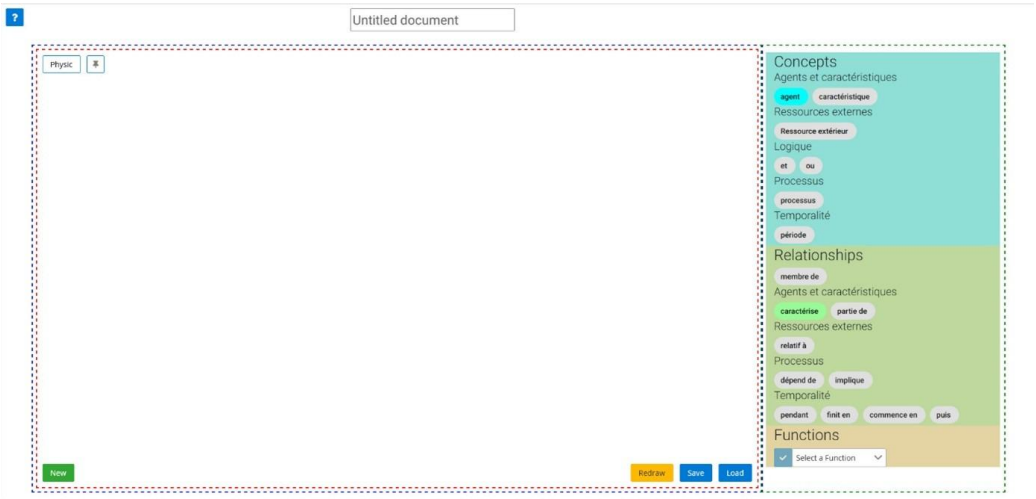


Figure 8 : Interface d'acquisition Graph Drawer permettant d'alimenter la base de connaissances de SYGNAL

Ces graphes sont ensuite exportés au format JSON, avant d'être transformés en CSV, puis intégrés dans la base de connaissances au format Neo4j. Ce passage par le format CSV permet de s'assurer de pouvoir récupérer les connaissances contenues dans la base de connaissances dans un format universel, dans l'éventualité où la base Neo4j viendrait à être compromise.

Ces étapes de transfert permettent en outre une modération des graphes préalable à leur intégration dans la base Neo4j. Cette modération vise plusieurs objectifs :

- éviter des doublons liés à l'utilisation de termes différents pour parler du même agent ou processus.

- s'assurer que les conventions de représentation des processus sont respectées, l'expérience montrant qu'il est tout à fait possible de représenter le même processus de multiples manières en fonction de différents facteurs (niveau de précision souhaité, point sur lequel l'apporteur de connaissances souhaite mettre l'accent, voire logique de représentation différente d'une personne à l'autre…).

Afin de limiter ce travail de modération, plusieurs fonctions ont été ajoutées à l'interface d'acquisition pour importer des nœuds déjà renseignés depuis la base de connaissances :

- import d'un élément par recherche dans la base sur le nom ou sur l'identifiant unique de l'élément (URI).
- import d'un sous-ensemble de la base de connaissances relié à une thématique donnée. Ces sous-ensembles correspondent à des graphes élaborés autour d'une thématique donnée, et importés dans la base comme un JSON unique. Cette fonctionnalité permet de repartir du contenu déjà introduit dans la base sur un sujet et de compléter ou de modifier le graphe.
- import des voisins du nœud sélectionné, c'est-à-dire l'ensemble des nœuds reliés par un lien avec le nœud considéré. Cela permet de parcourir la base de connaissances de proche en proche.
- enfin, il est possible de recharger directement un fichier JSON, ce qui permet de passer plusieurs séances de travail sur un graphe avant de l'intégrer en base de connaissances.

Ces éléments importés sont identifiés par leur URI dans la base de connaissances, ce qui assure l'intégration du nouveau graphe sans redondance. Le fait de travailler sur un fichier JSON intermédiaire permet de supprimer des éléments importés sans que cela ait d'impact sur la base de connaissances, et donc d'enlever de l'affichage les nœuds importés inutilement.

4.2. L'interface de conception

Pour explorer les concepts contenus dans la base de connaissances, une seconde interface, basée également sur Graph Drawer, a été développée. Cette interface permet directement d'explorer la base de connaissances, mais pas de créer de nouveaux nœuds ou liens, ni d'éditer les éléments existants (Figure 9). Le menu ne comporte donc que des fonctions d'import (identiques à celles présentes dans l'interface d'acquisition) et des requêtes d'exploration.

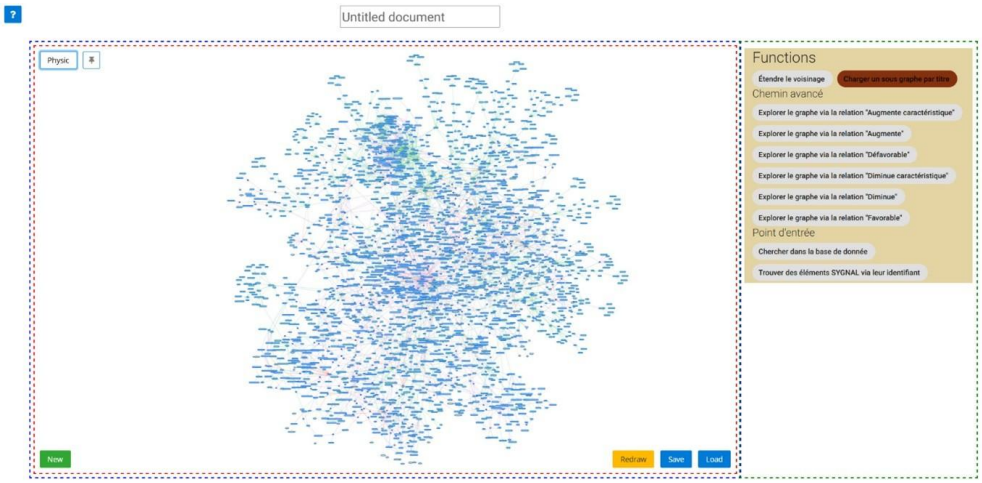


Figure 9 :: Interface de conception de l'outil SYGNAL servant à l'exploration de la base de connaissances. L'ensemble des nœuds et liens de la base sont ici affichés.

La première approche a consisté à créer des requêtes permettant de retrouver des catégories précises d'agents. Ainsi une requête permettait de déterminer les bioagresseurs d'un agent, en déterminant les agents dont une sous-partie était reliée à une sous-partie de la plante par un processus favorable à l'agent en question et défavorable à la plante. Une deuxième utilisation de la requête permettait de trouver tous les auxiliaires. Les relations étaient représentées de manière simplifiée, afin de ne pas surcharger l'affichage, mais pouvaient être développées pour explorer les détails des agents et processus impliqués si besoin. Cette approche, pertinente pour réfléchir à des questions de bioagresseurs et de régulation biologique, montrait toutefois ses limites hors de ce domaine, pour des éléments relatifs à la physiologie des plantes ou à l'agronomie, par exemple.

Le choix s'est finalement porté sur un requêtage par éléments favorables, défavorables, augmentant ou diminuant les agents ou caractéristiques sélectionnés, sans qualifier ces éléments *a priori*. On trouve donc les requêtes suivantes :

- explorer le graphe via la relation « Augmente caractéristique » ;
- explorer le graphe via la relation « Augmente » ;
- explorer le graphe via la relation « Favorable » ;
- explorer le graphe via la relation « Diminue caractéristique » ;
- explorer le graphe via la relation « Diminue » ;
- explorer le graphe via la relation « Défavorable ».

5. Utilisation de l'outil en atelier : premiers retours d'expérience

La finalité de l'outil étant d'être utilisé en atelier, nous avons réalisé plusieurs ateliers en interne ou avec des extérieurs à l'équipe projet, sans enjeu sur les sorties de l'atelier, et ce à différents stades d'avancée du projet.

5.1. Atelier avec des étudiants

Dans le cadre d'un module pédagogique de Master 2 rassemblant sur 2 jours, 33 étudiants et 5 animateurs membres du projet, nous avons réalisé un atelier sur différents cas d'étude. Un enseignant de lycée technique agricole s'est également joint au groupe en qualité d'observateur pour participer à l'évaluation des possibilités d'utilisation de l'outils et des méthodes pédagogiques développées pour l'enseignement des approches systèmes et des méthodes de conceptions innovantes pour l'enseignement technique.

Après une présentation du type de connaissances qu'ils pouvaient trouver dans SYGNAL, les étudiants avaient la possibilité de formuler des questions en cours d'atelier. Un opérateur membre de l'équipe projet se chargeait du requêtage, l'interface n'étant pas fonctionnelle à ce stade. Outre la difficulté à formuler des questions d'une manière facilement transcriptible dans SYGNAL, il est ressorti une difficulté à intégrer cette démarche de requêtage de manière fluide dans le déroulé d'un atelier de conception.

5.2. Atelier avec des expérimentateurs

Deux ateliers ont eu lieu lors du projet, afin de voir l'intérêt potentiel de l'outil SYGNAL pour apporter des connaissances à des personnes déjà familières avec la conception. Dans le premier cas, il s'agissait d'experts en arboriculture participant au projet, donc connaissant le formalisme et l'outil, mais travaillant sur une question en viticulture avec laquelle ils n'étaient pas familiers. Cet atelier a eu lieu tôt dans le projet, le requêtage n'a donc pas été effectué par eux mais par les membres du projet travaillant

au développement de l'outil. Cela a nui à la fluidité de l'atelier, mais a permis de montrer l'intérêt de l'outil pour intégrer des connaissances nouvelles.

Le second atelier a eu lieu en fin de projet, donc avec une base de connaissances bien plus complète et une interface de conception fonctionnelle. Nous avons cette fois demandé à des collègues extérieurs au projet d'utiliser l'outil pour répondre à des questions et concevoir des ébauches de systèmes en intégrant des connaissances qu'ils n'avaient pas *a priori,* en proposant une phase d'exploration des connaissances contenues dans l'outil avant de passer à la phase de conception d'un système. L'enjeu ici était autant d'évaluer l'ergonomie de l'outil que de confirmer la pertinence de l'apport de connaissances. Sur ces deux points, l'outil s'est montré satisfaisant mais de nombreuses améliorations sont envisageables.

6. Conclusion

Le projet AgroEcoPérennes posait la question de la représentation et de la mobilisation de connaissances expertes sur les systèmes agroécologiques à base de plantes pérennes à l'aide d'une ontologie informatique et des concepts du web sémantique. L'outil SYGNAL conçu lors du projet a permis de montrer qu'il était possible de concevoir un formalisme adapté aux utilisateurs pour la représentation de connaissances systémiques en agronomie, et que ces connaissances étaient remobilisables en atelier. La preuve du concept est faite avec un prototype fonctionnel. Il reste cependant du travail à accomplir sur l'outil pour qu'il soit opérationnel. D'une part, il s'agira d'enrichir la base de connaissances en ouvrant l'acquisition de connaissances à des contributeurs et en intégrant des sources d'informations existantes (Najm, 2022). Et d'autre part, il reste à améliorer l'ergonomie de l'outil, et à organiser une administration pérenne du système d'information SYGNAL, comme sur la gestion du back-office (modération, intégration des JSON…).

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Raphaël METRAL : https://orcid.org/0000-0002-0093-241X

Pascal NEVEU : https://orcid.org/0000-0003-4189-7793

Sylvaine SIMON : https://orcid.org/0000-0003-4409-8604

Contributions des auteurs

David LAFOND : Recherche, méthodologie, supervision, visualisation, rédaction – version originelle

Pascale GUILLERMIN : Recherche, méthodologie, rédaction – révision et correction

Raphaël METRAL : Recherche, méthodologie, rédaction – révision et correction

Pascal NEVEU : Recherche, méthodologie, rédaction – révision et correction

Sylvaine SIMON : Recherche, méthodologie, rédaction – révision et correction

François WARLOP : Recherche, méthodologie, rédaction – révision et correction

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des contributeurs à la base de connaissances, les participants aux divers ateliers organisés, et le CASDAR pour le financement du projet.

Références bibliographiques

Bergez J.E., Colbach N., Crespo O., Garcia F., Jeuffroy M.H., Justes E., Loyce C., Munier-Jolain N., Sadok W., 2010. Designing crop management systems by simulation. European Journal of Agronomy 32, no 1 (2010): 3–9.

Claverie M. Delmotte S, Wery J., 2011. Dépérissement de la Syrah : compréhension des dysfonctionnements physiologiques amenant le cep crevassé à la mort : I. Elaboration d'hypothèses à l'aide d'un modèle conceptuel. Progrès Agricole et Viticole 128 : 88-96.

Claverie M., Garin P., Goma-Fortin N., Mejean I., Wery J., 2013. Dépérissement de la Syrah : Compréhension des disfonctionnements physiologiques amenant le cep crevassé à la mort : II : Vérification des hypothèses du modèle conceptuel et perspectives. Progrès Agricole et Viticole 130 : 6-21.

Emonet E., Rougier M., 2018. DEPHY EXPE, un réseau d'expérimentations pour des systèmes économes en pesticides. *Innovations Agronomiques* 70, 1-2

Guichard L., Ballot R., Halska J., Lambert E., Meynard J.M., Minette S., Petit M.S., Reau R., Soulignac V., 2015. AgroPEPS, un outil web collaboratif de gestion des connaissances pour Produire, Echanger, Pratiquer, S'informer sur les systèmes de culture durables. *Innovations Agronomiques* 43 (2015), 83-94

Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estorgues V., Labeyrie B., LafondD., Meynard J.M., *et al*. 2016. Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et pérennes. GIS PIClég, GIS Fruits, Institut français de la vigne et du vin, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique.

Lafond D., Coulon T., Métral R., Mérot A., Wery J.,2013. EcoViti : a systemic approach to design low pesticide vineyards. Integrated Protection and Production in Viticulture. IOBC-WPRS Bulletin Vol. 85 pp. 77-86

Lamanda N., Roux S., Delmotte S., Merot A., Rapidel B., Adam M., Wery J., 2012. A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. European Journal of Agronomy 38 (avril 2012): 104 16. doi:10.1016/j.eja.2011.07.004.

Le Bellec F., Rajaud A., Ozier-Lafontaine H., Bockstaller C., Malézieux É., 2012. Evidence for farmer's active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. Agron. Sustain. Dev. 32, 703–714.

Métral R., Rapidel B., Delière L., Petitgenet M., Lafond D., Chevrier C., Bernard F-M., Serrano E., Thiolet-Scholtus M., Wery J., 2015. A prototyping method for the re-design of intensive perennial systems: the case of vineyards in France. Proceedings 5th International Symposium for Farming Systems Design, Montpellier, France. 2p.

Mulyarto A R., Salmon J-M., Neveu P., Buche P., Charnomordic B., 2014. Ontology-Based Model for Food Transformation Processes - Application to Winemaking. Communications in Computer and Information Science 478, 329-343. DOI: 10.1007/978-3-319-13674-5_30

Najm E., 2022. Raisonner sur des données en agroécologie : application à la sélection d'espèces végétales de service. Informatique [cs]. Université de Montpellier, 2022. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-03929963v2⟩

Neveu P., Domerg C., Fabre J., Nègre V., Gennari E., Tireau A., Corby O., Faron-Zucker C., Mirbel I., 2010. Using Ontologies of Software: Example of R Functions. Management Resource Discovery - Third International Workshop, RED, Paris, France, November 5, 2010, Revised Selected Papers DOI: 10.1007/978-3-642-27392-6_4

Simon L., Heinrich G., Lafond D., Guérin A., Guillermin P., Silmon S., Neveu P., Gary C., Metral R., 2021. SYGNAL, un outil de représentation des connaissances pour le diagnostic et la conception des systèmes viticoles. Application aux maladies du bois. *12ème Journée Scientifique Vigne–Vin, "Le numérique en viticulture et en oenologie"*, Montpellier SupAgro; Inrae, Mar 2021, Montpellier, France. ⟨hal-03352463⟩.

Simon S., Brun L., Guinaudeau J., Sauphanor B., 2011. Pesticide use in current and innovative apple orchard systems. Agronomy Sust. Developm. 31, 541–555

Simon S., Lesueur-Jannoyer M., Plénet D., Lauri P.-É., Le Bellec F., 2017. Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences. European Journal of Agronomy 82:320–330, http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.004

Vereijken P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. European Journal of Agronomy 7, 1–3, 235 50. doi:10.1016/S1161-0301(97)00039-7.

Wery J., van Ittersum M., Giller K., Meynard J.M., 2015. Systems analysis and design in agriculture: do we have a theory? FSD5 (Plenary Keynote; 400 participants) http://fsd5.european-agronomy.org/video/FSD/index.html

Pour citer cet article : David Lafond, Pascale Guillermin, Raphaël Metral, Pascal Neveu, Sylvaine Simon, *et al*.. AgroÉcoPérennes : Vers des systèmes de culture pérennes agroécologiques. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.41-54. 10.17180/ciag-2025-vol107-art04

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Albédo-Prairies : exploiter l'effet refroidissant de l'albédo des prairies comme levier d'atténuation du changement climatique, un atout majeur pour la durabilité de l'élevage de ruminants

Pierre MISCHLER [1], Jean Louis ROUJEAN[2], Alizée CHOUTEAU[3], Eric CESCHIA[2]

[1] Idele, 2 Chaussée Brunehaut, 80200 Estrées-Mons ;

[2] Univ Toulouse, CNES, CNRS, INRAE, IRD, CESBIO, 18 avenue E. Belin, bpi 2801, 31401 Toulouse, ;

[3] AFPF, 149 rue de Bercy, 75595 Paris, France

Correspondance : pierre.mischler@idele.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art05

Résumé

Le proj*et al*bédo-Prairies a mesuré de 2021 à 2023, la dynamique saisonnière de l'albédo (α) pour 7 prairies françaises, démontrant que l'albédo des prairies est plus élevé en automne qu'au printemps et plus faible en été. Il est réduit par l'intensité du pâturage et plus encore par la fauche. La sécheresse accentue la baisse d'α. L'albédo sert à calculer le forçage radiatif, négatif de -6,8 W/m² pour une prairie par rapport à un blé d'hiver, ce qui traduit le fait que les prairies ont un effet refroidissant sur le climat. Les mesures satellitaires confirment les tendances in situ d'albédo et fournissent une couverture étendue à l'échelle du territoire, qui est l'unité du paysage pertinente pour la gestion des terres et aussi pour juger de l'impact climatique régional. La mobilisation de l'albédo des prairies est un levier très prometteur vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique et se situe en termes d'impact au même niveau que le stockage de carbone dans le sol et la réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES).

Mots-clés : polyculture-élevage, forçage radiatif, séquestration carbone, satellite

Abstract: Using the albedo effect of grasslands to mitigate climate change: an asset for ruminant farming

The Albedo-Prairies project measured albedo dynamics from 2021 to 2023 for 7 temporary or permanent grasslands scattered across mainland France. The results show that the albedo of grasslands is higher between autumn and spring and lower in summer. It can be less or more reduced by grazing intensity and even more so by mowing the grass. Drought accentuates more the fall in albedo in summer. The albedo measured on the ground of these grasslands can be used to calculate a negative radiative forcing of -6.8 W/m² compared with winter wheat. This means that grasslands have a cooling effect on the climate. Satellite measurements confirm the albedo trends measured on the ground by providing extensive coverage at the scale of the territory, which is the relevant landscape unit for land management and for assessing the regional climatic impact. The grassland albedo is a promising lever for mitigating climate change, at a similar level as soil carbon storage and reduction of greenhouse gases (GHG) emissions.

Keywords: crop-livestock farming, radiative forcing, carbon sequestration, satellite

1. Le rôle de l'albédo sur le climat de la Terre

Les pratiques de gestion des sols et les activités anthropiques influencent le climat via des processus biogéochimiques d'émission ou d'absorption de GES et via des processus biogéophysiques tels que les

variations albédo (α) et de flux de chaleur en surface. La Terre reçoit l'énergie sous forme de rayonnement solaire et le restitue selon la composition de la surface et de l'atmosphère. Ce taux réfléchi, communément appelé albédo (α), est une grandeur qui se définit comme étant le rapport entre le rayonnement solaire réfléchi par une surface, ici terrestre, et le rayonnement reçu dans la gamme des longueurs d'ondes comprises entre 300 à 3000 nm. Il s'agit d'une quantité sans dimension variant entre 0 pour les surfaces noires (absorption de tout le rayonnement) et 1 pour les surfaces blanches (tout est réfléchi). L'albédo détermine ainsi l'énergie disponible pour chauffer l'air, le sol, pour évaporer l'eau et faire transpirer ou photosynthétiser les plantes. Une partie de l'énergie solaire retenue par les surfaces est réémise sous forme de chaleur (rayonnement infrarouge thermique à grande longueur d'onde). L'atmosphère retourne une partie de cette énergie vers la surface sous forme de rayonnement infrarouge : **c'est l'effet de serre**. Pour le réduire, outre diminuer la concentration en GES, on peut accroître l'albédo de surface pour accroître la part de rayonnement non bloqué par l'atmosphère et transmise vers l'espace.

L'usage des terres et les pratiques agricoles (aménagement, artificialisation, conversion des prairies en cultures) **entraînent des modifications des flux de GES** (CO_2, N_2O, CH_4, etc.), **d'énergie et d'eau qui impactent les climats locaux et globaux** (Georgescu *et al*., 2011). Depuis 1750, les changements d'usage des terres ont engendré une hausse d'α à l'origine d'un forçage radiatif[4] (FR) négatif de -0,25 Watt/m² (W/m²) attribué à la déforestation, l'urbanisation et la transformation des terres arables. Ce FR négatif a été jugé faible au regard du FR induit par les émissions de GES (+2,72 $W.m^{-2}$, rapport IPCC de 2021, Arias *et al*. 2021) sur lesquelles se sont portées les efforts avec l'initiative française 4 pour 1000 (Chabbi *et al*., 2017).

Mais, le FR lié aux changements d'albédo lié à l'usage des sols, apprécié à environ 10% du FR lié aux émissions de CO_2, est en réalité sous-estimé et une légère hausse d'albédo aurait un effet refroidissant conséquent (Chen *et al*. 2024). L'agriculture contribue pour 18,6 % des émissions de GES françaises, dont 60 % liés à l'élevage de ruminants (Citepa 2023). Le labour et le surpâturage contribuent à réchauffer le climat via une chute d'albédo car les sols nus ont souvent un albédo plus faible que les cultures et les prairies (Carrer *et al*, 2018 ; Pique *et al*. 2023).

2. Albédo et changement climatique : un état des lieux en agriculture

2.1. Pourquoi une faible utilisation des méthodes d'atténuation basées sur l'albédo ?

Pour moduler l'énergie absorbée par le système Terre, on invoque des méthodes dites SRM (Solar Radiation Management) et certaines ne sont pas sans risque. La dispersion d'aérosols sulfatés dans l'air proposée par Rasch *et al*. (2008), augmenterait l'albédo atmosphérique et entraînerait des changements climatiques non maîtrisés (Boucher *et al*., 2009). En revanche, la gestion agricole de l'albédo apparait comme une solution mieux contrôlée avec des changements progressifs et réversibles (Lenton et Vaughan, 2009). Le faible intérêt accordé à ce jour aux méthodes SRM est que les FR induits par les changements d'α de surface ont été sous-estimés à cause de l'utilisation de valeurs constantes d'albédo par type d'occupation du sol (Sieber *et al*., 2019).

Une autre raison est que, bien que les changements de pratiques et d'occupation du sol aient des effets équivalents sur les processus biogéophysiques (Luyssaert *et al*., 2014), les modèles de climat peinent à simuler les systèmes agricoles : ils simulent peu de cultures (blé, maïs) et pas l'effet des changements

[4] Le forçage radiatif représente la différence de bilan radiatif (puissance radiative reçue et puissance radiative émise par le système Terre) induite par un facteur climatique donné (e.g. émission de GES, changement d'occupation du sol). S'il est positif, le forçage radiatif entraine un réchauffement du système terre ; s'il est négatif, il entraine un refroidissement.

de pratiques, telles que les cultures intermédiaires et leurs effets sur les bilans de carbone et l'albédo (Ceschia *et al*., 2024). Des méthodes de conversion directe des effets albédo en équivalent CO_2 (Bright *et al*., 2019) permettent une comparaison avec les effets biogéochimiques (Muñoz *et al*., 2010 ; Ceschia *et al*., 2017), qui est d'un ordre de grandeur comparable au stockage de carbone (Carrer *et al*., 2018 ; Lugato *et al*., 2020 ; Pique *et al*., 2023).

2.2. Atténuer le changement climatique par effet albédo des agroécosystèmes: des leviers mobilisables

L'augmentation de l'α des surfaces agricoles a un effet refroidissement plus important aux latitudes supérieures à 30° (Doughty *et al*., 2011). En sélectionnant des espèces végétales aux propriétés morphologiques spécifiques ou à réflectance élevée des feuilles, le gain en α des cultures peut augmenter de 20 % alors la température diminue de 1°C en été pour une zone allant de l'Amérique du nord à l'Eurasie (Ridgwell *et al*., 2009). Les pratiques culturales jouent également un rôle important avec la mise en place de non-labour et le maintien des pailles en surface (gain d'α de 0.1). L'effet refroidissant peut atteindre 2°C les jours d'été les plus chauds (Davin *et al*., 2014). Des études montrent le service rendu par les cultures intermédiaires, avec un albédo augmenté et plus de carbone stocké dans le sol (Ceschia *et al*., 2017 ; Kaye & Quemada, 2017 ; Carrer *et al*., 2018 ; Lugato *et al*., 2020), alors que l'albédo du sol baisse avec la teneur en matière organique (Pique *et al*., 2023).

2.3. Quels sont les déterminants des dynamiques d'albédo dans les prairies ?

On recense à ce jour peu d'études (*in situ*, satellite) sur le potentiel d'atténuation de l'albédo par les prairies (permanentes gérées, temporaires, estives, toundras, savanes). Les valeurs oscillent entre 0,17 et 0,28 pour les prairies naturelles tempérées et boréales. Pour des prairies temporaires, des albédos de 0,19 à 0,22 ont été mesurés (Sieber *et al*., 2022a), voire 0,25 à 0,30 pour des estives (Gu *et al*., 2005). L'albédo varie selon la composition des espèces prairiales, liée au climat, à la fertilité des sols et aux pratiques de gestion. L'albédo varie aussi la rugosité végétale (Aguiar *et al*., 1996) et avec les propriétés des feuilles (orientation, concentration en chlorophylle, pilosité) (Song, 1999). La gestion des prairies, par fauche ou pâturage, enlève de la biomasse, et la fertilisation modifie le couvert végétal et sa contribution à l'albédo de la parcelle. En France où les sols sont plutôt sombres (sauf marnes ou sols calciques), l'albédo diminue avec la fauche et dans une moindre mesure selon l'intensité du pâturage car l'élimination du couvert végétal laisse le sol plus exposé (Mischler *et al*., 2022). Sur ces sols à faible α, un surpâturage entraîne une baisse significative d'α et génère un FR positif (réchauffement).

Ainsi, hors sols clairs, l'albédo est plus élevé pour les prairies gérées que pour les prairies non gérées en raison d'une meilleure fertilité des sols et d'une diminution du matériel végétal sénescent (Fan *et al*., 2011 ; Sieber *et al*., 2022b). Les conditions météorologiques ont aussi un rôle à jouer : un sol humide après une pluie, réduit son albédo de moitié (Sanchez-Mejia *et al*., 2014 ; Yang *et al*., 2020). L'effet est surtout marqué pour un sol visible pendant l'interculture ou sous une végétation peu développée ou sénescente (Duchon et Hamm, 2006 ; Wang *et al*., 2011 ; Ferlicoq et Ceschia, 2015 ; Mischler *et al*., 2022).

Compte tenu du manque de connaissances sur l'albédo des surfaces en herbe, l'objectif du projet Casdar Albédo-prairies a été de caractériser la variabilité spatio-temporelle de leur α en France métropolitaine, selon des modalités de gestion des prairies (intensité de pâturage, fauche) et de situations pédoclimatiques (texture, humidité du sol) contrastées. Il s'agissait d'explorer les possibilités d'accroitre l'α de la parcelle au territoire pour atténuer le réchauffement climatique. Les surfaces prairiales françaises ont globalement un albédo plus fort que les cultures et les forêts mais régressent régulièrement (-4,4 millions d'ha entre 1982 et 2018) au profit des cultures, de l'artificialisation des sols et de l'afforestation (Ballet, 2021). Augmenter la surface en prairies est donc un

levier majeur d'atténuation du changement climatique tant par le potentiel de stockage de carbone que par un albédo élevé.

Ce projet a donc analysé pour la première fois en France les variations de l'α des prairies. Les résultats ont fait l'objet de plusieurs publications, dont 7 dans le numéro 257 thématique de la revue Fourrages, dédié à l'albédo, pour les années 2021 et 2022. Cet article expose des résultats originaux de ce projet restant à valoriser en s'appuyant désormais sur 3 années de mesures, 2021 à 2023. Il est présenté ici, une estimation du forçage radiatif (FR) lié à l'effet α des prairies en France exprimée en W/m² et en équivalent CO_2, comparée au stockage de carbone dans le sol et aux émissions de GES agricoles.

3. Estimer l'albédo des prairies avec deux approches : des mesures au sol et des observations satellitaires

3.1. Des mesures *in situ* originales d'albédo (α) des prairies et la conversion en forçage radiatif (FR)

Des mesures ont été réalisées sur 7 prairies permanentes ou temporaires pâturées et parfois fauchées. Elles sont situées dans des fermes expérimentales de Chambres d'Agriculture, d'associations, de lycée agricole et de l'INRAE, dans des zones pédoclimatiques contrastées selon un transect entre le Finistère et l'Ardèche. Les mesures instantanées d'α et de luminosité exprimée en Watt (W) /m² (albédomètre NR01, Hukseflux, positionné à 2,5 m du sol), de température (HygroVUE), de pluviométrie (mm) et d'humidité du sol (entre 0 et 12 cm, CS655, Campbell) ont été moyennées à l'échelle de la journée pour l'analyse des dynamiques annuelles d'α. L'albédo d'une prairie varie en fonction d'évènements tels que les conditions météorologiques et les opérations techniques (Mischler *et al*., 2022).

Nos analyses portent sur l'effet d'une pluie sur un sol sec pendant le printemps et l'été, la fauche, le pâturage. Les variations d'albédo (Δα, en %) sont mesurées en faisant la différence entre une référence, ici la moyenne d'α des 5 jours (α-5j) précédant l'évènement et la baisse d'α qui survient ensuite jusqu'au jour où ce dernier recouvre une valeur similaire à α-5j ± 2,5 % (seuil empirique), dont la durée ou période (p) est quantifiée. Si un pâturage ou une fauche surviennent avant la remontée d'α à son niveau initial, c'est la date du nouvel évènement qui détermine la fin de la période de variation d'α. Si l'α ne baisse pas, c'est la valeur moyenne d'albédo de la durée du pâturage, qui est comparée à α-5j. Cette situation survient quand le chargement animal est faible ou quand l'herbe a une croissance importante. L'effet du pâturage sur l'α a pris en compte le chargement instantané de ruminants corrigé par la part d'herbe dans la ration (exprimé en UGB/ha/jour), car la quantité d'herbe enlevée de la parcelle influe sur la variation d'α.

Le calcul du FR induit par un changement d'albédo se calcule à partir de 3 variables selon la formule : $\boldsymbol{FR_{\alpha} = -Rg \times T_A \times \Delta\alpha}$, où FRα est le forçage radiatif exprimé en W/m² au sommet de l'atmosphère, R_g est le rayonnement solaire incident à la surface, T_A la transmittance atmosphérique (la clarté de l'atmosphère) et Δα la différence entre la valeur d'α initiale (α-5j) servant de référence (avant changement d'occupation du sol ou de pratique) et finale après changement, calculé selon le modèle Fu-Liou (Schimel *et al*., 1995). L'emploi de données quotidiennes d'α permet un calcul plus précis du FR (Ceschia *et al*., 2024).

La valeur d'albédo de référence pour calculer "Δα" traduit un changement d'usage de la surface. Ce peut être par exemple un sol nu, une culture, un couvert végétal, etc. (Munoz *et al*., 2010 ; Ceschia *et al*., 2017 ; Sieber *et al*., 2022a). La comparaison peut aussi se faire entre assolements de systèmes agricoles ou sur leur l'évolution au cours du temps. Ce changement d'usage des sols génère une évolution d'albédo, dont on mesure l'impact sur le FR (Mischler *et al*., 2024b). La plupart des sols en France ayant un albédo faible, inférieur à 0,15 (Carrer *et al*., 2018), un albédo de sol nu α_{ref}=0,15 a été retenu comme référence, ainsi qu'un blé tendre d'hiver (α_{ref}=0,164), pour réaliser les calculs de FR des

prairies. Pour calculer l'effet sur le FR de la fauche, du pâturage ou d'une humectation de sol, c'est α_{ref} =α-5j qui a été utilisé. La conversion du FR (W/m²) en équivalents CO_2 a été faite sur la base de la méthode de conversion de Bright (2019), pour comparer l'eff*et al*bédo aux bilans d'émissions de GES et à la séquestration du CO_2 sous forme de carbone.

Des stations de Météo-France proches des 7 sites expérimentaux ont servi de base de comparaison de la météo des 3 années étudiées, à une période de 10 ans (2013 à 2022) où la température moyenne a été de 12,6°C et la pluviométrie de 915 mm. Pour nos 7 sites expérimentaux (Tableau 1), 2021 a été en moyenne plus fraiche (11,5°C) et un peu moins pluvieuse (777 mm). 2022 a été plus chaude (13°C) et plus sèche (654 mm), particulièrement au troisième trimestre. Enfin, 2023 a aussi été plus chaude (13°C) mais avec une pluviométrie plus proche de la moyenne (852 mm) des 10 années de référence.

3.2. Analyse de l'albédo à l'échelle d'assolements et du territoire français

23 cas-types Inosys Réseaux d'élevage ont fait l'objet d'un calcul d'albédo de l'assolement. Un cas-type est une modélisation du fonctionnement technico-économique d'un système agricole, construite à partir du fonctionnement réel de fermes, appartenant à une même case typologique dans un territoire donné. Ils décrivent des exploitations des territoires où se trouvent les 7 sites expérimentaux et sont ici comparés à un système de référence n'ayant que des cultures :50 % de blé, 25 % de maïs et 25 % de colza.

Pour le territoire français, une simulation a été réalisée sur l'évolution de l'albédo des surfaces agricoles et forestières entre 1950 et 2022. Les surfaces de 1950 ont servi de référence pour le calcul du FR. L'albédo a été calculé avec une feuille de calcul Excel, Sim'α, créée *ad hoc* (Mischler *et al*., 2022). Elle mobilise des dynamiques d'albédo des prairies, acquises pendant le projet et pour les cultures et les intercultures, des données fournies par le CESBIO. Sim'α estime l'albédo sur la base des dynamiques annuelles d'α des végétaux concernés au prorata de leurs surfaces, puis transformé en forçage radiatif.

3.3. Analyse de l'albédo par satellite

L'observation de l'albédo depuis l'espace est l'unique moyen de s'inscrire dans une fourniture régulière spatialisée de données. Cela a été possible grâce à la paire de satellites Sentinel-2 qui propose des résolutions de 10 mètres tous les 5 jours. Cela permet un suivi de l'albédo (Roujean *et al*., 2024) et de comparer les parcelles entre elles, aussi de comparer les écarts de forçage radiatifs entre 6 des prairies étudiées et des parcelles de maïs positionnées à proximité. La Figure 1 illustre les cartes d'albédo Sentinel-2 par type de surfaces pour trois fermes expérimentales.

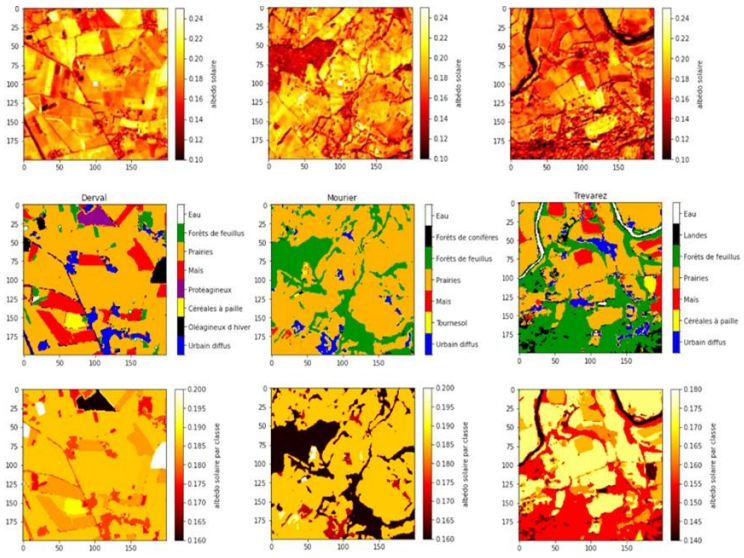


Figure 1 : L'albédo satellitaire structuré en classes du paysage pour 3 fermes expérimentales : Derval (Loire Atlantique), Mourier (Haute-Vienne), Trévarez (Finistère).

On note une forte disparité entre les albédos des prairies, du fait de différences entre les propriétés de sol, des espèces, et aussi du climat. La prairie a d'ailleurs un pouvoir réfléchissant bien supérieur à celui des forêts et dans une moindre mesure, supérieur aux cultures qui ont cependant un côté moins pérenne.

4. En France, les prairies ont un effet refroidissant sur le climat

4.1. Comprendre les variations de l'albédo des prairies

Les dynamiques annuelles d'albédo des prairies suivent un schéma similaire pour les 3 années étudiées (Figure 2). L'albédo est plus élevé de l'automne au milieu du printemps (≈ fin avril), puis diminue jusqu'à la fin de l'été, avant d'augmenter. Une forte variabilité inter-journalière liée à la météorologie est observée d'octobre à mars : les périodes d'alternance de givre matinal ou de rosée (α monte) et leur absence (α baisse) expliquent cette variabilité (Mischler *et al*., 2022). De mars à septembre, les variations sont liées aux opérations techniques (fauche (F), pâture (P)) et aux périodes plus sèches, dont l'exemple marquant de la sécheresse (S) de 2022, où l'albédo chute brutalement en août. L'assombrissement du sol à la suite d'une pluie et un couvert végétal dégradé laisse apparaître le sol, explique cette baisse sur plusieurs semaines sur tous les sites (Mischler *et al*., 2024a). Cette baisse d'albédo est plus marquée au Pradel en Ardèche où l'été est chaud et sec et sur le site de Thorigné où le sol a une réserve hydrique limitée.

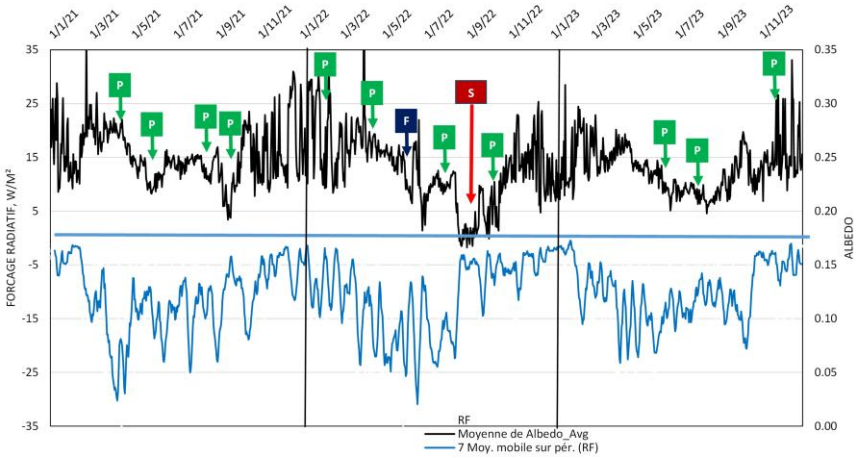


Figure 2 : dynamiques annuelles d'albédo et de forçage radiatif (2021-2023), exemple du site du Mourier. Albédo = courbe noire, forçage radiatif = courbe bleue, P = pâturage, F = fauche, S = sécheresse.

4.2. Les prairies ont un effet refroidissant sur le climat non négligeable

Les données acquises (7 sites x 3 années) nous permettent de proposer une valeur moyenne de forçage radiatif des prairies : -8,3 W/m² (par rapport à un sol nu) et –6,8 W/m² soit -1443 kgeqCO_2/ha/an (par rapport à un blé d'hiver), en termes de bilan d'énergie. C'est comparable au stockage de carbone dans le sol estimé par une expertise collective d'INRAE (Launay *et al*., 2021). Ces données sont similaires à d'autres travaux (Sieber, 2022a) et à positionner par rapport aux scénarios climatiques RCP4.5 du GIEC qui projettent un réchauffement planétaire de 2°C , soit un surplus d'énergie et un FR de +4,5 W/m².

Tout au long de l'année, les dynamiques d'albédo et de FR (Tableau 1) ont des valeurs absolues plus élevées au second trimestre (de -13,5 à -13,7 W/m², en comparaison à un sol nu, grâce à un rayonnement incident plus élevé au printemps, quand les jours s'allongent : plus de lumière est alors réfléchie pour un même albédo. Au troisième trimestre, l'effet refroidissant est un peu plus faible (FR de -8,4 à -10,7 W/m²), tout en restant très négatif : la luminosité du soleil reste élevée et les jours sont encore longs, mais l'albédo des prairies baisse en été. En automne et en hiver, l'effet refroidissant des prairies est plus limité, mais présent (-4 à -7 W/m²). Malgré un albédo plus élevé aux trimestres 1 et 4, le plus faible effet refroidissant s'explique par un rayonnement incident limité par des journées plus courtes et moins d'énergie lumineuse réfléchie. La tendance est la même en comparant avec un blé d'hiver.

Le forçage radiatif varie entre les sites de mesure, l'écart maximal constaté est de 36 % : -9,1 W/m² au Mourier et -5,8 W/m² au Rheu (tableau 2). Il s'explique (1) par l'albédo de chaque site, soit une combinaison d'α de la prairie et du sol quand ce dernier est visible (écart jusque 11 %), (2) sa dynamique annuelle où il y a une baisse / hausse saisonnière plus ou moins importante entre sites et

(3) le rayonnement solaire incident (écart jusque 21 %), plus important en Ardèche (398 W/m²) que dans le Finistère où la couverture nuageuse est plus importante (316 W/m²).

Tableau 1 : Données météorologiques, albédo et forçage radiatif moyen des 7 sites expérimentaux. T1 = Trimestre 1, ref. = α de référence pour le calcul du FR (α=0,15 pour le sol nu, α=0,164 pour un blé d'hiver), le rayonnement incident moyen annuel est la moyenne journalière, T° = température.

année	Rayonnement incident (W/m²)	Humidité massique du sol (%)	Cumul de pluie (mm)	T°C moyenne	**Albédo (de 0 à 1)**	FR (W/m²) ref. sol	FR (W/m²) ref. blé
2021	343	31 %	777	11,5	**0,233**	-8,7	-7,2
T1	267	38 %	146	6,3	**0,245**	-6,7	-5,8
T2	415	27 %	223	13,1	**0,235**	-13,7	-11,5
T3	391	25 %	186	17,8	**0,220**	-9,6	-7,7
T4	224	36 %	222	8,4	**0,234**	-4,5	-3,8
2022	362	24 %	654	13,0	**0,224**	-8,4	-6,8
T1	256	37 %	113	6,9	**0,243**	-6,3	-5,4
T2	439	20 %	147	15,2	**0,229**	-13,5	-11,1
T3	447	12 %	100	19,7	**0,201**	-10,5	-8
T4	205	29 %	294	10,1	**0,231**	-3,9	-3,2
2023	350	26 %	852	13,0	**0,225**	**-8**	**-6,5**
T1	249	36 %	179	6,8	**0,247**	-6	-5,2
T2	434	26 %	157	14,9	**0,231**	-13,5	-11,1
T3	409	18 %	192	19,7	**0,205**	-8,4	-6,3
T4	214	21 %	323	10,2	**0,223**	-4	-3,3

Tableau 2 : Albédo, forçage radiatif et rayonnement incidents moyens, pour les 7 sites expérimentaux (2021 à 2023). Le forçage radiatif est calculé en comparaison d'une surface de référence, ici un blé d'hiver (α=0,164).

Site (département)	Trévarez (29)	Le Rheu (22)	Derval (44)	Thorigné (47)	Mourier (79)	Jalogny (71)	Pradel (07)
Albédo (de 0 à 1)	**0,234**	**0,218**	**0,236**	**0,225**	**0,242**	**0,218**	**0,216**
Forçage radiatif (W/m²) ref. blé	-6,3	-5,8	-7,6	-6,3	-9,1	-6,1	-6,8
Rayonnement incident (W/m²)	316	340	349	343	364	353	398

4.3. A l'inverse de la sécheresse, la fauche et le pâturage ont un effet limité sur le FR

La fauche et le pâturage réduisent transitoirement l'albédo : de 2021 à 2023, le pâturage a entraîné en moyenne une baisse d'α de -4,9 % pendant 14 jours et conforte nos premiers résultats (Mischler *et al*., 2024a). La baisse est d'autant plus forte que le chargement animal augmente, mais n'est significative que pour les chargements les plus élevés (Mischler *et al*., 2024c). La fauche entraîne une baisse plus importante que le pâturage : -11,6 % en moyenne, pendant 21 jours. Ces valeurs sont un peu plus faibles que nos premiers résultats (-14 % et 26 jours) en raison de l'intégration des données de 2023. Les pluies sur un sol sec au printemps et en été diminuent l'albédo de -8,5 % pendant 17 jours par assombrissement du sol, d'autant plus que la végétation est peu dense et sénescente. C'est un peu plus faible que nos premiers résultats (-9,1 % et 22,1 jours), en raison de l'absence de sécheresse en 2023, contrairement à 2022 où l'albédo s'était effondré en août : -19,2 % pendant 58 jours en moyenne pour les 7 sites (Mischler *et al*. 2024c). L'écart maximum de FR entre sites (3,3 W/m²) est plus important que l'effet des pratiques (pâturages et fauches) avec une perte non significative (p=0,05) d'effet refroidissant de +0,42 W/m² sauf pour Trévarez où le FR est significativement en hausse de +0,95 (+202 kg $eqCO_2$/ha/an), en raison d'une combinaison de fauches et de chargements animaux plus élevés. La sécheresse de 2022 a eu un effet plus important que la fauche et le pâturage. Elle a induit

une limitation significative (p=0,05) d'effet refroidissant, de +0,93 W/m² en moyenne soit +195,1 kg eqCO_2/ha/an. Ce FR positif a été de +0,28 W/m² à Trévarez où il n'y a pas eu de pluie pendant 24 jours en juillet-aout et jusqu'à +1,64 W/m² au Pradel, avec 142 jours sans pluie entre avril et mi-août 2022 (Mischler *et al*. 2024c), le FR des prairies restant cependant négatif.

Les pratiques de gestion affectent donc moins l'effet refroidissant des prairies qu'une sécheresse, pour peu que l'intensité du pâturage reste modérée. Une question restant en suspens est celle du cumul de pâturage intensif avec une période sèche qui risque de dégrader durablement la prairie et l'albédo. Pour le préserver, il faudrait renoncer à l'utilisation d'une parcelle, ce qui est conditionné par la présence de stock de fourrage.

4.4. L'albédo satellitaire pour passer de la parcelle au territoire

Les albédos satellitaires ont été comparés (Roujean *et al*., 2024) favorablement avec les mesures sol, avec un biais nul et une erreur quadratique moyenne de 0,02 en unités de réflectance, ce qui répond bien à la précision attendue pour l'étude (Figure 3). Six sites expérimentaux (hors site du Rheu) ont pu faire l'objet d'une comparaison entre l'albédo satellitaire des prairies équipées d'un albédomètre et d'une parcelle de maïs située à proximité. En moyenne, la prairie a un FR=-0,81 W/m² par rapport au maïs, ce qui est attendu, mais plus faible qu'espéré.

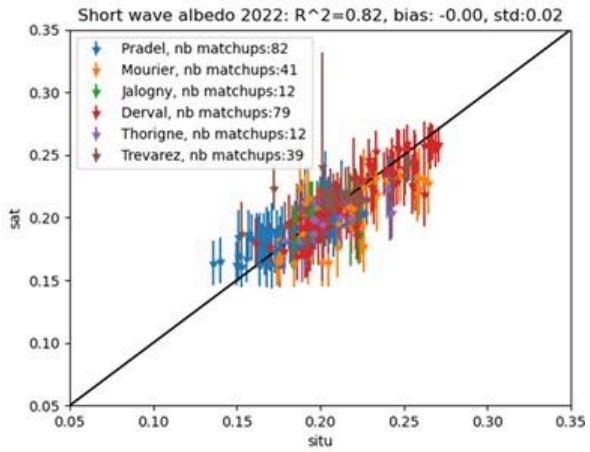


Figure 3 : Comparaison entre albédos satellitaires (sat) *et al*bédos du sol (situ).

Cela s'explique par un FR positif (+4,28 W/m²) de la prairie temporaire de Thorigné d'Anjou (Tableau 3), qui était dégradée en 2020 en raison (1) d'une implantation médiocre selon les responsables du site, mais aussi (2) d'une sécheresse et d'un sol à faible réserve hydrique, qui ont entraîné une importante dégradation du couvert et peut-être (3) par le choix de la parcelle de maïs qui n'était pas présente dans cette exploitation.

Tableau 3 : forçage radiatif (FR) d'une prairie en comparaison à un maïs (juillet 2020 à novembre 2021)

Site, département	Trévarez, 29	Derval, 44	Thorigné, 47	Mourier, 79	Jalogny, 71	Pradel, 07
FR (W/m²)	**-3,22**	**-0,05**	**+4,28**	**-1,64**	**-2,92**	**-1,29**

Il faut donc être prudent quant à l'interprétation de ce résultat. La ferme de Derval présente aussi un écart de FR faible (-0,05 W/m²), elle était dans la même situation de sécheresse en 2020. Hors Thorigné et Derval, l'écart de FR entre prairie et maïs des 5 autres sites est de -2,26 W/m². L'imagerie satellitaire a ainsi un potentiel intéressant de suivi d'albédo d'un territoire et de son évolution puisqu'il n'est pas nécessaire d'instrumenter chaque parcelle *in situ*.

5. Préserver les surfaces prairiales : un enjeu important pour atténuer le changement climatique grâce à l'eff*et al*bédo

Les prairies des 7 sites étudiés ont un FR de -6.8 W/m² par rapport à un blé d'hiver. Qu'en est-il si on compare des cas-types de systèmes d'élevage ou de polyculture-élevage à des systèmes n'ayant que des cultures ? Nos calculs montrent que l'effet refroidissant augmente avec la part d'herbe dans l'assolement (Tableau 4) : le FR, proche de 0 W/m² pour le cas-type sans herbe « engraisseur de jeunes bovins et cultures de vente » des Pays de la Loire, peut aller jusque -6,4 W/m² avec le cas-type

« ovin herbager, 500 brebis », du Limousin. Malgré la présence de 8 % de cultures et grâce à un albédo des prairies plus élevé, le FR de ce cas-type est supérieur aux cas-types « 100 % herbe » de Bourgogne et de Rhône-Alpes. La droite de régression entre la valeur d'albédo en fonction du pourcentage d'herbe des cas-types (Tableau 4) donne un coefficient de détermination élevé (r^2 = 0,75, p<0,0001), tout comme le forçage radiatif (r^2= 0,78, p<0,001). La légère dispersion des données s'explique par les dynamiques d'albédo des prairies un peu différentes selon les régions (Tableau 2).

Tableau 4 : Albédo et forçage radiatif de 23 cas-types Inosys en fonction de la part d'herbe dans l'assolement. Assolement système de référence : blé = 50 % des surfaces, colza 25 % et maïs 25 %. Cultures = cultures de vente, BL = bovin lait, BV = bovin viande, CL = caprin lait, OV = ovin viande.

Région	Filière	Cas-Type	SAU	% herbe	% cultures	Albédo*	FR	kg eqCO2 /ha/an
Rhône alpes	CL	Caprins fromagers petit volume	12	100%	0%	0.222	-4.4	-934
Bourgogne	BV	Naisseur, mâles et femelles maigres	280	100%	0%	0.213	-4.5	-948
Limousin	OV	2 périodes d'agnelage, 500 brebis, herbager	80	92%	8%	0.243	-6.4	-1354
Pays de la Loire	BV	Naisseur AB	94	91%	9%	0.222	-4.7	-1001
Bourgogne	BV	Naisseur mâles et femelles maigres	129	91%	9%	0.209	-4.1	-875
Limousin	OV	2 périodes d'agnelage, 800 brebis, herbager	130	88%	12%	0.239	-6.1	-1294
Bourgogne	BV	Naisseur, mâles maigres et femelles finies	165	85%	12%	0.206	-3.9	-819
Rhône alpes	CL	Caprins fromagers moyen volume	25	84%	16%	0.213	-3.8	-804
Bourgogne	BV	Naisseur, mâles et femelles finies	190	80%	14%	0.204	-3.6	-771
Rhône alpes	CL	Caprins fromagers grand volume	57	79%	21%	0.210	-3.5	-743
Pays de la Loire	BV	Naisseur engraisseur semi intensif	85	74%	13%	0.214	-3.8	-808
Bretagne	BL	Lait spécialisé, normande, silo fermé 3 mois	86	66%	7%	0.220	-4.7	-997
Bourgogne	BV	Naisseur mâles et femelles maigres, avec cultures	125	66%	34%	0.198	-3.1	-664
Bretagne	BL	Lait spécialisé silo fermé 4 mois (+Génisses Viande)	68	59%	28%	0.216	-4.5	-957
Pays de la Loire	BL	Lait spécialisé, silo ouvert, 30% de maïs dans la SFP	92	57%	21%	0.213	-3.7	-776
Bretagne	BL	Lait spécialisé, silo fermé 2 mois (+ bœufs)	102	54%	24%	0.206	-3.4	-722
Bretagne	BL	Lait spécialisé, maïs, grand troupeau	142	48%	15%	0.201	-3.0	-639
Pays de la Loire	BL	Lait spécialisé, silo ouvert, 40% de maïs dans la SFP	91	41%	29%	0.199	-2.5	-530
Bourgogne	BV	Naisseur mâles femelles maigres, grandes cultures	175	38%	62%	0.185	-2.0	-424
Bretagne	BL	Lait spécialisé, maïs	86	36%	30%	0.193	-2.3	-486
Pays de la Loire	BL	Lait et cultures	158	29%	50%	0.188	-1.7	-362
Pays de la Loire	BV	Engraisseur de JB en zone de Bocage	75	4%	53%	0.158	0.6	132
Pays de la Loire	BV	Engraisseur de JB et cultures de vente	88	0%	76%	0.163	0.1	16

*albédo de l'assolement.

Les résultats issus de ces 23 situations contrastées en termes d'assolements et de pédoclimat, confortent nos premiers résultats obtenus sur un nombre plus limité de situations (Mischler *et al*., 2022). Les systèmes ayant une part de culture importante peuvent facilement améliorer leur albédo et leur effet refroidissant, en implantant soit de l'herbe, soit des couverts d'interculture, dès que c'est possible (Ceschia *et al*., 2017 ; Mischler, 2024b). Ainsi, +10 % d'herbe dans la surface agricole utile, représente un effet refroidissant jusqu'à -0.68 W/m² (ou -144 kgeqCO_2/ha/an).

L'application à un territoire plus vaste du maintien ou du développement d'herbe et donc de l'albédo, peut contribuer de manière non négligeable à l'atténuation du changement climatique. Nous avons simulé l'impact sur le FR de l'évolution des surfaces agricoles en France depuis 1950. Les surfaces en herbe y ont régressé de 17,4 millions d'ha à 12,7 millions d'ha entre 1950 et 2020, les forêts ont progressé d'une surface comparable et des cultures annuelles ont connu un développement important (+3 millions d'hectares pour le colza, le maïs et le tournesol). L'albédo des forêts et des cultures est

plus faible que celui des prairies. Durant la période considérée, il a baissé de 0.191 à 0.173 sur ces surfaces forestières et cultivées qui correspondent à environ 70 % du territoire métropolitain (Figure 4). Cela augmente le FR de +1,76 W/m^2 (effet réchauffant), qui va de pair avec la diminution des teneurs en matière organique des sols par minéralisation liée à la mise en culture de surfaces en prairies.

Atténuer le changement climatique passe par l'emploi de pratiques stockantes de carbone dans le sol. Ces effets biogéochimiques peuvent se combiner avantageusement avec l'effet biophysique lié à l'albédo. Nous avons simulé avec nos références, la substitution de 1 million d'hectares de blé par des prairies (FR=-6,8 W/m²) sur les 26,8 millions de terres arables en France (https://www.insee.fr/fr/statistiques). Cela correspondrait à un FR de -0,25 W/m² ou 54 kgeqCO_2/ha/an, soit l'équivalent de 1,4 million de tonnes équivalent CO_2 en termes de bilan d'énergie. Cet effet biophysique va de surcroît – et c'est une bonne nouvelle - dans le même sens d'atténuation que le stockage de carbone.

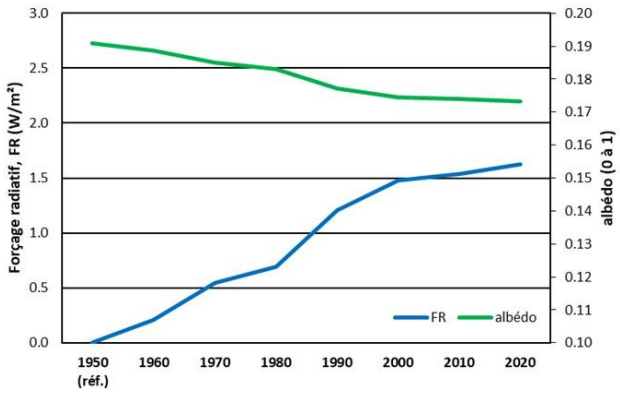


Figure 4 : Simulation de l'évolution de l'albédo des surfaces agricoles et du forçage radiatif en France métropolitaine, entre 1950 (année de référence pour le calcul du forçage radiatif) et 2020.

6. Conclusion : l'albédo des prairies, un levier de plus pour atténuer le changement climatique en élevage de ruminants

Les émissions de GES de l'élevage contribuent au réchauffement de l'atmosphère. Les réduire peut passer par des leviers techniques, tel que réduire l'intervalle entre vêlages pour limiter le nombre d'animaux improductifs, la gestion des engrais minéraux et organiques ou encore le machinisme. La baisse actuelle du cheptel français liée à des cessations d'activités, y contribue aussi, avec le risque de voir encore diminuer les surfaces en prairies, remplacées par des cultures et en conséquence une baisse simultanée du stock de carbone dans le sol et de l'albédo qui génère un effet réchauffant sur le climat.

Une réflexion nécessaire sur le maintien des prairies et voire l'accroissement du taux de couverture du sol dont elles peuvent avantageusement contribuer en termes d'albédo, est à mener. Sachant que les *« prairies »* dans leurs diversités représentent 26 % des surfaces des terres émergées selon la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), l'eff*et al*bédo pourrait être mobilisé comme levier en plus du stockage de carbone et de la réduction des émissions de GES agricoles, dans les situations les plus appropriées citées dans la bibliographie (latitudes supérieures à 30°, sols sombres).

D'autres travaux de recherche pourraient être menés sur le choix variétal des cultures ou des espèces fourragères. En effet, l'écart d'albédo peut aller jusqu'à 20 % entre variétés d'une même espèce de blé (Serban *et al.*, 2011). Pour prolonger ces travaux, un nouveau projet Casdar Albaatre-Systèmes a démarré en 2024. Il est centré sur l'impact de l'albédo de surfaces fourragères (colza, sorgho, méteils…), un travail exploratoire sur la réflectance d'espèces prairiales, de la modélisation et de la co-conception de systèmes adaptés au changement climatique.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Jean-Louis Roujean : https://orcid.org/0000-0003-2340-8394

Eric Ceschia : https://orcid.org/0000-0001-5941-752X

Contributions des auteurs

Mischler P : Chef de projet & analyse de données ; Roujean JL : analyse données satellitaire, expertise scientifique ; Ceschia E. : expertise scientifique ; Chouteau A. : communication du projet

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Merci aux partenaires du projet, techniciens, ingénieurs, chercheurs pour leurs contributions.

Déclaration de soutien financier

Le projet Casdar Recherche Technologique porté par Idele a été soutenu par le fond Casdar.

Références bibliographiques

Aguiar, M.R., Paruelo, J.M., Sala, O.E., Lauenroth, W.K., (1996) Ecosystem Responses to Changes in Plant Functional Type Composition: Example from the Patagonian Steppe. Journal of Vegetation Science, 7(3): 381-390.

Arias, P.A. *et al*, 2021: Technical Summary. In Climate Change 2021: ThePhysical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen,L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu,and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33−144.doi:10.1017/9781009157896.002.

Ballet B. (2021) : « L'occupation du sol entre 1982 et 2018 », Agreste - les dossiers- 32p.

Boucher O, Lowe JA, Jones CD (2009) Implications of delayed actions in addressing carbon dioxide emission reduction in the context of geo-engineering. Clim Chang 92:261.

Bright, R.M., O'Halloran, T.L. (2019). Developing a monthly radiative kernel for surface albedo change from satellite climatologies of Earth's shortwave radiation budget: CACK v1.0. Geoscientific Model Development 12, 3975–3990.

Carrer, D., Pique, G., Ferlicoq, M., Ceamanos, X., Ceschia, E., (2018) What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops. Environmental Research Letters 13, 044030.

Ceschia E, Mary B, Ferlicoq M, Pique G, Carrer D, Dejoux J F & Dedieu G (2017) Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires Innov. Agron. 62-4 43–58.

Ceschia E., Ferlicoq M., Mischler, P., Roujean J.-L. (2024). La gestion de l'albédo des surfaces continentales: un levier d'atténuation du changement climatique ?, Fourrages 257, 29-40.

Chabbi, A., Lehmann, J., Ciais, P., Loescher, H.W., Cotrufo, M.F., Don, A., SanClements, M., Schipper, L., Six, J., Smith, P., Rumpel, C., (2017a) Aligning agriculture and climate policy. Nature Climate Change 7, 307–309.

Jiquan Chen *et al*. (2024). Overlooked cooling effects of albedo in terrestrial Ecosystems, Environmental Research Letters. 19 093001, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad661d

Citepa, (2023) Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten, 575 p.

Davin, E. L., Seneviratne S.I., Ciais P., Olioso A., Wang T. (2014) Preferential Cooling of Hot Extremes from Cropland Albedo Management. Proceedings of the National Academy of Sciences 111 (27): 9757–61. doi:10.1073/pnas.1317323111.

Doughty CE, Field CB, McMillan AMS (2011). Can crop albedo be increased through the modification of leaf trichomes, and could this cool regional climate? Climatic Change 104: 379-387.

Duchon CE, Hamm kg (2006) Broadband Albedo Observations in the Southern Great Plains. Journal of Applied Meteorology and Climatology 45: 210-235.

Fan, L., Ketzer, B., Liu, H. Bernhofer, C., (2011) Grazing effects on seasonal dynamics and interannual variabilities of spectral reflectance in semi-arid grassland in Inner Mongolia. Plant and Soil, 340(1): 169-180.

Ferlicoq M. (2016). Comparaison pour les agroécosystèmes des contributions biogéochimiques et biophysiques au forçage radiatif net pour l'identification de leviers d'atténuation au changement climatique. Thèse de doctorat Université Paul Sabatier, 357p.

Ferlicoq, M., Ceschia, E., 2015. Ferlicoq M., Ceschia E., (2015) La gestion de l'albédo des surfaces cultivées. In: Evaluer et agir par Bourges Bernard, Gourdon Thomas, Broc Jean-Sébastien (Coord). Presses des MINES, collection Développement durable, 2015. 386 pp. ISBN: 9782356712332.M.

Georgescu, M., Lobell D.B., Field C.B. (2011) Direct Climate Effects of Perennial Bioenergy Crops in the United States. Proceedings of the National Academy of Sciences 108 (11): 4307–12. doi:10.1073/pnas.1008779108.

Gu S., Tang Y., Cui X., Kato T., Du M., Li Y., Zhao X. (2005) Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai–Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 129(3): 175-185.

Kaye, J.P., Quemada, M., (2017a) Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. Agronomy for Sustainable Development 37.

Launay C., Constantin J., Chlebowski F., Houot S., Graux A.I., Klumpp K., Martin R., Mary B., Pellerin S. and Therond O. (2021) Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling. Global Change Biology 27, 1645–1661.

Lenton, T. M., Vaughan N.E. (2009) The Radiative Forcing Potential of Different Climate Geoengineering Options. Atmos. Chem. Phys. 9 (15): 5539–61. doi:10.5194/acp-9-5539-2009.

Lugato, E., Cescatti, A., Jones, A., Ceccherini, G., Duveiller, G. (2020) Maximising climate mitigation potential by carbon and radiative agricultural land management with cover crops. Environ. Res. Lett. 15, 094075.

Luyssaert, S., Jammet M., Stoy P. C., Estel S., Pongratz J., Ceschia E., Churkina G., *et al*. (2014) Land Management and Land-Cover Change Have Impacts of Similar Magnitude on Surface Temperature. Nature Climate Change 4 (5): 389–93. doi:10.1038/nclimate2196.

Mischler P., Ferlicoq M., Ceschia E., Kerjose E. (2022) L'albédo, un levier d'atténuation du changement climatique méconnu : quel potentiel d'atténuation pour les prairies ? Fourrages, 251, 1-16.

Mischler P., Ceschia E., Ferlicoq M. (2024a). Contribution de l'albédo de prairies gérées, pour contribuer à l'atténuation du changement climatique, Fourrages 257, 41-56.

Mischler P., Kerjose E., Ceschia E., Ferlicoq M. (2024b). Impact sur l'albédo du pâturage, de la fauche, de l'implantation de culture intermédiaire et de la part d'herbe dans un assolement. Fourrages 257, 65-73

Mischler P., Ferlicoq M. and Ceschia E., 2024c, Grassland albedo: a climate change mitigation lever complementary to carbon sequestration, p323-325, in EGF, Yellow Book, Volume 29, EGF 2024

Muñoz, I, Campra, P, Fernandez-Alba, AR. (2010) Including CO2-Emission Equivalence of Changes in Land Surface Albedo in Life Cycle Assessment. Methodology and Case Study on Greenhouse Agriculture. International Journal of Life Cycle Assessment 15 (7): 672–81.

Pique G., Carrer D., Lugato E., Fieuzal R., Garisoain R., Ceschia E. (2023). About the Assessment of Cover Crop Albedo Potential Cooling Effect: Risk of the Darkening Feedback Loop Effects. Remote Sensing, 15, https://dx.doi.org/10.3390/rs15133231.

Rasch PJ, *et al* (2008) An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. Philos T R Soc A 366(1882):4007–4037.

Ridgwell, A., Singarayer, J.S., Hetherington, A.M., Valdes, P.J. (2009) Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-geoengineering. Current Biology 19, 146–150.

Roujean J.-L., Saulquin B., Auclair J. (2024). L'albedo : un outil spatial pour valoriser le rôle des prairies. Fourrages 257, 57-63.

Sanchez-Mejia Z.M., Papuga S.A., Swetish J.B., Van Leeuwen W.J.D., Szutu D., Hartfield K.,(2014) Quantifying the Influence of Deep Soil Moisture on Ecosystem Albedo: Role of Vegetation. Water Resour. Res. 50, 4038–4053.

Schimel, D. *et al*. (1995): « The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change « , Climate Change 1995, . (eds Houghton, J. T. *et al*., Cambridge Univ. Press, Cambridge) 65-131.

Şerban G., Tudor Cotfas D., Cotfas P.A., (2011) Significant differences in crop albedo among Romanian winter wheat cultivars. Romanian Agricultural research, NO. 28, 2011.

Sieber P, Ericsson N, Hansson P-A (2019) Climate impact of surface albedo change in Life Cycle Assessment: Implications of site and time dependence. Environmental Impact Assessment Review 77: 191-200.

Sieber P, Böhme S, Ericsson N, Hansson P-A (2022a) Albedo on cropland: Field-scale effects of current agricultural practices in Northern Europe. Agricultural and Forest Meteorology 321: 108978. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108978

Sieber P, Ericsson N, Hammar T, Hansson P-A (2022b) Albedo impacts of current agricultural land use: Crop-specific albedo from MODIS data and inclusion in LCA of crop production. Science of The Total Environment 853: 155455.

Song, J., (1999) Phenological influences on the albedo of prairie grassland and crop fields. International Journal of Biometeorology, 42(3): 153-157.

Wang Y., Shao M., Zhu Y., Liu Z. (2011) Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology 151: 437-448

Pour citer cet article : Pierre Mischler, Jean-Louis C. H. Roujean, Alizée Chouteau, Eric Ceschia. Albédo-Prairies : exploiter l'effet refroidissant de l'albédo des prairies comme levier d'atténuation du changement climatique, un atout majeur pour la durabilité de l'élevage de ruminants. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.55-67. 10.17180/ciag-2025-vol107-art05

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Metha-BioSol : Impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles

Sophie SADET-BOURGETEAU[1], Daniela MORA-SALGUERO[1], Camille CHAUVIN[2], Pierre BARRE[3], Daniel CLUZEAU[4], Pascal PIVETEAU[5], Cécile VILLENAVE[2], Anne HERMANT[6], Aurélie SCHERER[6], Virginie RIOU[7], Mariana MOREIRA[8], Kevin HOEFFNER[4], Adeline HAUMONT[9], Gregory VRIGNAUD[10], Vincent JEAN-BAPTISTE[11], Thierry MORVAN[12], Manon GILLES[13], Arthur BAILLY[1], Margaret JOHNSON[14], Véronique STANGRET[14], Aurélie LEVET[15], Aurélie REIBEL[15], Samuel DEQUIEDT[1], Pierre-Alain MARON[1], Julie TRIPIED[1], Lionel RANJARD[1], Pierre MULLIEZ[7], Mario CANNAVACCIUOLO[16]

[1] Université de Bourgogne Europe, Institut Agro Dijon, INRAE, UMR Agroécologie, 21000 Dijon, France

[2] ELISOL Environnement, 30111 Congénies, France

[3] Laboratoire de Géologie, Ecole normale supérieure, CNRS, PSL Univ., IPSL, 75005 Paris, France

[4] Université de Rennes, CNRS, ECOBIO - UMR 6553, 35000 Rennes, France

[5] INRAE, UR OPAALE, 35000 Rennes, France

[6] Chambre d'agriculture de Côte d'Or, 21110 Bretenière, France

[7] Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire, 49105 Angers, France

[8] Chambre d'agriculture de région Bretagne, 35000 Rennes, France

[9] Association AILE, 44939 Nantes, France

[10] ACE méthanisation, 79100 Thouars, France

[11] GRDF, 75009 Paris, France

[12] INRAE, UMR Sol Agro el hydrosystème Spatialisation, 35000 Rennes, France

[13] INRAE, UE 0871 Service d'expérimentation Agronomique et Viticole, 68000 Colmar, France

[14] Etablissement public local d'enseignement et de formation professionnelle agricoles (EPLEFPA) du Bas-Rhin, 67348 Obernai, France

[15] Association GERES, 13400 Aubagne, France

[16] USC 1432 LEVA, Ecole Supérieure d'Agricultures (ESA), INRAE, 49007 Angers, France

Correspondance : sophie.bourgeteau-sadet@agrosupdijon.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art06

Résumé

Le projet Metha-BioSol a pour objectif d'évaluer l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique et écologique des sols en utilisant un tableau de bord d'indicateurs opérationnels. Ce tableau de bord inclut des mesures de l'état physique et chimique du sol, des bio-indicateurs des communautés biologiques du sol et des indicateurs du fonctionnement biologique du sol et de l'état sanitaire des sols. Le projet était constitué de deux parties : 1) Evaluer, en conditions contrôlées, l'impact du type de digestats en tenant compte du type de sol, et sur des sites expérimentaux, l'impact de la répétition dans le temps des apports de digestat ; et 2) Mettre en place un réseau national de fermes agricoles et effectuer un diagnostic de l'impact de l'apport de digestats associé à diverses pratiques agronomiques et dans des contextes pédoclimatiques variés. Les résultats obtenus en conditions contrôlées et sur sites expérimentaux ont permis de montrer que la réponse des bio-indicateurs à un apport de digestat

était dépendante du type de digestat, du contexte pédoclimatique, et de la récurrence de ces apports. La mise en place du réseau de fermes a permis de générer les premiers éléments d'un référentiel d'interprétation de l'impact de l'utilisation des digestats dans des contextes territoriaux et sociotechniques variés.

Mots-clés : digestat, biologie du sol, bio-indicateurs, diagnostic, agriculture

Abstract: Metha-BioSol: Impact of Anaerobic Digestate on the Biological Quality of Agricultural Soils

The Metha-BioSol project aims to assess the impact of anaerobic digestion residues (digestates) on the biological and ecological quality of soils using an operational dashboard of indicators. This dashboard includes measurements of soil physical and chemical status, bio-indicators of soil biological communities and indicators of soil biological functions and soil health status. The project consisted of two parts: 1) To evaluate, under controlled conditions, the impact of different types of digestates taking into account the soil type, and on experimental sites, the impact of repeated digestate applications; and 2) To establish a national network of agricultural farms and conduct an assessment of the impact of digestate application combined with various agronomic practices in different pedoclimatic contexts. The results obtained from both controlled conditions and experimental sites showed that the response of bio-indicators to digestate application was dependent on the type of digestate, the pedoclimatic context, and the recurrence of these applications. The establishment of the farm network also provided the first elements for creating a reference framework for interpreting the impact of digestate use in varied territorial and sociotechnical contexts.

Keywords: digestate, soil biology, bio-indicators, diagnosis, agriculture

1. Introduction

La méthanisation est une technologie basée sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène. Cette dégradation aboutit à la production 1) d'un biogaz, le méthane, utilisé comme énergie renouvelable et 2) d'un produit contenant de la matière organique et des éléments nutritifs appelés digestat. Ce digestat est retourné au sol en tant que fertilisant organique soit sous forme brute, ou bien, après séparation de phase, sous forme liquide ou solide. La fraction solide du digestat est réputée pour son contenu élevé en matière organique présentant une grande proportion de carbone stabilisé. La fraction liquide, quant à elle, se caractérise, en comparaison avec la phase solide, par une teneur en azote minéral soluble plus importante, une teneur plus faible en matière organique et la présence de fractions organiques plus labiles (jusqu'à 90 % de minéralisation du carbone organique). Ces caractéristiques lui confèrent ainsi une valeur fertilisante supérieure au digestat brut. L'infiltration de cette fraction liquide dans le sol est plus rapide, en raison de sa teneur affaiblie en matière sèche (Reibel, 2018). D'un point de vue réglementaire, en application des articles L. 255-1 et s. et R. 255-29 du Code rural et de la pêche maritime, un cahier des charges « Pour la mise sur le marché et l'utilisation de digestats de méthanisation d'intrants agricoles et ou agro-alimentaires en tant que matières fertilisantes » (Cahier des charges Dig du 22 octobre 2020) vise à garantir une qualité des digestats conforme aux critères qu'ils énoncent et à faciliter leur utilisation agricole hors plan d'épandage. Par défaut et dans leur grande majorité, les digestats sont sous statut de déchet et épandus dans le cadre de plans d'épandage.

Le type de carbone (stable, labile) apporté au champ par les digestats de méthanisation pose question. En effet, son devenir (stockage et/ou émission de gaz à effet de serre…) est fortement dépendant des organismes décomposeurs du sol. Par ailleurs, il est également important d'évaluer l'impact de cette pratique agricole sur la diversité des organismes du sol afin de garantir un fonctionnement optimal du

sol (dynamique des matières organiques et cycles du carbone et de l'azote, bio-disponibilité des éléments nutritifs, dégradation de polluants organiques, rétention de polluants métalliques, action sur la structure des sols, etc.). Concernant la biologie des sols, les données scientifiques disponibles ne permettent pas d'objectiver l'impact des digestats de méthanisation. En effet, les dispositifs expérimentaux sont multiples, tant sur le type de digestats apporté, le type de sol étudié que sur les fréquences ou conditions d'apport. Une méta-analyse récente rapporte néanmoins que les digestats de méthanisation auraient un effet neutre sur la qualité microbiologique du sol dans 50 % des cas ; des effets négatifs, eux, seraient observés dans 7 % des cas. Cette méta-analyse soulève également l'insuffisance des données générées à ce jour pour évaluer l'impact des digestats sur le long terme. Ces conclusions ne permettent pas de statuer quant à l'absence de risque écologique des digestats sur la qualité microbiologique des sols (Karimi *et al.*, 2022). Concernant l'impact des digestats sur la macrofaune du sol, peu de données sont actuellement disponibles dans la littérature scientifique. Il semble cependant que l'apport de digestat induise une augmentation de la biomasse et de l'abondance des vers de terre au niveau des sols agricoles (Koblenz *et al.*, 2015). A notre connaissance, l'impact de telles pratiques sur le long terme n'a pas été étudié. De même, l'ensemble des résultats générés apparait dépendant du type de digestat épandu et du type de sol, rendant les conclusions actuelles peu génériques.

Parallèlement à cette littérature scientifique, plusieurs rapports ont été rédigés par des associations ou des groupes de travail. Dans ces documents, l'impact des digestats sur la biologie du sol est également décrit, voire décrié. Ainsi, il est recensé que l'apport de digestats solides induit une diminution de la vie des sols (MethaLAE-CASDAR, 2018). Les digestats liquides, eux, auraient tendance à avoir le même effet sur la biologie du sol qu'une fertilisation chimique. Concernant plus spécifiquement les vers de terre, les conclusions sont variables. Certains rapports montrent un effet positif des digestats sur les lombrics ainsi que sur les acariens et les collemboles (Burmeister *et al.*, 2015). D'autres documents sont plus mitigés, notamment celui de l'ANSES qui démontre un impact négatif des digestats sur la reproduction des vers de terre (ANSES, 2018). D'autre part, à notre connaissance, hormis le projet Metha-BioSol, il n'existe pas d'études (scientifiques et non scientifiques) évaluant à la fois l'impact des digestats et des pratiques associées (types de digestats, itinéraires techniques, systèmes de cultures, etc…) sur la qualité biologique des sols. Ainsi, le peu de résultats disponibles dans la littérature est non seulement contradictoire, mais également non représentatif de la réalité de terrain en omettant une approche systémique de la problématique.

Le principal objectif du projet Metha-BioSol était d'aider les agriculteurs à évaluer l'impact de la valorisation agronomique de digestats de méthanisation sur la qualité biologique de leur sol *via* des outils opérationnels de type bio-indicateurs. *In fine*, cela devait leur permettre de mieux appréhender les impacts environnementaux de ces pratiques et ainsi la durabilité de leurs systèmes de productions. Cet objectif principal, se déclinait en trois sous-objectifs :

- générer des données scientifiques manquantes sur l'impact à court (via la mise en place d'essais en conditions contrôlées tels que des méso-microcosmes) et moyen termes (via des sites expérimentaux épandant des digestats depuis plus de 5 ans) des digestats de méthanisation sur la biologie des sols ;
- établir des liens entre la qualité biologique des sols et les pratiques agronomiques dans un contexte de système utilisant du digestat. Ceci a été réalisé via des prélèvements au champ dans des parcelles cibles appartenant à un réseau d'agriculteurs déjà utilisateurs de digestats. Ce réseau a été mis en place spécifiquement dans le cadre de ce projet ;
- transférer et communiquer les résultats obtenus aux différents acteurs en lien avec la gestion des digestats de méthanisation (agriculteurs utilisateurs, accompagnateurs de projets, conseillers agricoles, collectivités, chercheurs, grand public…).

2. Bio-indicateurs choisis pour évaluer l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles

Dans le cadre du projet Metha-BioSol, la définition du tableau de bord d'indicateurs s'est largement inspirée de ce qui avait été auparavant effectué dans le cadre du projet AgrInnov (CASDAR IP 2012-2015). Dans AgrInnov, les indicateurs retenus se basaient sur des mesures de la flore microbienne du sol (bactéries et champignons), de la micro- et macrofaune du sol (nématodes et lombriciens), complétées par un indicateur de l'état structural du sol (test bêche) et un indicateur de l'activité de dégradation des matières organiques fraîches (LEVAbag) (Cannavacciuolo *et al*., 2017). En effet, le rôle essentiel que jouent ces organismes dans le fonctionnement biologique des sols et la durabilité des agrosystèmes explique largement ce choix. Parmi les critères d'évaluation des indicateurs, les plus importants étaient 1) d'être validés scientifiquement via des programmes de recherche (ADEME Bioindicateur I et II, ANR ECOMIC-RMQS, ADEME RMQS-BIODIV…), 2) de disposer d'un référentiel d'interprétation pour les grandes cultures afin de permettre la réalisation d'un diagnostic de l'impact des pratiques agricoles sur la biologie des sols et 3) d'être mesurables à un coût économique abordable, facilement opérationnels sur le terrain et au laboratoire. Les problématiques environnementales et sanitaires liées au retour au sol des digestats de méthanisation ont incité le *consortium* du projet Metha-BioSol à enrichir ce tableau de bord avec deux autres types d'indicateurs : ceux relatifs aux pathogènes des sols et ceux en lien avec les formes et quantités de carbone présent dans les sols. Pour le projet Metha-BioSol, le tableau de bord d'indicateurs proposés était le suivant (Figure 1) :

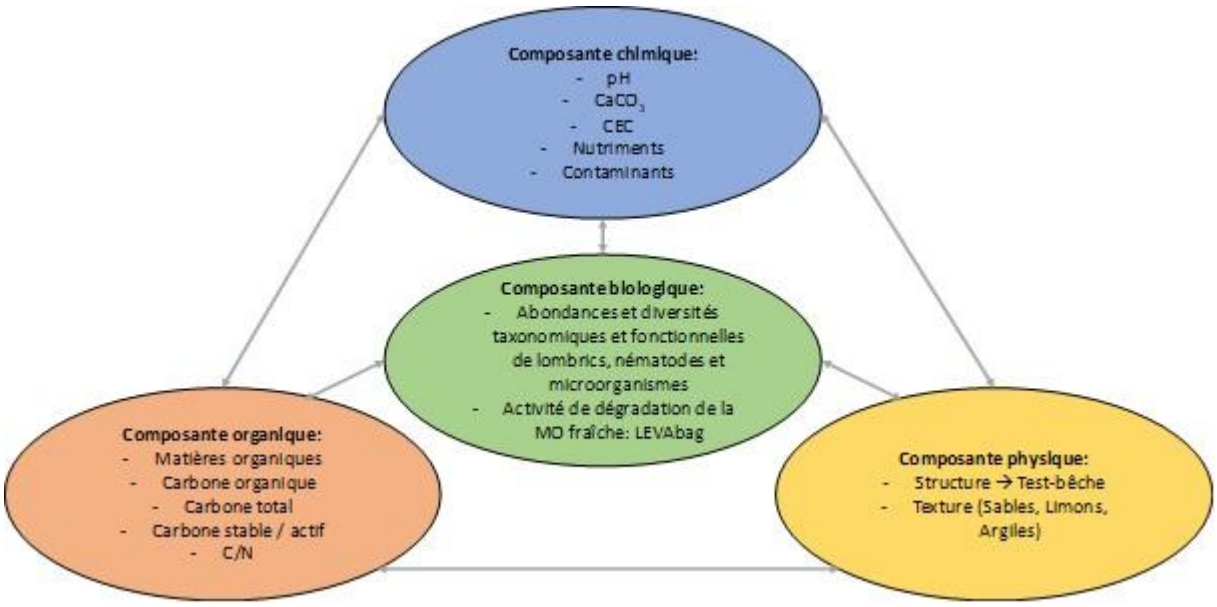


Figure 1 : Tableau de bord des indicateurs de la qualité biologique des sols proposé dans le cadre du projet Metha-BioSol. MO fraîche : matière organique fraîche, CEC : capacité d'échange cationique

3. Evaluation de l'impact de différents types de digestats sur la qualité biologique des sols à court terme

Il s'agissait ici d'étudier d'une part les impacts liés à la valorisation agronomique des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols en conditions contrôlées, et d'autre part d'identifier les facteurs édaphiques susceptibles de moduler ces impacts. Cette partie du projet se focalisait sur les impacts à court terme. Deux hypothèses étaient considérées : 1) Les impacts sont différents en fonction de la nature physico-chimique des sols et 2) Les impacts sont différents en fonction de la nature des digestats.

3.1. Matériel et Méthodes

Dans cette étude factorielle, les dispositifs expérimentaux étudiés ont été sélectionnés de façon à réduire le nombre de variables non maîtrisées. Ainsi, l'épandage de digestats a été simulé en conditions de laboratoire à l'aide de mésocosmes et de microcosmes de sol de façon à maîtriser les conditions expérimentales. Les mésocosmes ont permis de produire les résultats relatifs aux indicateurs suivants : nématodes, lombriciens, activité de dégradation de la matière organique fraîche, formes et quantité de carbone. Les microcosmes ont permis de générer des résultats relatifs aux microorganismes et pathogènes du sol.

Concrètement, 3 types de méso- et microcosmes ont été construits à partir de 3 sols à la pédologie contrastée représentatifs des sols des régions investies dans le projet. La figure 2 illustre les différences de textures observées entre ces trois sols. Outre les différences de texture, les sols sélectionnés présentaient des profils chimiques sensiblement différents. Le sol limono-argileux calcaire (Sol 1) avait un pH alcalin, une teneur plus élevée en carbone, en azote et en phosphore, et une CEC plus élevée. Les sols sableux et limoneux étaient légèrement acides. Le sol limoneux (Sol 3) avait une teneur en carbone et en azote légèrement plus élevée que le sol sableux (Sol 2).

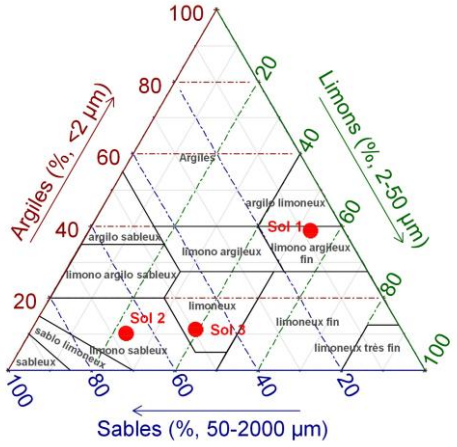


Figure 2 : Triangle des textures des trois sols utilisés pour les micro- et mésocosmes

Chaque type de cosmes (= type de sol) a reçu 8 modalités d'apports : 4 types de digestats (décrits ci-dessous), 1 lisier de bovin (CS), 1 fumier de bovin (CM), 1 apport minéral sous forme d'ammonitrate et une modalité sans apport (eau). Les différents types de digestats comprenaient les biomasses entrantes suivantes :

- Digestat 1 (FYM) : (82 % fumier bovin - 6,5 % matières végétales (3 % maïs/sorgho, 3 % matières végétales diverses) – 7 % dérivé lait (liquide) – 2 % lisier bovin – 2 % lisier porc - 0,5 % graisse) ;
- Digestat 2 (MFW) : (56 % fumier bovin – 20 % matières végétales (3 % maïs/sorgho, 2 % culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE) d'hiver, 15 % autres matières végétales) – 5 % graisses – 4 % lisier bovin – 13 % biodéchet (sang, glycérine, divers) – 2 % lisier porc) ;
- Digestat 3 (SMS) : (100 % matières végétale (55 % maïs/sorgho, 45 % CIVE hiver)) ;
- Digestat 4 (CMF) : (45 % lisier de canard – 40 % graisse – 15 % matières végétales).

Les quantités de matière organique appliquée correspondaient à 35 T/ha pour les mésocosmes et 25 T/ha pour les microcosmes. Le tableau 1 donne les teneurs en éléments apportés par les produits organiques équivalents à 35 T/ha. Après 42 jours d'incubation pour l'ensemble des dispositifs, les échantillons de sol ont été prélevés pour analyse de la qualité biologique et physico-chimiques des sols.

Tableau 1 : Teneurs en éléments apportés par des produits organiques équivalents à 35 T/ha

Produits organiques	pH	C/N	Carbone organique total (kg/ha)	Azote total (kg/ha)	Azote ammoniacal (kg/ha)	NH_4^+/Ntot (%)
FUMIER (CM)	8,9	18,3	202,3	111,4	15,8	14,2
LISIER (CS)	7,7	1,5	20	77,1	52,4	68
FYM	8,8	6,3	104	157,1	55,6	35,4
MFW	8,3	2,8	84,9	177,1	80,4	45,4
SMS	8	4,5	64	105,7	33,9	32,1
CMF	8,4	0,8	28,3	194,3	130,2	67

3.2. Résultats

LevaBag (mesure de l'activité de dégradation de la matière organique fraîche)

Les résultats obtenus en mésocosmes confirment que l'effet d'un apport de matières organiques, dont des digestats, est variable en fonction du sol sur lequel il est appliqué et de la nature de ces matières organiques. Ainsi, il apparaît que le sol sableux utilisé dans les mésocosmes présente en moyenne la capacité de dégradation des Matières Organiques Fraîches (MOF) la plus élevée de 20 % par rapport aux sols argileux et limono-sableux. Il n'a pas été mis en évidence d'effet significatif du type de digestat sur la dégradation d'une MOF, et cela quel que soit le type de sol considéré. Il semble que l'apport de certaines matières organiques, notamment celles présentant le C/N le plus élevé (C/N =18,3 pour le fumier), soient responsables d'une augmentation de la dégradation.

Lombriciens

D'un point de vue méthodologique, les résultats sur les lombriciens ne portent que sur une variable comportementale (localisation dans le sol) et deux variables biologiques (le poids individuel et le taux de mortalité des lombriciens). Tous les lombriciens introduits ont été récupérés vivants, ce qui met en évidence qu'il n'y a pas eu d'effet du type de digestats sur la mortalité des lombriciens à court terme. Concernant l'évolution du poids des lombriciens, les résultats de cette expérimentation confirment que l'effet des digestats est variable selon la nature des digestats et du type de sol. Comparé à un fumier classique non digéré (CM), les différents types de digestat ont accentué la perte de poids des lombriciens. Toutefois, il est important de rappeler qu'au cours de cette expérimentation, les lombriciens ont perdu 20 % de poids en moyenne, dû aux contraintes de l'approche expérimentale multi-taxons (micro-organismes, méso- et macro-faune) ce qui limite les interprétations et ne permet pas de généraliser ces résultats.

Nématodes

Dans cette étude, les apports de digestats ont eu un effet faible sur l'abondance des nématodes, notamment en comparaison à un apport de fumier (CM) ou un traitement avec fertilisation minérale. La faible stimulation de l'indice d'enrichissement (EI) malgré les forts flux de nutriments dans les sols (nitrates notamment) par les digestats est surprenante, mais provient probablement du fait que la majeure partie des éléments apportés par les digestats sont sous forme minérale et ne représentent pas une ressource pour les organismes du sol. Tous les apports de digestats tendent à réduire la diversité des nématodes du sol ; cet effet est particulièrement marqué pour les digestats CMF et MWF. De manière globale, les différents traitements ont eu plus d'effet sur le sol limono-argileux et le sol sableux, que sur le sol limoneux.

Microorganismes

Comme pour la plupart des autres indicateurs du projet, les résultats obtenus en microcosmes confirment que l'effet d'un apport de matières organiques, dont des digestats, est variable en fonction du sol sur lequel il est appliqué et de la nature de ces matières organiques. Au global, il apparaît que les sols sableux sont plus sensibles (chute de la biomasse microbienne, modification de la diversité microbienne présente) à l'apport de certains digestats ; notamment ceux présentant un C/N faible, soit une quantité d'azote (ammonium) importante.

Pathogènes

Les résultats de ces expérimentations en microcosmes montrent tout d'abord que certains indicateurs sanitaires ont été détectés après les 42 jours d'incubation. Une fois encore, la détection des pathogènes dépend du type de sol ainsi que du type de matières organiques utilisées. Les résultats dépendent également de l'indicateur considéré. En effet, *Escherichia coli* et *Salmonella enterica* n'ont jamais été détectées après incubation alors que le complexe *K. pneumoniae* présentait la prévalence la plus importante. La détection du genre *Listeria* et de *L. monocytogenes* était quant à elle limitée. Enfin, les expériences de contamination artificielle d'un digestat avec *K. pneumoniae* et *L. monocytogenes* ont montré que la concentration initiale des pathogènes influe sur la durée de leur détection au cours de l'incubation et ont confirmé un effet « sol » significatif sur le devenir de *K. pneumoniae* et *L. monocytogenes*.

3.3. Conclusions

Les résultats obtenus en méso- et micro-cosme montrent qu'en conditions contrôlées et sur sol nu, l'impact des digestats de méthanisation sur la biologie des sols est dépendant du type de digestat et du type de sol. Globalement, les sols sableux semblent plus sensibles à l'apport de digestats, notamment ceux présentant un C/N faible, soit une quantité d'azote (ammonium) importante.

4. Evaluation de l'impact des différents types de digestats sur la qualité biologique des sols à moyen terme

Afin d'étudier les effets à moyen terme, le présent projet s'appuie sur des sites expérimentaux, épandant de façon récurrente et depuis plusieurs années des produits résiduaires organiques (PRO), dont des digestats de méthanisation. Concrètement, ces sites font partie du SOERE-PRO (Système d'observation et d'expérimentation sur le long terme pour la recherche en environnement – Produit Résiduaires Organiques, sites d'EFELE et PROspective) et de l'exploitation agricole de l'EPLEFPA du Bas-Rhin (site Dige'O).

4.1. Matériel et Méthodes

Les trois sites retenus dans le projet Metha-BioSol sont situés sur des territoires différents : Bretagne (EFELE) *et al*sace (PROspective et Dige'O), et présentent des contextes pédoclimatiques différents. D'autre part, chaque site épand un ou plusieurs type(s) de digestats particuliers, représentatifs de son territoire.

- **PROspective** - sols argilo-limono calcaires dans la plaine d'Alsace (climat semi-continental) ;
    - Digestat : 60 % déchets industries agro-alimentaires (IAA), 20 % végétaux, 20 % effluents d'élevage.
- **Dige'O -** sols argilo-limono calcaires dans la plaine d'Alsace (climat semi-continental) ;
    - Digestat Méthachrist (DIGMETH): 38 % végétaux, 43 % effluents d'élevage, 19 % déchets IAA,

- Digestat Obernai (DIGOB): 23 % végétaux, 40 % effluents d'élevage, 37 % déchets IAA,
- Digestat Obernai corrigé (DIGCOR): 23 % végétaux, 40 % effluents d'élevage, 37 % déchets IAA + Glenor kr+.

Le digestat Obernai corrigé correspond au digestat d'Obernai auquel on mélange le produit Glenor Kr+, au moins une heure avant épandage. Le produit Glenor KR+ est un composteur rapide constitué d'argile et d'algues avec des activateurs biodynamiques (la composition précise du produit n'est pas disponible).

- **EFELE** - sols limoneux (climat tempéré-océanique) ;
  - Digestat Lisier de Porc (DIG_LP) : 100 % effluents d'élevage ;
  - Digestat T (DIG_T) : 70 % effluents d'élevage (Lisier de Bovin), 20 % CIVE, 10 % autres végétaux ;
  - Digestat L (DIG_L) : 80 % déchets IAA, 13 % effluents d'élevage (Lisier de Porc), 7 % graisses.

Les fréquences et les historiques d'apport de digestats varient également selon le site expérimental considéré :

- **PROspective** :
  - Tous les ans sur 4 parcelles depuis 2014 (prélèvements de sols en 2022, soit 8 ans de récurrence d'apport (= 8 campagnes d'apports)) ;
  - Pour les autres parcelles, tous les deux ans en compléments d'autres PRO apportés en année n et ce, depuis 2016 (prélèvements de sols en 2022, soit 6 ans de récurrence d'apport (= 3 campagnes d'apports)).
- **Dige'O** :
  - Apport annuel entre 2013 et 2016 ;
  - Pas d'épandage entre 2016 et 2018 ;
  - Puis, depuis 2018 épandage de digestats tous les ans (prélèvements de sols en 2022, soit 4 ans de récurrence d'apport (= 4 campagnes d'apports)).
- **EFELE** :
  - DIG_LP : tous les ans au printemps depuis 2012 (prélèvements de sols en 2022, soit 10 ans de récurrence d'apport (= 10 campagnes d'apports)) ;
  - DIG_T et DIG_L : ces traitements ont respectivement remplacé des apports biannuels de fumier de bovins (dose 50 t/ha) et de fumier de porc composté (dose 25 t/ha) à partir de 2021.

Sur les trois sites expérimentaux, des prélèvements de sol ont été réalisés en sortie d'hiver juste avant les épandages sur différentes parcelles présentant différentes modalités d'apport (Digestat, PRO, fertilisation minérale (MIN)…). Ceci permet d'avoir une approche factorielle des impacts (fertilisation minérale vs. digestats, digestats vs. PRO (ex : lisier, fumier…).

Grâce à une analyse statistique combinée (Analyse Factorielle Multiple - AFM), l'effet des différentes modalités d'apport a été testé sur l'ensemble des indicateurs (physico-chimiques, biologiques, fonctionnement), pour chaque site expérimental. Afin de tester la significativité de la dispersion des modalités de la variable traitement (fertilisation minérale ou d'apport de PRO), un modèle d'analyse de variance à un facteur est réalisé pour chaque dimension de l'AFM. Les variables à expliquer sont les

coordonnées des individus sur les axes factoriels de l'AFM et la variable explicative correspond au traitement. Un test F permet donc de voir si la variable a un effet significatif sur la dimension et si certaines modalités de la variable traitement sont significativement différentes de celles de l'ensemble de la population (la plus grande distance entre les modalités sur la dimension considérée).

4.2. Résultats et conclusions

Pour le site expérimental EFELE, seule la première dimension de l'AFM est significative ($p < 5\ \%$) et permet d'opposer la modalité Fumier (FB ; coordonnées positives) à la modalité fertilisation minérale (MIN, coordonnées négatives ; Figure 3). Les paramètres physico-chimiques associés à cette dimension sont le pH, la CEC, le carbone actif et le rapport C/N (coordonnées positives). Ensuite, la dégradation de la matière organique fraîche (LevaBag) et la biomasse microbienne (coordonnées positives) sont corrélées à ces paramètres physico-chimiques et s'opposent à la diversité en champignons (coordonnées négatives). Pour le site expérimental de PROspective, les deux premières dimensions de l'AFM sont significatives (respectivement F1 $p < 1\%$ et F2 $p < 5\ \%$). Ainsi, la biomasse lombricienne totale, les nématodes phytophages et bactérivores opportunistes (coordonnées positives) sont corrélées à la première dimension de l'AFM. Ces variables permettent d'opposer la modalité Fumier non digéré + Digestat (FUM_DIG ; coordonnées positives) à MIN (coordonnées négatives). Concernant la deuxième dimension de l'AFM, les paramètres physico-chimiques associés à cette dimension sont l'azote total, la matière organique et le carbone actif (coordonnées positives). Ensuite, la dégradation de la matière organique fraîche (LevaBag) et la biomasse microbienne (coordonnées positives) sont corrélées à ces paramètres physico-chimiques et s'opposent à la diversité en champignons (coordonnées négatives). Cet axe factoriel oppose la modalité Compost de biodéchets + fertilisation minérale (BIO_MIN, coordonnées positives) à la modalité Digestat (DIG, coordonnées négatives). Pour le site expérimental Dige'O, aucun test F n'est significatif. Ainsi, aucune dimension de l'AFM ne permet de différencier les traitements entre eux.

Pour rappel, les différents sites expérimentaux n'avaient pas tous le même historique d'apport de digestats lors des prélèvements de sol en 2022. Le plus ancien était EFELE (10 ans) et pour les apports de Digestat de lisier de porc (DIG_LP), puis PROspective (8 ans) et ensuite Dige'O (4 ans). Les résultats obtenus pour Dige'O et PROspective montrent qu'au bout de trois à huit campagnes d'apports, la biologie du sol des parcelles ayant reçu du digestat (et uniquement du digestat pour PROspective) s'avère être proche de celle des parcelles ayant reçu une fertilisation minérale mais très éloignée de celle des parcelles ayant reçu du fumier (Figure 3A et B). En revanche, sur le site d'EFELE, après 10 campagnes d'apport de digestat, la biologie du sol des parcelles testées se retrouve en position intermédiaire par rapport aux parcelles amendées avec un fumier ou fertilisées avec un engrais chimique (Figure 3C). Certes, les digestats testés entre les différents sites sont différents, tout comme les contextes pédoclimatiques. Les résultats obtenus sont donc à consolider, mais ils suggèrent un effet pivot des digestats sur la biologie des sols entre 8 et 10 ans de répétitions après le début des apports.

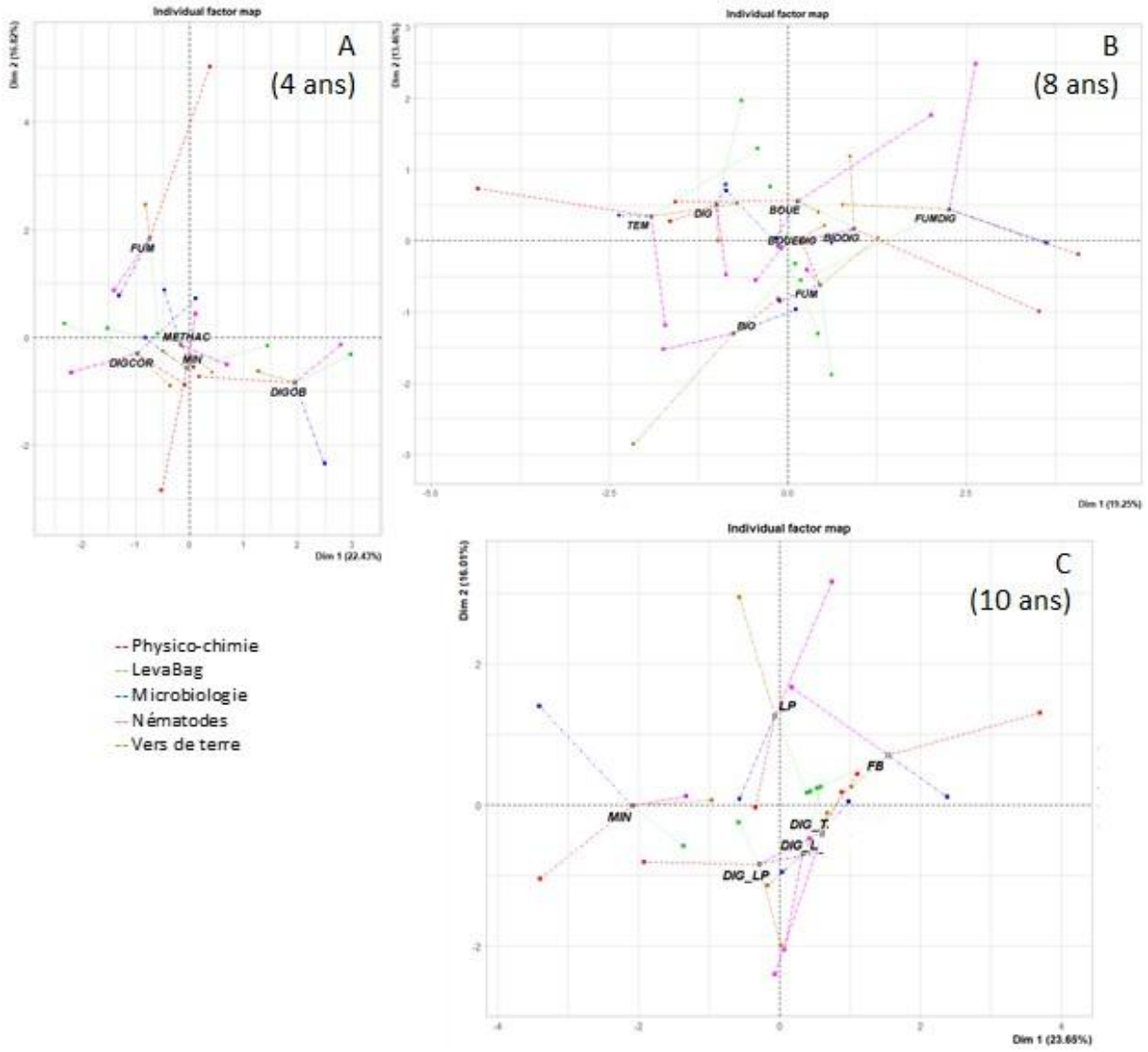


Figure 3 : Effet des différentes modalités d'apport sur les indicateurs de la biologie des sols pour les trois sites expérimentaux testés dans le projet Metha-BioSol (A : DIGE'O ; B : PROspective et C : EFELE). Abréviations des modalités pour DIGE'O: MIN: Fertilisation Minérale / FUM: Fumier de bovins non digéré / DIGOB: Digestat Obernai / DIGCOR: Digestat Obernai corrigé / METHAC: Digestat MethaChrist ; Abréviations des modalités pour PROspective: DIG: Digestat / TEM: Fertilisation Minérale / FUM_DIG: Fumier non digéré + Digestat / FUM: Fumier non digéré + MIN / BOUE_DIG: Boue de station d'épuration + Digestat / BOUE: Boue de station d'épuration + MIN / BIO_DIG: Compost de biodéchets + Digestat / BIO_MIN: Compost de biodéchets + MIN ; EFELE : DIG: Digestat / MIN: Fertilisation Minérale / FB : Fumier non digéré / LP: Lisier non digéré / DIG_LP: Digestat de lisier de porc / DIG_L : digestat de lisier de bovin / DIG_T : digestat territorial.

5. Impact des pratiques agronomiques liées à l'épandage de digestats sur un réseau de fermes agricoles

Dans cette partie du projet, il s'agissait d'évaluer, en conditions réelles de terrain, l'impact des digestats et des pratiques agricoles sur la qualité biologique des sols agricoles grâce à un réseau de fermes agricoles épandant des digestats de méthanisation depuis plusieurs années.

5.1. Matériel et Méthodes

Construction d'un réseau de fermes agricoles épandant des digestats de méthanisation

Un réseau de 71 fermes agricoles épandant des digestats de méthanisation a été mobilisé dans 5 régions françaises : Bretagne, Pays de la Loire, Bourgogne Franche-Comté, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Occitanie. Le principal critère de sélection des fermes de ce réseau était d'épandre du digestat brut, liquide ou solide (issus de séparation de phase par presse à vis voire centrifugation) depuis au moins 3 campagnes de fertilisation afin d'observer un potentiel effet long terme. Les fermes épandant des digestats ayant subi un post-traitement comme le compostage ont été exclues.

Pour chaque ferme de ce réseau, une parcelle fertilisée avec du digestat a été prélevée. Les échantillons de sols ont été prélevés en sortie d'hiver sur céréales d'hiver et prairie juste avant les épandages (janvier-février 2022 et 2023). L'ensemble des indicateurs du tableau de bord mis en place dans le projet a été déployé sur les échantillons prélevés (Figure 1). Des indicateurs de synthèse (patrimoine biologique et fertilité biologique ; Cannavacciuolo *et al.*, 2017), reprenant les indicateurs du tableau de bord, ont ensuite été construits afin de faciliter la lecture et la discussion autour des résultats obtenus (Figure 4). Le patrimoine biologique correspond à la diversité des organismes présents dans le sol, il est garant de l'assurance écologique du sol. La fertilité biologique est portée par l'ensemble des organismes du sol. L'expression de cette fonction dépend de l'abondance, de la diversité et de l'activité des organismes du sol.

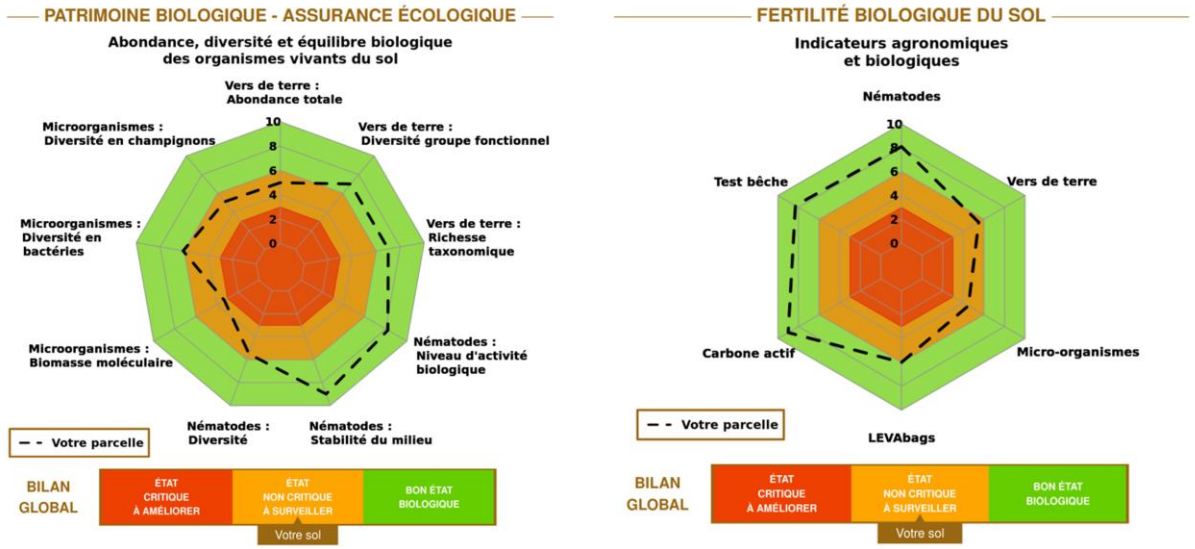


Figure 4 : Indicateurs de synthèse de la biologie des sols (patrimoine et fertilité biologique)

Sur la même période que les échantillonnages de sol, des enquêtes ont été effectuées auprès des agriculteurs du réseau de fermes sur les pratiques suivantes : travail du sol (mode et profondeur d'implantation, durée de sol nu), couverture végétale (diversité des cultures principales dans la rotation, présence d'intercultures CIPAN, de CIVE, durée de sol nu), fertilisation (fertilisation minérale, fertilisation organique autre que par le digestat, restitution des résidus de culture), digestat (type de digestat (brut, liquide, solide), fréquence d'apport et historique d'apport).

Analyses statistiques des données

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les données physico-chimiques des sols provenant des différentes parcelles échantillonnées dans le cadre du réseau de fermes. Par la suite, pour chaque cluster identifié, les indicateurs de synthèse de la biologie des sols (Patrimoine et Fertilité biologique) ont été générés.

Afin de tester l'effet de certaines pratiques agricoles, en lien avec l'apport de digestat, sur la qualité biologique des sols, un test exact de Fisher, utilisé pour l'analyse des tableaux de contingence, a été effectué pour chacune des variables issues de l'enquête (travail du sol, couverture végétale, fertilisation, digestat, fréquence d'apport et historique d'apport) et croisées avec les indicateurs de synthèse de la biologie des sols.

5.2. Résultats et conclusion

La typologie, obtenue sur les données physico-chimiques des sols prélevés dans le cadre du réseau de fermes, montre 4 clusters distincts (Figure 5) relatifs à des types de sol différents. Les résultats issus du test exact de Fisher ne montrent aucun effet significatif du type de sol sur les indicateurs de synthèse (patrimoine biologique, p=0,433 ; fertilité biologique, p=0,129).

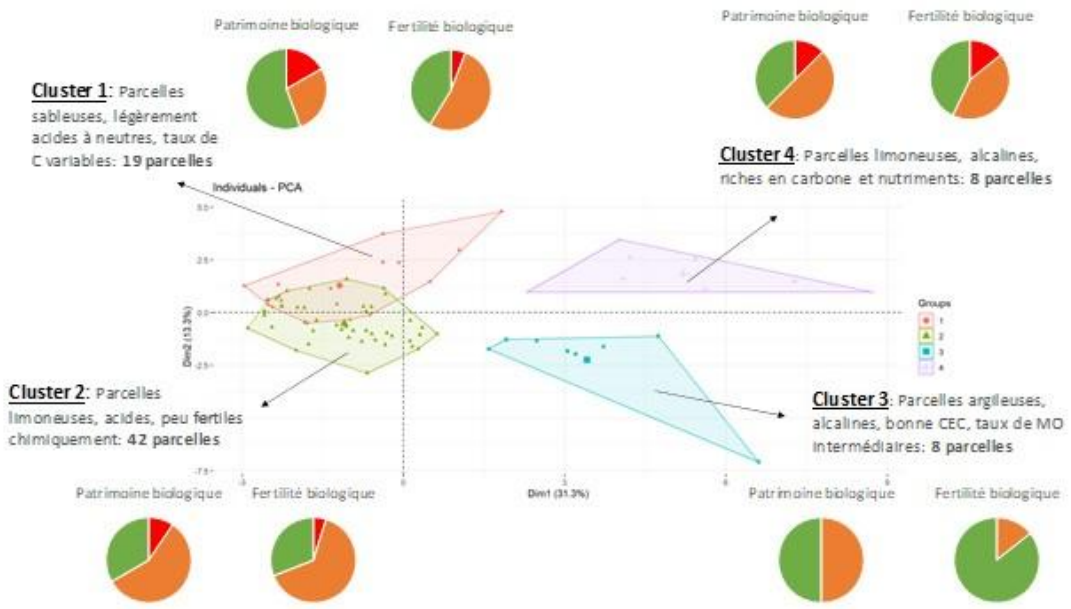


Figure 5 : Projection des parcelles prélevées dans le cadre du réseau de fermes selon les données physico-chimiques de leur sol. Mise en évidence pour chaque cluster des résultats issus des indicateurs de synthèse de la biologie des sols (patrimoine et fertilité biologique). Vert : bon état, orange : état non critique à surveiller, rouge : état critique.

Les données issues des enquêtes ont permis d'identifier deux pratiques agricoles liées à l'utilisation de digestat ayant un effet significatif sur les indicateurs de synthèse de la qualité biologique des sols : le type de digestat et les cultures et inter-cultures présentes dans la rotation. Ainsi, nos résultats ont montré que le type de digestat apporté à la parcelle avait un impact significatif sur la fertilité biologique des sols (p=0,024). Les digestats issus d'une ration entrante composée majoritairement d'effluents d'élevage ruminant favorisaient plus la fertilité biologique des sols que les digestats composés majoritairement de végétaux ou d'effluents d'élevage non-ruminant (Figure 6). Ceci peut s'expliquer par une quantité de carbone organique apportée plus élevée pour ce type de digestats, stimulant ainsi de façon plus importante la vie du sol. En revanche, dans ce jeu de données, la présence de CIVE dans la rotation de cultures induisait un impact négatif sur le patrimoine biologique des sols (p=0,031 ; Figure 6). Les enquêtes réalisées sur les pratiques agricoles du réseau de fermes ne permettaient pas d'identifier clairement les CIVE implantées, ni de qualifier le système de cultures associé. Toutefois, il serait intéressant de regarder si ce résultat illustre l'impact d'une pratique en particulier (type d'espèce implantée en CIVE) ou d'un système dans sa globalité (rotation et retour au sol des couverts). Des

travaux complémentaires sur les systèmes de culture sont nécessaires pour renseigner cette hypothèse.

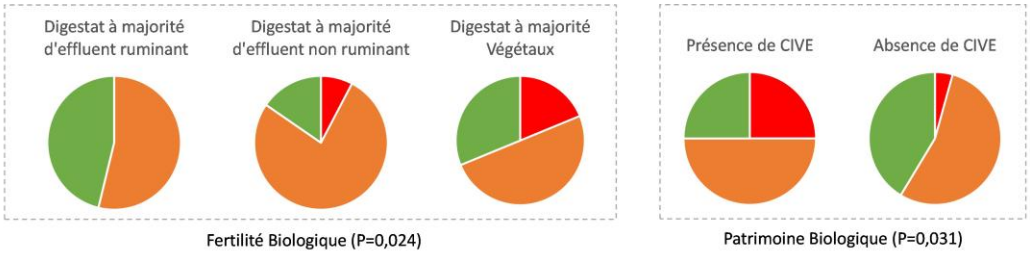


Figure 6 : Effet du type de digestat et de la présence de CIVE dans la rotation de cultures sur les indicateurs de synthèse du réseau de fermes du projet Metha-BioSol. Vert : bon état, orange : état non critique à surveiller, rouge : état critique.

6. Conclusions

Le projet Metha-BioSol a permis de générer des données contribuant à évaluer l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique et écologique des sols en utilisant des bio-indicateurs opérationnels. Les résultats obtenus montrent que l'impact des digestats sur la qualité biologique des sols dépend du type de sol, mais également du type de digestat. Il n'y a pas un digestat, mais des digestats dont une typologie basée sur les rations entrantes dans le méthaniseur vient d'être établie (Jimenez *et al*., 2024). Pour résumer, le projet Metha-BioSol montre que l'effet des digestats sur la vie du sol n'est pas neutre, notamment pour ceux présentant un C/N faible. Par ailleurs, pour des digestats ayant un C/N faible, une répétition d'apport sur plus de 10 ans entraîne un effet similaire à une fertilisation minérale. Enfin, en situations réelles, le projet Metha-BioSol tend à montrer qu'au-delà des digestats, il est essentiel de prendre en compte l'impact de la combinaison de pratiques sur les indicateurs de la qualité biologique du sol. Evaluer cet impact nécessite une réflexion à l'échelle du système en ayant toutefois des points de vigilance en fonction du type de sol, du type de digestats utilisé et/ou certaines pratiques culturales mise en œuvre. Les résultats de ce réseau de fermes constituent le premier référentiel d'interprétation à l'échelle nationale de l'impact de pratiques agricoles valorisant des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols. Avec une ambition nationale de multiplier par vingt la production de biogaz par méthanisation à l'horizon 2050, il est primordial de maintenir et de développer ce réseau de fermes. Dans la mesure où les systèmes de culture sont construits sur un ensemble de compromis pour tenir compte des contraintes des agriculteurs, l'ambition d'un tel réseau sera d'identifier les leviers agronomiques qui permettront de trouver les bons compromis pour la mise en place de la méthanisation sur une exploitation agricole, et d'accompagner les agriculteurs pour rendre la méthanisation compatible avec la préservation de la qualité des sols.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles à l'URL suivante : https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/methabiosol

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Sophie Sadet-Bourgeteau : https://orcid.org/0000-0002-7533-4289

Daniela Mora-Salguero : https://orcid.org/0009-0004-7769-3578

Cécile Villenave : https://orcid.org/0000-0003-3624-0498

Pierre Barré : https://orcid.org/0000-0002-0822-0556

Daniel Cluzeau : https://orcid.org/0000-0002-0822-0556

Pascal Piveteau : https://orcid.org/0000-0002-1210-251X

Kévin Hoeffner : https://orcid.org/0000-0003-3740-6058

Thierry Morvan : https://orcid.org/0000-0002-6678-2661

Pierre-Alain Maron : https://orcid.org/0000-0003-2315-0741

Lionel Ranjard : https://orcid.org/0000-0002-7720-5843

Samuel Dequiedt : https://orcid.org/0000-0002-1122-4136

Mario Cannavacciuolo : https://orcid.org/0000-0001-8996-6407

Contributions des auteurs

Conceptualisation : Tous les auteurs ; Curation des données : SBS, DMS, CC, PB, DC, PP, KH, MC ; Analyse formelle : SBS, DMS, CC, PB, DC, PP, KH, MC, AB, SD ; Obtention de financement : SBS, PM, VJB ; Recherche : Tous les auteurs ; Méthodologie : Tous les auteurs ; Administration du projet : SBS, PM ; Ressources : SBS, DMS, CC, CV, PB, DC, PP, KH, MC, AH, AS, mm, VR, AH, GV, TM, MG, MJ, VS, AR, AL, JT, PM ; Développement informatique : MC, AB, SD ; Validation : SBS, DMS, CC, PB, DC, PP, KH, MC, AB, SD ; Visualisation : SBS, CC, MC ; Rédaction – version originelle : Tous les auteurs ; Rédaction – Révision et correction : SBS.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

L'équipe du projet Metha-BioSol remercie les financeurs du projet pour leur soutien et la confiance accordée, les équipes partenaires du projet pour leur implication et l'ensemble des agriculteurs ayant participé à la mise en place du réseau.

Déclaration de soutien financier

Le projet Metha-BioSol a été financé par l'ADEME (Appel à projet GRAINE), le ministère de l'agriculture (CASDAR Innovation et Partenariat) et GrDF.

Références bibliographiques

ANSES, 2018. Conclusions de l'évaluation relatives à la demande d'autorisation de mise sur le marché de la société SAS BIOVILLENEUVOIS pour l'ensemble de produits FERTI-BIOVILLENEUVOIS.

Burmeister, J., Walter, R., Fritz, M., 2015. Effets de la fertilisation des digestats issus de la méthanisation sur la faune du sol, in: Forum, B. (Ed.).

Cannavacciuolo, M., Cassagne, N., Riou, V., Mulliez P., Chemidlin , N., Dequiedt, S., Villenave, C., Cérémonie, H., Cluzeau, D., Cylly, D., Vian, J.F., Peigné, J., Gontier, L., Maron, P.A., D'Oiron Verame, E., Ranjard, L., 2017. Validation d'un tableau de bord d'indicateurs sur un réseau national de fermes en grande culture et en viticulture pour diagnostiquer la qualité biologique des sols agricoles. *Innovations Agronomiques* 55, 41-54 - https://doi.org/10.15454/1.5137753402510786E12

Jimenez J., Moreira M., Berger S., Capowiez Y., Caradec L., Desneulin I., Génermont S., Halbin E., Haumont A., Heurtaux M., Houot S., Johnson M., Le Roux C., Menasseri S., Michaud A., Patureau D., Pérès G., Thiébaut S., Stangret V.. 2024. Guide des bonnes pratiques d'utilisation des digestats de méthanisation pour optimiser leurs intérêts agronomiques. Rapport final. 75 pages.

Karimi, B., Sadet-Bourgeteau, S., Cannavacciuolo, M., Chauvin, C., Flamin, C., Haumont, A., Jean-Baptiste, V., Reibel, A., Vrignaud, G., Ranjard, L., 2022. Impact of biogas digestates on soil microbiota in agriculture: a review. Environmental Chemistry Letters 20, 3265-3288.

Koblenz, B., Tischer, S., Rücknagel, J., Christen, O., 2015. Influence of biogas digestate on density, biomass and community composition of earthworms. Industrial Crops and Products 66, 206-209.

MethaLAE-CASDAR, P., 2018. Améliorer la fertilité des agrosystèmes. Reibel, A., 2018. Valorisation agricole des digestats: Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ?, La méthanisation en Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Pour citer cet article : Sophie Sadet-Bourgeteau, Daniela Mora-Salguero, Camille Chauvin, Pierre Barre, Daniel Cluzeau, *et al*.. Metha-BioSol : Impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.68-82. 10.17180/ciag-2025-vol107-art06

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

RenouVeau – Réinventer les modèles de production de veaux de boucherie alliant enjeux sociétaux, qualité des produits et viabilité économique

Didier BASTIEN[1], Philippe BRIAND[4], Virginie LEFOUL[2], Manuel TOURTIER[1], Mathilde VAILLANT[3]

Avec la collaboration de Magdéléna CHANTEPERDRIX (Idele), Léa DROSNE (Idele), Etienne LABUSSIERE (INRAE), Yannick LE-COLZER (Agrocampus Ouest), Lucile MONTAGNE (Agrocampus Ouest), Marie-Anne LEFEBVRE (Tannerie HAAS), Christophe MARTINEAU (Idele), Jocelyn PRIGENT (SVA), Lola REVERCHON-BILLOT (Bankiva), Jean-Baptiste VANHAM (EPLEFPA-RETHEL).

[1] CIRVEAU, Centre d'Innovation et de Recherche sur le Veau, 56430 Mauron, France

[2] Institut de l'Elevage, 35650 Le Rheu, France

[3] Institut de l'Elevage, 14310 Villers Bocage, France

[4]Chambre d'Agriculture Bretagne, 35042 Rennes Cedex, France

Correspondance : didier.bastien@idele.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art07

Résumé

Le projet RenouVeau a visé à étudier différents modes de production de veaux de boucherie, innovants du point de vue du logement et des conduites alimentaires appliqués, afin de répondre aux nouvelles attentes sociétales. Des consommateurs, ONG impliquées pour le bien-être animal et étudiants en agriculture ont été interrogés sur leur vision de la production de veau dans le futur. L'attente principale pour ces différents publics est de permettre aux animaux d'avoir un accès à l'extérieur. Différents modes de production de veaux de boucherie avec accès extérieur ont ainsi été testés en ferme expérimentale. Il a été constaté que les veaux occupent ce nouvel espace et se déplacent davantage comparé à un élevage en bâtiment fermé. Les comportements stéréotypés restent néanmoins présents et la présence de litière paillée pour le couchage entraine une consommation importante de paille. Les carcasses et les viandes produites dans ces nouveaux systèmes ressortent plus colorées, générant des problèmes de valorisation de ces produits. L'ensemble des résultats obtenus dans le projet a fait l'objet de nombreuses diffusions, dont la réalisation d'un webinaire[1] final disponible sur https://idele.fr/renouveau/publications/.

Mots-clés : viande de veau, mode de production, logement, extérieur, innovation

Abstract: RenouVeau – Reinventing veal production models that combine societal challenges, product quality, and economic viability

The RenouVeau project aimed to explore various innovative veal production methods, focusing on housing and feeding practices to meet new societal expectations. Consumers, animal welfare NGOs, and agriculture students were consulted to gain insight into their vision of veal production in the future. The main expectation from these groups is to provide animals with outdoor access. As a result, different veal production systems that include outdoor access were tested on an experimental farm. Observations showed that calves actively use this new space and move around more compared to actual indoor systems. However, abnormal behaviours are still present, and providing straw bedding significantly increases straw consumption. Carcasses and meat produced in these new systems are more coloured (redder) which creates challenges for product marketability. All project results have been widely disseminated, including a final webinar available at https://idele.fr/renouveau/publications/.

Keywords: veal calves, production method, housing, outdoor, innovation

1. Introduction

La production de veaux de boucherie est une spécificité française[2] qui doit relever de nouveaux défis. Cette production doit faire face à un contexte de baisse structurelle des volumes produits et consommés, mais également à de nouvelles attentes des citoyens-consommateurs français concernant les modes de production des denrées alimentaires. Concernant les modes d'élevages, leurs attentes portent essentiellement sur la prise en compte du bien-être et de la santé des animaux. La production de veau de boucherie est actuellement réalisée dans des ateliers spécialisés, engraissant des veaux âgés en moyenne de 3 semaines à leur arrivée, en provenance des élevages laitiers naisseurs. Cet engraissement est effectué dans des bâtiments fermés et ventilés, en parcs collectifs, et majoritairement sur plancher ajouré en bois.

Le projet RenouVeau s'intéresse à la partie engraissement de ces veaux en visant à évaluer différents modes de production de veaux de boucherie, innovants du point de vue du logement et des conduites alimentaires appliquées. Les différents modes de production étudiés dans ce projet sont basés sur les attentes sociétales et visent à apporter aux opérateurs de la filière (éleveurs et intégrateurs) des références techniques et économiques afin qu'ils puissent se positionner sur l'intérêt de ces nouveaux modes de production dans leur propre contexte. Les objectifs poursuivis dans RenouVeau peuvent être déclinés en trois grands axes :

1. Répondre aux nouvelles attentes sociétales en termes de bien-être et de santé de l'animal,
2. Proposer de nouvelles pratiques d'élevage plus durables, tant du point de vue sociétal qu'économique,
3. Fournir des produits (viande et cuir) qui répondent aux besoins des transformateurs et des consommateurs.

La réalisation du projet s'est appuyée sur un partenariat large associant l'Institut de l'Élevage (chef de file) à différents organismes institutionnels (INRAE, IDELE, AGESEM, CRAB, UMT RIEL, INTERBEV, BANKIVA), des entreprises commerciales (SVA, Tanneries HAAS) et des établissements d'enseignement agricole (EPLEFPA de Rethel, Agro-Campus Ouest).

2. À l'écoute des attentes sociétales : enquêtes et concours d'idées pour repenser la production de veaux

2.1. Méthodes de travail utilisées

Le projet « RenouVeau » a mobilisé différentes approches pour recueillir les avis de 3 types de publics : les ONG (Organisations non gouvernementales) de protection animale, les consommateurs, et les étudiants en agriculture.

Les attentes des ONG ont été identifiées à travers l'analyse des travaux pilotés par l'interprofession (INTERBEV section veaux) au sein d'un groupe de travail concerté, animé par le cabinet Bankiva (bureau spécialisé en conseil et expertise sur le bien-être animal). Ce groupe, composé de trois associations "welfaristes" (CIWF France, Welfarm, LFDA) et des professionnels du secteur (éleveurs, intégrateurs), s'est réuni en 2020 pour échanger sur les modes de logement des veaux de boucherie et des pratiques d'élevage futures.

Les attentes des consommateurs ont été étudiées à l'aide d'un questionnaire en ligne, diffusé entre mars et mai 2021. Ce questionnaire, élaboré via l'outil LimeSurvey, visait à recueillir les opinions d'un échantillon représentatif de consommateurs à travers la France (âge, localisation géographique). Au

total, 2600 consommateurs ont répondu à l'enquête en ligne. Les réponses ont permis de mieux appréhender les attentes des consommateurs en matière de logement et d'alimentation des veaux.

Enfin, un concours d'idées a été organisé par l'Institut de l'Élevage auprès des étudiants des établissements d'enseignement agricole, agronomique et vétérinaire. 26 groupes d'étudiants représentant un total de 100 étudiants provenant de 11 écoles ont imaginé l'élevage de veau de demain, en répondant à des enjeux de bien-être animal, de santé et d'environnement. Chaque groupe a présenté ses idées sous forme de plans de bâtiments et d'un descriptif détaillé de la conduite des animaux.

Cette méthodologie a permis de recueillir des perspectives diversifiées et d'explorer de nouvelles idées pour l'évolution de la production de veau de boucherie.

2.2. Résultats obtenus

Concernant les ONG de protection animale, les principales revendications des associations welfaristes françaises se concentrent sur quatre points : l'accès des veaux à l'air libre, l'interdiction de l'élevage des veaux en boxes individuels (autorisé actuellement jusqu'à l'âge de 8 semaines), la présence de litière au sol, et une alimentation intégrant plus de fourrage grossier et de fer (teneurs en fer maîtrisées dans les systèmes de production actuels, pour répondre aux exigences du marché en viande rosée claire). Les conditions minimales requises pour le bien-être des veaux selon les ONG est résumé dans la figure 1.



Figure 1 : Conditions minimales requises pour le bien-être animal selon les ONG (source : BANKIVA).

Pour les consommateurs, les résultats du questionnaire en ligne révèlent un manque de connaissance sur les pratiques d'élevage des veaux (58 % déclarant ne pas connaître ces pratiques). Pour ces consommateurs sondés, l'image de l'élevage de veaux obtient une note moyenne de 5,5 sur 10 (échelle allant du très négatif à très positif). Parmi les points négatifs qui sont cités, on trouve les notions de claustration, de mal-être animal ou d'élevage « intensif ». Concernant le logement, 83 % des consommateurs souhaitent voir les veaux à l'extérieur en été, au pâturage, tandis que 65 % préfèrent qu'ils disposent d'un bâtiment ou d'un abri en hiver, mais avec un accès extérieur. Par ailleurs, 49 % des participants estiment que les veaux devraient être logés sur de la paille lorsqu'ils sont en bâtiment.

Enfin, pour le concours d'idées organisé auprès des étudiants en agriculture, sur les 26 projets présentés, 22 projets ont souligné l'importance d'une ouverture des bâtiments, dont 14 proposent un accès extérieur pour les veaux. L'élevage des veaux sur litière a été mentionné dans 21 projets, l'augmentation des surfaces par veau dans 12 propositions, tandis que l'enrichissement du milieu et la mise à disposition de lumière naturelle ont respectivement été suggérés dans 7 projets. De plus, 8 projets ont insisté sur l'importance de fournir du foin aux veaux.

En conclusion, les attentes principales concernant la production de veau de boucherie se rejoignent sur plusieurs points : un logement dans un bâtiment plus ouvert, avec un accès à l'extérieur et à la lumière naturelle, un hébergement en groupe dès l'arrivée en atelier d'engraissement, et l'utilisation de litière pour le couchage.

3. Impact des conduites de veaux de boucherie avec accès extérieur : santé, propreté, bien-être animal et performances zootechniques

3.1. Méthodes de travail utilisées

En réponse aux attentes sociétales, deux modèles de production innovants offrant l'accès à l'extérieur aux veaux de boucherie ont été étudiés afin de mesurer leur impact sur le bien-être, la santé et les performances zootechniques des animaux. L'impact des conduites avec accès extérieur a été évalué au cours de trois essais identiques réalisés en 2020, à l'été 2021 et durant l'hiver 2021-2022 afin de disposer de conditions climatiques variées. Les veaux étaient des mâles de race pure Prim'Holstein, âgés en moyenne de 21 jours à leur arrivée et pesant 52,9 kg. Ils ont été engraissés durant 169 jours.

Les modalités comparées dans cette étude comprenaient un lot témoin (60 veaux au total des 3 essais), représentant une conduite classique en bâtiment fermé et ventilé, sur plancher ajouré bois, offrant un espace de 1,8 m² par veau (Photo 1). Les veaux ont été conduits en logement individuel pendant 4 semaines avant d'être placés en parcs collectifs, conformément à la réglementation. Les veaux de ce lot étaient nourris avec du lait reconstitué, distribué au seau et de l'aliment solide (mélange de concentrés et de paille) distribué à l'auge. La deuxième modalité, désignée « Courette » (75 veaux au total), consistait en une conduite en bâtiment avec accès extérieur sur une courette bétonnée. Les veaux étaient logés dès le départ en parc collectif avec couchage sur litière de sciure (2 m² par veau) et un portillon d'accès permanent à la courette (+ 2,5 m² par veau). Les veaux de ce lot étaient nourris avec un Distributeur Automatique de Lait (DAL), de l'aliment solide à l'auge et avaient accès à l'eau à volonté. La troisième modalité, appelée « Igloo » (60 veaux au total), correspondait à une conduite en plein air. Le logement pour ce lot était constitué d'un espace couvert de 2,5 m² par veau et d'un igloo pour abri de 1,4 m² par veau, le tout sur litière paillée pour les 2 premiers essais et sur sciure pour le 3e essai. Les veaux, logés en collectif dès le départ, étaient nourris avec du lait reconstitué, distribué au seau, de l'aliment solide distribué à l'auge et avaient accès à de l'eau à volonté dans un bac.



Photo 1 : Illustration des 3 modèles de production mis en comparaison. Crédits photo : CIRVEAU

L'état sanitaire des veaux a été suivi sur toute la période d'engraissement avec un enregistrement de tous les traitements sanitaires individuellement. La propreté des veaux a été notée mensuellement sur une échelle de 1 (très propre) à 4 (très sale). Le bien-être a été apprécié par des observations comportementales sur des journées, de 6h à 20h en continu, sur trois périodes distinctes pendant l'engraissement (démarrage, mi-engraissement et fin d'engraissement). Le nombre de veaux par activité a été comptabilisé toutes les 5 minutes sur la base de 23 activités, et la fréquence ainsi que la durée des comportements tels que les jeux de langue ou les succions de prépuces ont également été enregistrées individuellement. Des podomètres ont été installés sur 10 veaux par lot et par essai pendant trois semaines par période d'engraissement pour mesurer leur position (debout/couché) et leur déplacement. Les performances zootechniques ont été mesurées par des pesées individuelles à l'arrivée puis tous les 28 jours jusqu'à l'abattage. La consommation individuelle de lait ainsi que la consommation collective de solide par parc ont également été mesurées. Enfin, le poids, l'état d'engraissement et la conformation des carcasses ont été notés à l'abattoir.

Les différences significatives ($p<0,05$) entre les lots pour le travail mené dans cette partie 3 comme dans la partie 4 ont été déterminées par analyse de la variance (ANOVA) en utilisant la méthode de la différence des moindres carrés de la procédure du modèle linéaire général de R (R 4.2.3).

3.2. Résultats obtenus

Sur le plan sanitaire, l'accès extérieur n'a pas montré d'impact négatif sur la santé des veaux (Tableau 1). Les veaux du lot « Courette » et ceux du lot « Témoin » ont reçu en moyenne 2 traitements collectifs, et le nombre de traitements individuels a été comparable : 0,9 traitement pour le lot « Témoin » et 0,8 traitement pour le lot « Courette ». Pour le lot « Igloo », malgré des variations entre bandes (de 1 à 3 traitements collectifs), aucun écart significatif n'a également été observé par rapport au lot « Témoin » et les traitements n'ont pas été plus nombreux en période hivernale. Ce lot « Igloo » a reçu en moyenne 1,7 traitement collectif, et 1,4 traitement individuel. Ces résultats montrent des résultats sanitaires comparables entre les différentes modalités, sans dégradation lié à l'accès extérieur.

Tableau 1 : Nombre de traitements sanitaires moyens individuels et collectifs par lot sur les 3 essais (moyenne ± écart-type)

	Lot « Témoin »	Lot « Courette »	Lot « Igloo »
Traitements digestifs individuels	0,1 ± 0,5	0,1 ± 0,3	0,2 ± 0,6
Traitements respiratoires individuels	0,9 ± 0,9	0,8 ± 1,0	1,1 ± 1,1
Traitement collectifs	2	2	2
Total traitements	3,0 ± 0,9	2,8 ± 1,0	3,0 ± 0,9

Concernant la propreté des veaux, les lots avec accès extérieur (lots « Courette » et « Igloo ») ont montré une détérioration progressive de la propreté à partir de la mi-engraissement. Dans le lot « Courette », l'utilisation de litière a nécessité une sous-couche de paille de 42,8 kg/veau et 2,64 m³ de sciure par veau, avec trois curages par bande. Les caractéristiques de la sciure (essence de bois et taux d'humidité) ont été très variables en fonction des livraisons et son pouvoir d'absorption a fluctué entre 15 % et 35 %. La fréquence d'apport de sciure est passée d'une fois par semaine en début d'engraissement à trois fois par semaine en fin de période. Pour le lot « Igloo », 554 kg de paille par veau ont été nécessaires, avec 3,7 curages par bande. Une réduction de la quantité de paille se traduisait par une augmentation significative des salissures sur les veaux, atteignant un pic de 100 % de veaux sales en période de finition sur une bande ayant reçu seulement 300 kg de paille.

En ce qui concerne l'évaluation de l'activité des veaux en milieu d'engraissement, les veaux des lots « Courette » et « Igloo » ont utilisé l'espace extérieur, avec une augmentation des déplacements (1 208 pas/jour pour le lot « Igloo », 774 pas/jour pour le lot « Courette », contre 293 pas/jour pour le lot « Témoin ») (Figure 2b). Les veaux ayant accès à l'extérieur ont passé 29 % de leur temps en extérieur pour le lot « Courette », contre 88 % pour le lot « Igloo ». Le temps passé couché était assez proche entre les lots (68 % pour le « Témoin », 65 % pour le lot « Courette », et 63 % pour le lot « Igloo »), avec une légère tendance à la baisse pour les veaux avec accès extérieur. Les veaux du lot « Igloo » ruminent plus souvent (7,5 % du temps contre 0 % pour le « Témoin »), tandis que les veaux « Courette » ruminent 3,4 % du temps. Les comportements négatifs tels que les succions de prépuces ont été observés dans tous les lots (46 % des veaux « Témoin », 49 % des veaux « Courette », et 45 % des veaux « Igloo »), mais la proportion de veaux réalisant des jeux de langue est plus faible pour les lots avec accès extérieur (72 % des veaux « Témoin », contre 25 % des veaux « Courette » et 20 % des veaux « Igloo »). En ce qui concernent les comportements de succions de matériaux, ceux-ci étaient très présents dans tous les lots représentant environ 85 % des veaux en moyenne.

Enfin, les jeux entre veaux (chevauchements, tête à tête, courses) étaient plus fréquents dans les lots offrant un accès extérieur, bien que ces comportements ne représentent qu'une faible proportion du temps total : 1 % pour le « Témoin », 2,05 % pour le lot « Courette » et 2,26 % pour le lot « Igloo » (Figure 2a).

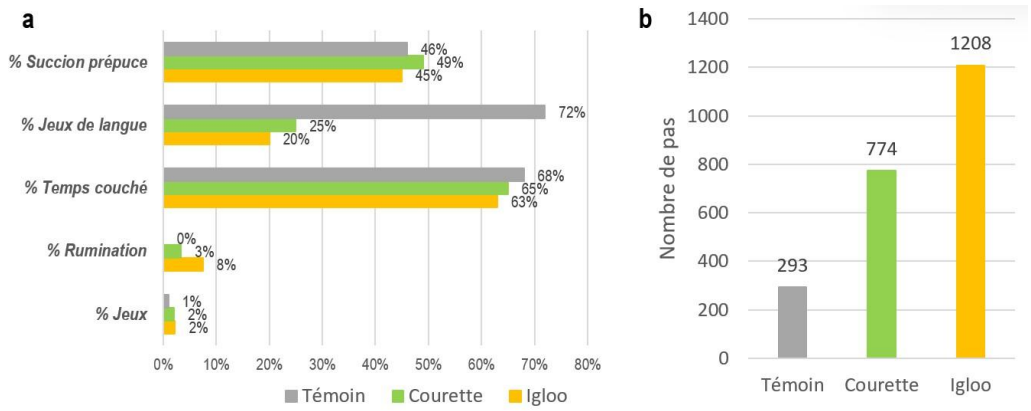


Figure 2 : Comparaison des comportements des veaux selon les conduites : proportion de veaux à réaliser des succions de prépuces et des jeux de langues ainsi que la proportion du temps couché, à ruminer et à jouer (a) et nombre de pas réalisé (b) en milieu d'engraissement.

Du point de vue des performances zootechniques, les veaux du lot « Courette », nourris au DAL, ont consommé 10 % de lait en moins par rapport au lot « Témoin » nourri au seau, soit une réduction de 30 kg. Ce déficit, notamment en fin d'engraissement, a été attribué à des problèmes de distribution au DAL (concurrence et vols de repas entre veaux). Les veaux avec accès extérieur ont consommé un tiers de plus d'eau que les veaux du lot « Témoin », avec des variations saisonnières (800 litres par veau sur la bande engraissée en hiver, 1 200 litres sur la bande engraissée en été). Pour le lot « Igloo », la consommation de paille de litière par les veaux a été importante, (observée mais non mesurable). Les performances de croissance des veaux du lot « Igloo » ont été similaires à celles du lot « Témoin » (1 251 g/j contre 1 277 g/j), avec des poids vifs avant abattage comparables (269 kg pour le lot « Témoin », 265 kg pour le lot « Igloo »). En revanche, le lot « Courette » a montré une croissance plus faible (-9 %) avec un poids vif de 250 kg avant abattage, soit près de 20 kg de moins que le lot « Témoin », probablement dû à la baisse de consommation alimentaire engendrée par les problèmes survenus sur le DAL en fin de période (Tableau 2). Par conséquent, les carcasses des veaux engraissés dans le lot « Igloo » étaient bien conformées et bien finies, tandis que celles des veaux du lot « Courette » étaient moins bien conformées.

Concernant la couleur des carcasses, le lot « Igloo » présentait le plus fort pourcentage de carcasses colorées, avec 74,2 % des veaux notés 3 ou 4 sur l'échelle de couleur (1 : rosé très clair à 4 : rouge), contre seulement 10,3 % pour le lot « Témoin ». Le lot « Courette » se situe entre les deux, avec 39,4 % de carcasses colorées. Parmi les explications possibles pour ces résultats, on peut citer la consommation de litière riche en fer, la présence de barrières galvanisées et non inox pour ces modes de logement et une activité physique plus importante pour les veaux ayant accès à l'extérieur.

Tableau 2 : Nombre de traitements moyens individuels et collectifs par lot (moyenne ± écart-type des 3 répétitions). **Echelle de 1 à 4 (1 : rosé très clair à 4 : rouge).*

	Lot « Témoin »			Lot « Courette »			Lot « Igloo »		
Poids vif abattage (kg)	269,2	±	26,6	249,5	±	22,3	264,6	±	11,6
Gain moyen quotidien (g/j)	1277	±	154	1160	±	130	1251	±	75
Poids de carcasse (kg)	145,3	±	16,0	134,2	±	13,7	141,8	±	7,3
Conformation (% P)	28,3			32,6			10,8		
Couleur (% de notes 3 ou 4)*	10,3			39,4			74,2		

4. Impact des nouveaux modèles de productions sur la qualité des produits

4.1. Méthodes de travail utilisées

Ce volet a étudié l'impact des différents modèles de production sur la qualité de la viande à travers une analyse de la qualité nutritionnelle, commerciale et gustative. La couleur de la viande a été notée directement à l'abattoir. Cette notation, réalisée sur les carcasses, est un paramètre essentiel dans l'évaluation de la qualité commerciale. Concernant l'appréciation de cette qualité commerciale, des tests d'achat en conditions réelles ont été réalisés dans des magasins de la grande distribution. Les consommateurs ont évalué visuellement des barquettes anonymes contenant une côte de veau de chaque lot (« Témoin », « Courette », « Igloo »), sans étiquetage, afin de classer spontanément les produits selon leurs préférences visuelles et sans connaitre l'origine du produit (rang 1 : viande préférée à rang 6 : viande la moins appréciée, avec 2 côtes présentées par lot). Pour chacun des lots en essai, 12 veaux ont été prélevés. Ces tests ont été réalisés dans trois villes réparties dans trois bassins de consommation de veau en France et regroupant près de 300 consommateurs. La qualité gustative a été mesurée à travers des dégustations réalisées par deux types de jury : un jury de 12 experts, spécialisé dans la dégustation de viande, a jugé la couleur de la viande dans l'assiette, la tendreté, la flaveur et la satisfaction globale en bouche, tandis qu'un jury de plus de 200 consommateurs lambda a évalué l'envie de reconsommer et la satisfaction globale. Ces dégustations ont concerné la noix du long dorsal prélevée au niveau du carré de veau, cuite de manière standardisée. La qualité nutritionnelle a été évaluée par des analyses de la teneur en fer, en lipides, et en acides gras. Ces analyses ont permis d'évaluer l'influence des systèmes d'élevage sur les caractéristiques nutritionnelles et sensorielles des viandes.

4.2. Résultats obtenus

Les résultats de l'étude ont révélé des différences marquées entre les viandes des lots « Témoin », « Courette » et « Igloo » sur plusieurs aspects de la qualité, tant au niveau visuel, gustatif, que nutritionnel.

En termes de qualité nutritionnelle, les teneurs en fer héminique des viandes confirme la couleur des carcasses des veaux observée à l'abattoir. Les viandes du lot « Igloo » présentaient des teneurs en fer significativement plus élevées, avec 8,3 µg/g, comparativement aux viandes des lots « Témoin » (5,0 µg/g) et « Courette » (6,6 µg/g), qui n'étaient pas significativement différents entre eux. Les teneurs en lipides intramusculaires sont de 2,1 % pour les lots « Témoin » et « Igloo », contre 1,5 % pour le lot « Courette », témoignant de carcasses moins finies pour ce lot. Les variations de compositions en acides gras des viandes sont directement liées à ces différences de teneurs en lipides avec des proportions d'acides gras poly-insaturés significativement plus élevées pour le lot « Igloo » (21,5 % contre 16,5 % pour les 2 autres lots).

Les tests d'achat réalisés en magasins ont montré une très légère préférence visuelle pour les viandes issues du lot « Témoin » (Figure 3a). Sans connaissance des modes de production, la viande du lot « Témoin » a été légèrement mieux classée par les consommateurs en moyenne que les 2 autres lots (rang moyen de 3,3, contre 3,6), ceci pouvant être mis en lien avec la couleur des viandes, critère cité parmi d'autres par les consommateurs pour la réalisation de ce classement. Cependant, lorsque les consommateurs ont été informés des conditions de logement des animaux, leurs préférences se sont inversées (Figure 3b). La viande des veaux du lot « Igloo » a été nettement préférée, avec un rang moyen de classement de 2,0, contre 3,3 pour le lot « Courette » et 5,1 pour le lot « Témoin ». Cela montre que les consommateurs sont fortement influencés dans leur choix par la connaissance du mode de logement, préférant des viandes issues d'animaux ayant accès à l'extérieur et logés sur paille.

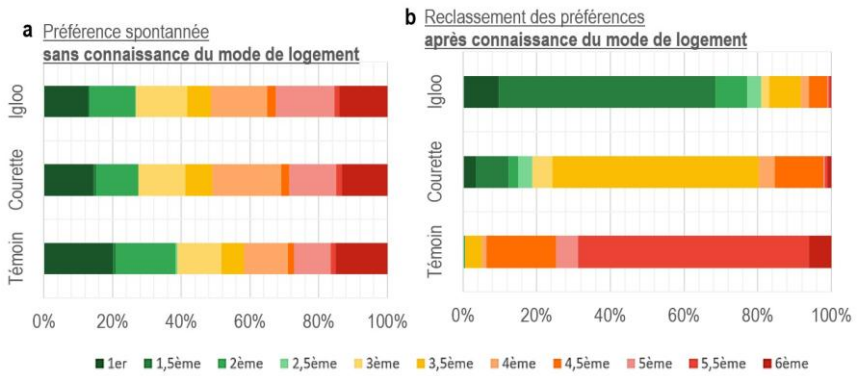


Figure 3 : Répartition du classement des 3 viandes des 3 lots par les consommateurs sur l'aspect visuel lors des tests d'achat en magasin (2 côtes de veau par lot) : sans connaissance du mode de logement (a) puis après connaissance du mode de logement (b)

Les résultats des tests de dégustation, tant par un jury d'experts que par des consommateurs lambda, ont confirmé que la qualité gustative des viandes issues des différents lots est globalement bien perçue en bouche. Concernant l'intensité de la couleur en surface de la viande cuite avant dégustation, le jury d'experts a attribué des notes de 4,5 pour le lot « Témoin », 5,2 pour le lot « Courette » et 5,7 pour le lot « Igloo » (échelle de 0 à 10 du plus clair au plus foncé), confirmant que la viande des veaux ayant accès à l'extérieur est plus foncée, également après cuisson. En termes de tendreté, la viande du lot « Courette » a été jugée significativement plus tendre, avec une note de 6,5, suivie par le lot « Igloo » à 6,1, et enfin le lot « Témoin » à 5,9 (échelle de 0 à 10 du plus dur au plus tendre). La flaveur de la viande, évaluée sur une échelle de 0 (non intense) à 10 (très intense), n'a montré aucune différence significative entre les lots : 5,6 pour le « Témoin », 5,9 pour le lot « Courette » et 5,9 pour le lot « Igloo ». Concernant les consommateurs, s'ils ont jugé positivement le niveau qualitatif de ces 3 viandes, ils ont exprimé un niveau de satisfaction globale plus élevé pour les viandes issues des lots « Courette » (7,2) et « Igloo » (7,0), par rapport au lot « Témoin » (6,2) (échelle de 0 à 10). Ainsi, les préférences des consommateurs confirment globalement les tendances observées par les experts, avec une viande perçue comme légèrement plus qualitative en bouche pour les lots ayant accès à l'extérieur.

5. Impact économique des nouveaux modèles avec accès extérieur et valorisation des produits

5.1. Méthodes de travail utilisées

L'impact économique de ces nouveaux modèles de productions offrant un accès à l'extérieur via une courette bétonnée pour le lot « Courette » ou par le biais d'une structure légère pour le lot « Igloo » a été comparé aux modèles classique lot « Témoin » en bâtiment fermé et ventilé. L'analyse a pris en compte les produits et charges supportés par l'intégrateur et l'éleveur.

Pour l'intégrateur, les produits sont les prix de vente des carcasses. Les charges incluent le prix d'achat des veaux à leur arrivée (ajusté avec une mortalité de 4 %), les coûts alimentaires (aliments solides, paille *et al*iments d'allaitement), et le coût des médicaments. Ces éléments ont permis de calculer la marge sur coûts alimentaires et médicaux ainsi que le prix de revient des carcasses avant rémunération de l'éleveur.

Du côté de l'éleveur, l'analyse des charges a porté sur les investissements dans les bâtiments et les structures, ainsi que sur les charges opérationnelles propres à chaque conduite. Pour le lot témoin, les coûts ont été estimés en se basant sur les références du réseau Inosys 2021-2022[3], avec une densité de 1,8 m² par veau. Les coûts pour le lot « Courette » ont pris en compte une surface totale de 4,5 m²

par veau, dont 2,5 m² pour la courette extérieure bétonnée, et pour le lot « Igloo », une surface totale de 3,9 m² par veau, le tout sur une dalle béton. En plus des coûts d'infrastructure, le coût des litières pour les 2 lots avec accès extérieur a été intégré. Les charges opérationnelles, comme l'électricité, le gaz, l'eau pour le lavage…, ont également été calculées, en se basant sur les références Inosys. Les frais annexes, tels que l'épandage, l'entretien, et les assurances, ont complété l'analyse des charges. Pour finir, un solde a été calculé pour évaluer la rémunération de l'éleveur et les charges sociales, en prenant en compte une hypothèse de prestation de 130 € par veau, permettant ainsi une comparaison globale de la rentabilité des différents modèles de production.

5.2. Résultats obtenus

L'analyse économique des différents systèmes de production, comparant les conduites avec et sans accès à l'extérieur, a permis d'évaluer leur impact sur les coûts pour l'intégrateur et l'éleveur, ainsi que sur la rentabilité globale. Cette comparaison fait ressortir des différences significatives en termes de prix des carcasses, des marges et des charges liées à chaque modèle.

Pour les charges supportées par l'intégrateur, les résultats montrent que la couleur des carcasses joue un rôle déterminant dans leur valorisation économique à l'abattoir (Tableau 3). Les carcasses plus rouges, comme celles observées dans les lots « Courette » et « Igloo » (cf. partie 4.2), ont été pénalisées en termes de prix de vente. Cette différence se traduit par une baisse du prix moyen par kilogramme de carcasse de -0,34 € pour les veaux du lot « Courette » et de -1,05 € pour les veaux du lot « Igloo », comparativement aux veaux du lot « Témoin ». De plus, la réduction du poids des carcasses moyen pour les veaux du lot « Courette » a amplifié cette différence de prix. Ainsi, la baisse de prix de vente des carcasses s'élève à près de -105 € pour le lot « Courette » et -170 € pour le lot « Igloo », par rapport au lot témoin (dont le prix de vente moyen des carcasses est de 780 €). Le prix de vente des carcasses des veaux des lots « Courette » et « Igloo » n'a pas dépassé les 700 €. En ce qui concerne les couts alimentaires, on constate des écarts limités entre lots. Les veaux du lot « Courette » ont consommé moins d'aliments, en raison des problèmes du système d'alimentation au DAL (cf partie 3.2, tableau 2), entraînant un coût alimentaire de 546 € contre 577 € et 579 € pour les lots « Témoin » et « Igloo ».Toutefois, en tenant compte des coûts sanitaires (sans différence significative) et du prix identique de l'achat des veaux, la marge sur coûts alimentaires et sanitaires par veau se révèle être de 45 € pour le lot « Témoin », mais négative pour les lots avec accès extérieur : -28 € pour le lot « Courette » et -122 € pour le lot « Igloo ». Cette baisse de rentabilité est principalement due à la dévalorisation des carcasses ressorties plus foncées.

Tableau 3 : Comparaison des charges intégrateur et valorisation des carcasses selon les différents lots de production (en euros par veau)

	Lot « Témoin »	Lot « Courette »	Lot « Igloo »
Valorisation des carcasses (en €)			
Prix de vente par kg carcasse	5,38	5,04	4,33
Écart prix de vente par kg de carcasse / » Témoin »	-	*-0,34*	*-1,05*
Prix par carcasse	780,20	675,30	611,10
Écart prix de vente carcasse / » Témoin »	-	*-104,90*	*-169,10*
Charges intégrateurs (en €)			
Coût alimentaire total par veau sorti	577,20	546,80	579,00
Autre charges (coût vétérinaire + coût du veau)	158,00	156,40	154,60
Charges totales	735,10	703,10	733,60
Marge sur coût total (en €)			
Marge	45,10	-27,80	-122,50
Ecart marge /Témoin	-	*-72,90*	*-167,60*

Côté éleveur, les charges liées à l'investissement dans les bâtiments et les structures varient significativement selon les conduites (Tableau 4). Le coût d'investissement pour le lot "Témoin" a été estimé à 1 900 € par place (Inosys 2021-2022). Ce coût monte à 2 200 € par place pour le lot « Courette », en raison de la surface supplémentaire et de la courette extérieure bétonnée et est seulement de 1 200 € par place pour le lot « Igloo ». L'amortissement calculé sur 15 ans s'élève donc à 127€ pour le lot "Témoin", 147 € pour le lot « Courette » et 80 € pour le lot « Igloo ». Les charges opérationnelles varient également selon les conduites, principalement en raison des coûts de la litière. Les prix des litières retenus sont de à 0,10 €/kg pour la paille et de 17 €/m3 pour la sciure. Le coût de l'eau, quant à lui, reste similaire entre les lots. En prenant en compte les charges d'eau et de litière, le total atteint 5,60 € par veau pour le lot "Témoin", contre 55 € pour le lot « Courette » et 61 € pour le lot « Igloo ». Pour les autres charges opérationnelles, comme l'électricité et le gaz, les coûts sont similaires entre le lot « Témoin » et le lot « Courette » à 19,5 € par veau, tandis que le lot « Igloo » bénéficie d'un coût réduit de 15,5 € en raison de ses besoins moindres en électricité.

Les charges opérationnelles totales par veau s'élèvent donc à près de 45 € pour le témoin, 133 € pour le lot « Courette » et 137 € pour le lot « Igloo ». Les autres charges (épandage, entretien, assurances, frais financiers) sont comparables, bien que légèrement inférieures pour le lot « Igloo » du fait de son investissement réduit. En intégrant la rémunération de l'éleveur (prestation) et un roulement de 1,79 bandes par an de chacune des 3 conduites, les conduites avec accès extérieur montrent un déficit significatif. En effet, si dans le contexte des hypothèses de prix retenues pour ce calcul, le solde final pour l'éleveur, est légèrement positif pour le lot « Témoin » à 2,40 € par place, il s'avère très négatif pour les lots « Courette » et « Igloo », respectivement à -112 € et -29 €.

Tableau 4 : Analyse des charges supportées par l'éleveur selon les conduites de production (en euros)

	Lot « Témoin »	Lot « Courette »	Lot « Igloo »
Hypothèse investissement des bâtiments (en €)			
Hypothèse coût investissement bâtiment /place	1 900,00	2 200,00	1 200,00
Amortissement du bâtiment 15 ans /place	126,70	146,70	80,00
Charges supportées par l'éleveur (en €)			
Coût litière / veau	-	49,20	55,40
Coût eau / veau	5,60	5,80	5,80
Sous total 1 / veau *(Litière + eau)*	*5,60*	*55,00*	*61,20*
Sous total 2 / veau *(Gaz, électricité, lavage)*	*19,50*	*19,50*	*15,50*
Total charges opérationnelles/place *(Sous total 1+2)*	***44,80***	***133,10***	***137,00***
Autres charges par place *(Épandage, entretien, assurance, compta, gestion, frais financier d'après hypothèse bâtiment)*	*58,30*	*64,40*	*44,20*
Total Charges partielles / places *(Total charge op + autre charges)*	**103,10**	**197,40**	**181,20**
Charges partielles + amortissement par place	*229,80*	*344,10*	*261,20*
Prestation par place *Hypothèse de 130€/veau et 1,79 bande par an*	*232,20*	*232,20*	*232,20*
Solde final pour l'éleveur / place *(Avant rémunération du travail et charges sociales)*	***+ 2,40 €***	***-111,90 €***	***-29,00€***

Les modèles de production avec accès à l'extérieur (Lots « Courette » et « Igloo ») sont pénalisés sur le plan économique, principalement en raison de la dévalorisation des carcasses et des coûts supplémentaires liés à la litière et aux infrastructures.

6. Conclusion

Le projet RenouVeau a visé à étudier de nouveaux modèles de production de veau de boucherie afin de répondre aux attentes sociétales sur les questions de bien-être et de santé animale. Différents publics ont été enquêtés (consommateurs, ONG welfaristes, étudiants en agriculture) et ont permis de montrer qu'une des principales attentes sociétales portait sur la possibilité pour les veaux d'accéder à l'extérieur. Différents systèmes de production avec accès à l'extérieur ont ainsi été testés dans ce projet : un système où les veaux ont été produits dans un ancien bâtiment fermé et ventilé, sur litière sciure dans lequel a été créé une ouverture pour permettre aux veaux d'accéder à une courette bétonnée quand ils le souhaitaient et un système de production en plein-air où les veaux disposent d'un parc couvert connecté à un abri en forme d'igloo, le tout sur litière paillée ou sciure. Dans ces 2 systèmes, les animaux sont alimentés avec des aliments du commerce : de la poudre de lait réhydratée pour le lait et un mélange de concentrés et de paille pour l'aliment solide.

D'un point de vue comportemental, les veaux ayant accès à l'extérieur occupent cet espace extérieur et réalisent plus de déplacements, mais *a contrario* ont réduit légèrement leur temps de couchage. Cependant, les comportements stéréotypés (comme les succions des prépuces, succions de matériaux, et jeux de langue), ont persisté. L'état de santé des veaux en extérieur ne s'est pas dégradé.

Les croissances des veaux avec accès extérieur ont été satisfaisantes à l'exception des veaux alimentés au DAL où ces croissances ont été freinées par des baisses de consommation avec ce mode de distribution entrainant de la compétition entre veaux et des vols de repas. Les poids et conformation des carcasses produites ont été satisfaisantes, mais la couleur plus prononcée des carcasses des veaux ayant eu accès à l'extérieur a rendu difficile leur valorisation économique sur les circuits classiques. Ceci s'expliquant notamment par la consommation de litière paillée.

Ces résultats montrent que, même si ces nouveaux systèmes de production avec accès à l'extérieur répondent en partie aux attentes sociétales en matière de bien-être animal, ils se heurtent à une rentabilité économique difficile à atteindre sans une meilleure valorisation des carcasses. Si en dehors du critère de couleur, la qualité des carcasses et des viandes produites sur ces nouveaux systèmes de production est globalement satisfaisante, la couleur prononcée de ces viandes est rédhibitoire pour leur commercialisation sur des circuits de distribution classique. En effet, les consommateurs délaissent ces viandes en rayon s'ils ne disposent pas d'informations sur leurs conditions de production. Cette viande ne sera acceptée par les consommateurs que si cette information leur est mise à disposition. Cela pourrait être mis en œuvre par exemple dans le cas d'une démarche de qualité distinctive avec un prix de vente supérieur qui pourrait permettre une meilleure valorisation du produit .Au final, ces conduites répondant aux attentes sociétales en matière de bien-être animal ne pourront être économiquement viables que si les carcasses (pour les intégrateurs ou les éleveurs non intégrés) ou les prestations (pour les éleveurs en modèle intégré) sont à un montant supérieur de celles des systèmes de production standards.

Toutefois, des voies d'amélioration ont été mises en évidence afin d'optimiser les résultats sur ces différentes conduites que ce soit en termes de bien-être (limitation des stéréotypies) ou de performances (maintien des croissances et limitation de la coloration des carcasses), soit via l'adaptation du logement des veaux (exposition des bâtiments, type de litière…) ou de leur alimentation (mode de distribution du lait, type de fourrage, …). Le nouveau Centre d'Innovation et de Recherche sur le Veau (CIRVEAU[4]) basé à Mauron (56) offre une opportunité unique pour poursuivre ces travaux, avec des conceptions de bâtiments innovants pensés pour répondre au mieux aux attentes sociétales ainsi qu'aux professionnels de la filière.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Tous les auteurs et autrices ont lu et approuvé le manuscrit final.
Rédacteur : Didier BASTIEN

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous remercions tous les partenaires (idele, INRAE, Agrocampus Ouest, SVA, Tanneries Haas, Bankiva, EPLEFPA-RETHEL) pour leur précieuse collaboration dans la réalisation du projet RenouVeau.

Déclaration de soutien financier

Le projet RenouVeau a été financé par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire via l'appel à projet du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural (CASDAR) Innovation et Partenariat 2019.

Références bibliographiques

[1] Institut de l'Élevage (2024) Bien-être animal et innovation en élevage de veau de boucherie : ce qu'il faut retenir du webinaire RenouVeau. https://idele.fr/renouveau/publications/

[2] Institut de l'Élevage (2022). Les chiffres clés du GEB – Bovins 2022 – Productions lait et viande. Brochure Institut de l'Elevage/CNE.

[3] Institut de l'Élevage (2022). Résultats du réseau INOSYS 2021-2022 : Indicateurs techniques et économiques des élevages de veaux de boucherie.

[4] CIRVEAU (2024). Centre d'Innovation sur le Veau. www.idele.fr

Pour citer cet article : Didier Bastien, Philippe Briand, Virginie Lefoul, Manuel Tourtier, Mathilde Vaillant, *et al*.. RenouVeau -Réinventer les modèles de production de veaux de boucherie alliant enjeux sociétaux, qualité des produits et viabilité économique. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.83-94. 10.17180/ciag-2025-vol107-art07

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Farinelli : Elevage de porcs mâles non castrés et valorisation des carcasses en agriculture biologique

Sarah LOMBARD[1], Armelle PRUNIER[2], Rodolphe VIDAL[1], Florent MASSOULIER[3], Bénédicte LEBRET[2], Chloé VAN BAELEN[2], Alexandre POISSSONNET[4], Florence MAUPERTUIS[5], Alexandre TORTEREAU[6], Samuel FROIS[7], Antoine ROINSARD[8]

[1] ITAB, 9 rue André Brouard, 49100 Angers, France

[2] PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

[3] ADIV, 10 rue Jacqueline Auriol, 63100 Clermont-Ferrand, France

[4] IFIP, 9 Boulevard du Trieux, 35740 Pacé, France

[5] Chambre d'agriculture de région Pays de Loire, 9 rue André Brouard, 49100 Angers, France

[6] BIO Direct, 2 Ecoparc de la Gravelle, 53410 La Gravelle, France

[7] FNAB, 40 rue de Malte, 75011 Paris, France

[8] FOREBIO, 117 rue de Charenton, 75012 Paris, France

Correspondance : antoine.roinsard@forebio.info / sfrois@fnab.org

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art08

Résumé

L'élevage de porcs mâles non castrés (MNC) présente un fort intérêt en bio pour améliorer les conditions de bien-être animal (arrêt de la castration), mais pose questions en matière de conduite d'élevage, de taux de mâles odorants, et d'utilisation des carcasses (risque d'apparition d'odeurs sexuelles en cas de concentration trop élevée en androsténone et scatol). Les résultats d'un observatoire mis en place dans 6 élevages ont montré qu'il serait possible de contenir le risque de mâles odorants (détectés par le test du nez humain) à quelques pourcents. Ce travail a aussi permis de formuler des recommandations pour les éleveurs. Une expérimentation menée à la station expérimentale Porganic a permis de confirmer l'effet favorable des fibres alimentaires sur la réduction de la teneur en scatol des viandes (gras de bardière) et mis en évidence l'effet favorable de la stratégie alimentaire sur d'autres dimensions de la qualité des viandes. Enfin, des tests sensoriels sur divers produits de porc ont confirmé l'intérêt de la dilution des viandes à risque d'odeur avec des viandes de porcs femelles pour valoriser la viande de MNC élevés dans les conditions de l'agriculture biologique.

Mots-clés : bien-être animal ; qualité de viande ; qualité organoleptique ; castration ; élevage biologique ; androsténone ; scatol

Abstract: Breeding of non-castrated male pigs and recovery of pork carcass in Organic Farming.

Rearing entire male pigs is of great interest in organic farming to improve animal welfare conditions (castration no longer required). But this raises questions about breeding practices, the expected rate of odorant (boar-tainted) males, and the use of carcasses from non-castrated males (NCM). There is a risk of boar-tainted pork in case of high androstenone and skatole concentrations. Results from an observatory set up on six farms have shown that it would be possible to contain the risk of boar-tainted males' carcasses to a few percent. This work also provided recommendations for breeders. Experiments carried out at the Porganic experimental farm confirmed the positive effect of dietary fibers on the decrease in pork (backfat) skatole content and highlighted the favorable effects of the feeding strategy on other pork quality properties. Finally, sensory tests on various pork products have confirmed

the benefits of diluting pork at risk for boar taint with pork from female pigs to use the meat from NCM in organic farming.

Keywords: animal welfare; pork quality; organoleptic qualities; castration; organic farming; androstenone; skatole

1. Introduction

La castration des porcelets est un sujet sensible en matière de bien-être animal et de qualité de viande, aussi bien en élevages conventionnels que biologiques. En France, depuis le 1er janvier 2022, la castration à vif des porcelets est interdite en agriculture biologique (AB) comme en agriculture conventionnelle. Deux alternatives sont possibles : la castration chirurgicale (jusqu'à 7 jours d'âge) avec prise en charge de la douleur (par anesthésie et analgésie), ou l'élevage de porcs mâles non castrés (MNC). L'amélioration du bien-être animal correspond aux attentes des consommateurs. On peut penser que les consommateurs de produits biologiques y sont encore plus sensibles. Ce mode d'élevage se caractérisant par des objectifs élevés en matière de bien-être animal, le plus cohérent est la suppression de la castration chirurgicale car les protocoles pratiqués ne soulagent que partiellement la douleur (Prunier *et al.*, 2020) et l'animal perd son intégrité physique (mutilation).

Selon des études menées essentiellement en élevages conventionnels, les MNC ont une meilleure efficience alimentaire (et donc moins de rejets, notamment azotés) et des carcasses plus maigres que les porcs mâles castrés (MC) (Parois *et al.*, 2018). Cependant, il existe chez les MNC un risque d'odeurs désagréables (dites « odeurs sexuelles ») de la viande, dues principalement à deux molécules lipophiles : l'androsténone (A) et le scatol (S), qui ont une grande affinité pour le tissu gras (Parois *et al.*, 2018). L'androsténone est sécrétée par les testicules de façon croissante au cours du développement sexuel ; le scatol est produit dans le gros intestin, à partir du tryptophane, par les micro-organismes qui y sont présents. Bien que le scatol soit également produit par les mâles castrés ou les femelles, sa concentration dans le gras de ces animaux est généralement moindre que chez les MNC du fait de l'absence de stéroïdes testiculaires. En effet, ces stéroïdes inhibent la dégradation du scatol dans le foie avant qu'il ne passe dans la circulation générale, d'où il sera déposé dans le tissu gras. Les concentrations en A et S sont influencées par différents paramètres de conduite d'élevage qui peuvent constituer des leviers d'action pour réduire le risque d'odeurs désagréables (Figure 1).

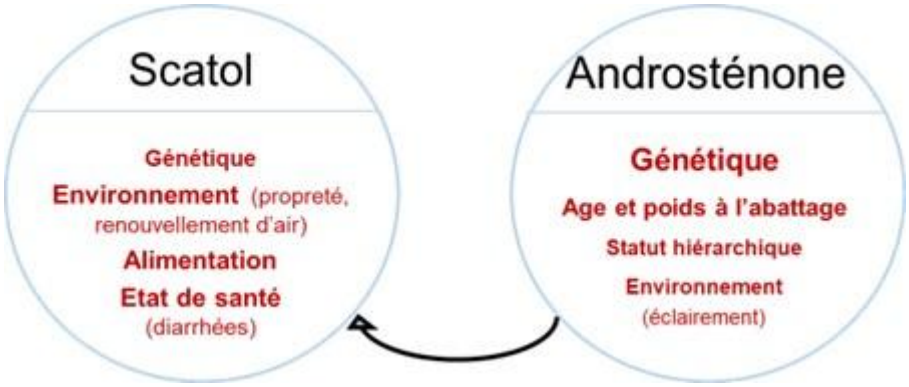


Figure 1 : Principaux facteurs de variation des concentrations en molécules odorantes dans le gras des porcs mâles non castrés, d'après Parois *et al.*, 2018. Plus les caractères sont gros, plus le facteur de variation a de l'importance. A noter que les stéroïdes sexuels, dont l'androsténone, augmentent la teneur en scatol du gras.

Par ailleurs, les MNC ont une plus grande propension à exprimer des comportements agressifs ou sexuels que les MC, comportements qui peuvent induire des blessures chez les autres porcs (Von Borell *et al.*, 2020). Arrêter la castration aura donc des conséquences aux différents échelons de la

filière : i) les éleveurs qui seront amenés à modifier leurs pratiques mais pourront y trouver un intérêt économique (moindre coût alimentaire, carcasses plus maigres) ; ii) les abatteurs qui devront identifier les carcasses odorantes ; iii) les transformateurs qui devront adapter leurs façons d'utiliser les carcasses et de transformer les viandes afin de préserver la qualité organoleptique des produits ; iv) les consommateurs qui pourront avoir une meilleure perception de l'élevage porcin en raison de l'arrêt de cette mutilation, mais qui pourront détecter des défauts d'odeur dans les viandes de MNC.

Si l'élevage de MNC est bien documenté en élevage conventionnel, peu d'études sont disponibles en AB. La production biologique présente des spécificités notamment en matière de génétique des animaux, de mode de logement des porcs (litière, moindre densité en élevage…) et de nature et origine des aliments. Ces paramètres sont susceptibles de modifier le risque d'apparition d'odeurs sexuelles. Des études propres à l'élevage biologique étaient donc nécessaires pour caractériser les conditions d'élevage des MNC et les conséquences en matière de performances zootechniques, de qualité des carcasses et des viandes (dont le risque d'odeurs sexuelles). Le projet FARINELLI a permis d'établir des recommandations propres à l'élevage de MNC en bio et d'identifier des premières pistes de solutions permettant de préserver la qualité organoleptique des produits.

2. Elevage de porcs mâles non castrés

Mieux connaître les conséquences de l'élevage de MNC en AB est nécessaire afin de préciser les atouts et contraintes de ce type d'élevage. Pour cela, six élevages de MNC ont été suivis pendant un an (Lombard *et al.*, 2024). De plus, deux essais ont été mis en place (Van Baelen *et al*, 2024a et b ; Poissonnet *et al.*, 2024) afin de tester des leviers potentiels de réduction du risque d'odeurs désagréables des viandes de MNC.

2.1. Elever des porcs mâles non castrés en agriculture biologique

Afin d'évaluer la faisabilité et l'intérêt de ne plus castrer les porcs mâles, six élevages ont été sélectionnés, sur la base du volontariat, de la présence de facteurs *a priori* favorables à la production de MNC et de la possibilité de conduire l'étude dans de bonnes conditions (Lombard *et al.*, 2024). Ils ne sont donc pas représentatifs de la production en AB, au sens statistique. Ces éleveurs ont accepté d'arrêter de castrer une partie des porcs mâles nés sur l'élevage afin de pouvoir suivre un lot de MNC pendant environ une année.

2.1.1. Les performances techniques

Tableau 1 : Performances techniques des porcs mâles non castrés en AB (Moyenne ± erreur standard ; PC : poids de carcasse chaude ; TMP : Teneur en muscle des pièces, Lombard *et al*., 2024)

Elevages	Age abattage, jours	PC, kg	TMP, %
Elevage 1	197±0,9	90,1±0,7	59,2±0,1
Elevage 2	209±1,5	91,8±0,7	60,5±0,1
Elevage 3	178±0,4	94,8±1,2	60,7±0,3
Elevage 4	185±1,0	99,2±1,6	59,1±0,3
Elevage 5	189±0,8	95,9±1,0	59,9±0,2
Elevage 6	209±2,1	94,2±0,2	60,4±0,7

L'âge à l'abattage (renseigné par l'éleveur) ainsi que le poids de la carcasse à chaud (PC) et la teneur en muscle des pièces (TMP, bordereaux d'abattage) ont été collectés sur les 849 MNC de l'étude. La plupart des MNC ont été abattus avant 210 jours d'âge (84 %) mais avec une variation importante entre élevages (Tableau 1, $P < 0,001$). Le PC est également variable entre élevages (Tableau 1, $P < 0,001$), ce qui s'explique probablement par des vitesses de croissance différentes en lien avec le niveau des apports alimentaires et le type génétique qui pouvaient différer entre élevages. La moyenne des TMP

des MNC de cette étude est de 59,9 %, ce qui est élevé en AB mais il existe une forte variabilité entre les élevages (Tableau 1, $P < 0,001$). Aux variations entre élevages s'ajoutent des variations entre bandes intra-élevages. Le TMP élevé était attendu, car des études antérieures montrent un développement plus important des tissus musculaires au détriment des tissus gras chez les porcs mâles non castrés comparés aux castrés du fait de la présence des hormones sexuelles qui sont des anabolisants naturels (Lundström *et al.*, 2009). Dans notre étude, les jambons représentent 22 % du poids de la carcasse. Élevés dans des conditions similaires, les porcs mâles non castrés ont des proportions de jambon et épaule généralement supérieures ou très proches de celles des mâles castrés (Pauly *et al.*, 2008 ; Gispert *et al.*, 2010). Le fait que la conformation des mâles non castrés puisse être différente de celles des mâles castrés peut compliquer la tâche des éleveurs pour choisir les porcs à abattre s'ils ne pèsent pas les animaux.

2.1.2. Comportement des animaux

Il est bien connu que les hormones sexuelles produites par les testicules tout au long de la vie des MNC favorisent les comportements agressifs et surtout les comportements sexuels qui se caractérisent par des montes (Von Borell *et al.*, 2020). Ces comportements peuvent induire des blessures sur les autres porcs de la case. Certains éleveurs qui avaient mis en place des cases mixtes de mâles et de femelles dans les premières bandes ont d'ailleurs très rapidement séparé mâles et femelles. L'étude a donc été conduite essentiellement avec des cases uniquement de MNC ou des cases composées de MNC et de MC.

2.1.3. Notation des odeurs : méthode du nez humain

La méthode actuelle de notation des carcasses de MNC, méthode Sanmalo élaborée par UNIPORC, n'était pas encore en place au moment de l'étude. En collaboration avec l'IFIP, une méthode propre au projet, basée également sur le nez humain, a été développée. Elle consiste à chauffer du gras au niveau de l'échine entre la 1ère et la 5ème vertèbre et à noter l'odeur perçue : 0 (absence d'odeur de verrat), 1 (odeur douteuse) ou 2 (odeur de verrat). Cette notation a lieu sur la chaîne d'abattage. Au total, 622 carcasses de MNC ont été notées. La majorité des carcasses évaluées (94,5 %) ont été notées « 0 » ; 4,0 % notées « 1 » et 1,4 % notées « 2 » (Lombard *et al.*, 2024). Au total, environ 5 % des porcs peuvent donc être considérés odorants avec la méthode utilisée, ce qui est proche de valeurs citées dans la bibliographie, sachant que cette proportion peut fortement varier en fonction des caractéristiques de l'échantillon observé tels que le type génétique, l'âge à l'abattage ou la conduite alimentaire des animaux. (Mathur *et al.*, 2012 ; Conan *et al.*, 2024).

2.1.4. Concentrations en androsténone et scatol dans le gras de bardière

Des prélèvements de gras de bardière ont été réalisés sur l'ensemble des porcs de l'étude, à partir desquels 577 échantillons ont été sélectionnés pour réaliser des dosages de A et S de manière à représenter de façon aussi équitable que possible les différents élevages et saisons d'abattage. Ces échantillons ont été dosés par HPLC (Batorek *et al.*, 2012). Les concentrations médianes de S (0,02 à 0,06 µg/g de gras pur) et de A (0,54 à 1,78 µg/g) varient entre les élevages ($P < 0,001$). Sur l'ensemble des données, les corrélations entre A et S ($P < 0,001$), et entre A et le poids de la carcasse ($P < 0,03$) étaient positives (Lombard *et al.*, 2024). L'analyse par élevage montre une corrélation positive entre l'âge à l'abattage et A dans deux exploitations ($P < 0,03$). Ceci suggère que réduire l'âge et le poids vif à l'abattage permettrait de réduire le risque d'odeurs sexuelles. L'analyse par élevage montre une variation significative entre les trimestres dans une seule exploitation pour A et dans une autre pour S. Les effets de la saison sont donc peu marqués dans notre étude.

Afin d'évaluer le risque de rejet de la viande par les consommateurs en raison de leur perception d'odeurs désagréables, des seuils de concentration ont été définis pour A et S. Une carcasse est considérée à risque si l'une ou l'autre des deux molécules atteint le seuil défini. Même si ces seuils ne font pas consensus, nous avons retenu à partir de l'analyse de la bibliographie 3,0 µg/g de gras pur

pour A et pour 0,15 µg/g de gras pur pour S (Bonneau et Chevillon, 2012 ; Mörlein *et al.*, 2012). Sur cette base, le pourcentage de carcasses considérées à risque de rejet (23 %) est beaucoup plus élevé que ce qui a été observé avec le nez humain (5 %) (Figure 2, Lombard *et al.*, 2024). Cet écart entre notations avec le nez humain et analyses biochimiques a déjà été observé dans d'autres études (Mathur *et al.*, 2012). L'analyse de la bibliographie nous a permis d'identifier différents leviers pour réduire le risque d'odeurs désagréables (« odeur de verrat ») tels que l'augmentation de la teneur en fibres fermentescibles ou l'introduction de chicorée dans l'aliment, un paillage propre et une bonne ventilation surtout en fin d'engraissement, le choix d'une génétique paternelle à faible risque comme par exemple le Piétrain **(Parois *et al.*, 2018).**

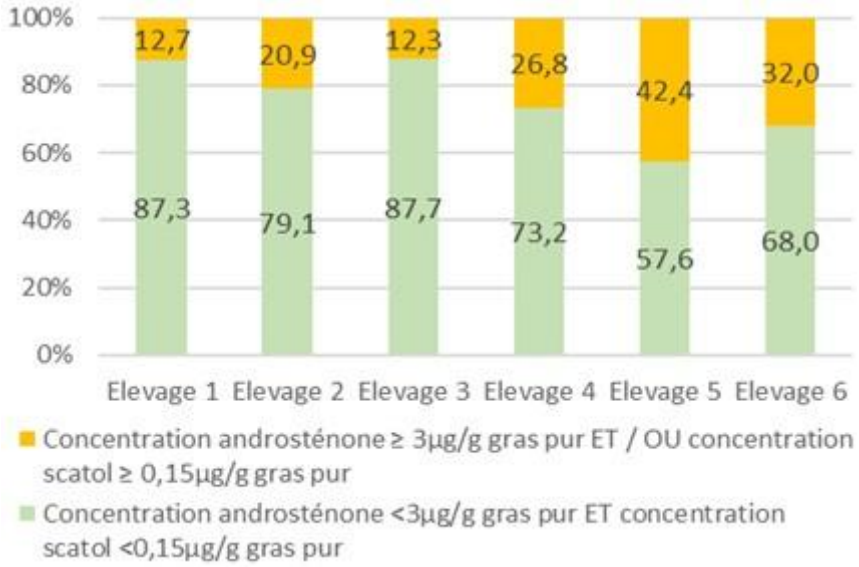


Figure 2 : Pourcentage de carcasses à risque d'odeur de verrat selon les concentrations en A et S mesurées sur 577 carcasses issues de 6 élevages (Lombard *et al*., 2024)

2.2. L'alimentation, un levier pour améliorer plusieurs dimensions de la qualité de la viande de porc ?

Dans cette étude, nous avons recherché si une alimentation plus riche en acides gras oméga-3 et en fibres permet de réduire le risque d'apparition d'odeurs sexuelles dans la viande et d'améliorer d'autres dimensions de la qualité de la viande (Van Baelen *et al.*, 2024a, b; 2025).

2.2.1. Les animaux et le protocole expérimental

L'expérience a été menée sur 77 MNC (croisés Piétrain NN x Large White) élevés selon le cahier des charges biologique dans la station d'expérimentation Porganic de l'INRAE (UE GenESI, 86480 Rouillé), au cours de deux bandes successives (Van Baelen *et al.*, 2024a et b). Dans chaque bande, ils ont été répartis intra-portée en deux groupes expérimentaux, Témoin (T) et Bio+, à environ 33 kg de poids vif. Les porcs du groupe Témoin (n = 37) ont reçu un régime correspondant au cahier des charges bio (à base d'orge, blé, pois, tourteau de soja, son de blé, et contenant 1% de luzerne déshydratée) et ceux du groupe Bio+ (n = 40) un régime contenant principalement des matières premières françaises : des protéagineux (féverole), des sources d'acides gras oméga-3 (graines de lin, tourteaux de cameline) et avaient accès en permanence à des fourrages (foin, enrubanné) présents dans un râtelier. Les porcs ont été nourris à volonté jusqu'à l'abattage à environ 125 kg de poids vif. Tous les porcs ont été élevés dans le même bâtiment, avec une loge par bande et par traitement expérimental. Chaque loge incluait une zone de repos sur litière de paille (1,3 m²/porc), une zone d'alimentation (0,2 m²/porc) et un accès libre à une courette extérieure (1,0 m²/porc).

2.2.2. Les résultats

Le gain journalier moyen était élevé et ne différait pas entre les deux groupes expérimentaux (T : 1007 g, Bio+ : 1025 g, P > 0,05, Van Baelen *et al.*, 2024a et b). Le poids de la carcasse (T : 97,4 kg, Bio+ : 99,9 kg) et la teneur en viande maigre (T : 59,9 %, Bio+ : 60,5 %) ne différaient pas significativement entre les porcs T et Bio+ (P > 0,05).

Par rapport aux porcs T, les porcs Bio+ avaient un pH ultime plus élevé (P < 0,05) dans les muscles de la longe (muscle *Longissimus thoracis et lumborum*, LTL) et du jambon (*Gluteus medius* et *Semimembranosus*), et un potentiel glycolytique plus faible dans le muscle LTL (P < 0,001, Tableau 2). La viande de longe et de jambon des porcs Bio+ était moins claire (P < 0,05) et avait une couleur plus rouge (= angle de teinte plus faible, P < 0,10) par rapport à celle des porcs T.

Tableau 2 : Effet de la stratégie alimentaire sur les indicateurs de qualité et la composition biochimique de la longe et du jambon (Van Baelen *et al.*, 2024a et b)

	Témoin	Bio+	Valeur de P
pH 24 heures, longe	5,50	5,55	0,011
pH 24 heures, jambon, Gluteus medius	5,55	5,59	0,037
pH 24 heures, jambon, Semimembraneux	5,57	5,62	0,019
Potentiel glycolytique, longe (µmol éq. lactate/g)	178	159	< 0,001
Luminance, L*, longe	50,4	49,1	0,020
Luminance, L*, jambon (Gluteus medius)	49,6	47,2	0,001
Angle de teinte h°, longe	35,6	34,3	0,084
Angle de teinte h°, jambon (Gluteus medius)	36,4	34,2	0,009

La composition en acides gras de la longe a été très favorablement modifiée sur le plan nutritionnel avec une moindre proportion d'acides gras polyinsaturés n-6 (T : 15,5 %, Bio+ : 13,7 %, P = 0,012) en faveur des acides gras polyinsaturés n-3 (T : 1,62 %, Bio+ : 3,72 %, P< 0,001). Ceci conduit à diminuer fortement le ratio acide linoléique (C18:2) sur acide α-linolénique (C18:3) et à le rapprocher des recommandations nutritionnelles de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Cet effet est principalement lié à l'introduction de graines extrudées de lin et de tourteau de cameline, riches en acides gras n-3, dans l'aliment des porcs Bio+.

Aucune carcasse n'a été classée odorante à l'abattoir par la méthode du nez humain (méthode Sanmalo), (Van Baelen *et al.*, 2024a et b). Cependant, en se basant sur les seuils définis précédemment (cf 1.1.4), deux porcs Bio+ dépassaient le seuil pour A et deux autres pour S, et deux porcs T dépassaient le seuil pour A.

La concentration en S était plus faible en moyenne chez les porcs Bio+ que chez les porcs T et il y avait moins d'animaux Bio+ présentant des valeurs supérieures à 0.02 µg/g de gras pur (valeurs des médiane et 9è décile de 0,02 et 0,061 µg/g de gras pur pour les porcs Bio+ contre 0,02 et 0,11 µg/g de gras pur pour les porcs T respectivement, P < 0,05) confirmant l'hypothèse qu'une alimentation riche en fibres réduit la teneur en S du gras (Van Baelen *et al.*, 2024 a et b). En effet, les fibres fermentescibles favorisent la croissance de bactéries qui utilisent le tryptophane, qui n'est alors plus disponible pour la

production de scatol dans le côlon (Wesoly et Weiler, 2012). De plus, les fibres augmentent la vitesse du transit intestinal ce qui serait favorable à l'élimination fécale du scatol (Parois *et al.*, 2018). Contrairement à S, la teneur en A était plus élevée chez les porcs Bio+ que chez les porcs T (0,84 *vs* 0,51 µg/g de gras pur, respectivement, P = 0,03). Cet effet était inattendu. Nous suggérons que d'autres expériences soient menées pour le confirmer ou l'infirmer.

Une analyse sensorielle de la viande (longe) réalisée par un jury d'experts (10 à 13 personnes, les mêmes tout au long de l'étude) a confirmé la couleur rouge plus intense de la viande des porcs Bio+ relativement à celle des porcs T (P < 0,01, Van Baelen *et al.*, 2025). Les autres indicateurs d'aspect (intensité et homogénéité du persillé), ainsi que les intensités d'odeur de la viande crue, et de tendreté, jutosité, flaveur ou odeur de la viande cuite ne différaient pas significativement entre les porcs Bio+ et T (P> 0,10). La persistance aromatique était légèrement plus faible pour la viande des porcs Bio+ comparée à celle des porcs T (P < 0,05). Surtout, les descripteurs d'odeur et de flaveur renseignés par les experts ont montré très peu de problèmes d'odeurs ou de flaveurs désagréables (dites « de verrat ») quelle que soit la stratégie alimentaire, en accord avec le fait qu'aucune carcasse n'avait été détectée odorante à l'abattoir (Van Baelen *et al*., 2025).

2.3. Paillage supplémentaire et ajout de fibres dans la ration : un impact sur le risque d'odeurs sexuelles ?

Une seconde étude a permis de tester si l'influence de l'alimentation (ajout de fibres) combinée au paillage supplémentaire dans les cases d'élevage permet de réduire le risque d'odeurs désagréables (Poissonnet *et al.*, 2024).

2.3.1. Les animaux et le protocole expérimental

L'essai s'est déroulé dans l'élevage de l'exploitation agricole de l'EPLEFFPA (établissement public local d'enseignement et de formation professionnelle agricole) Théodore MONOD, 35650, Le Rheu, conduit en AB. Quatre bandes de porcs à l'engrais (truies Naïma x verrats Piétrain) ont été suivies (total 337 porcs dont 165 porcs MNC). Par case, trois types sexuels étaient présents en début d'engraissement (femelles, MC et MNC). Pour les bandes 2, 3 et 4, les femelles ont été retirées des cases après 5 à 6 semaines d'engraissement afin d'éviter les comportements sexuels.

Les MNC ont été répartis en deux traitements dans deux cases identiques adjacentes :

- **Témoin :** alimentation et paillage (77 kg / porc en engraissement) habituels de l'élevage, et proches de ce qui se pratique généralement dans les élevages biologiques de porcs ;
- **Test :** alimentation enrichie en luzerne déshydratée (10 %) au cours du dernier mois d'engraissement et paillage supplémentaire : 20 % pendant toute la durée de l'engraissement (soit 90 kg de paille/porc) plus un paillage 48 heures avant les départs à l'abattoir.

En élevage, des observations ont été réalisées sur tous les animaux 3 et 6 semaines après leur entrée en engraissement, puis 5 jours avant le premier départ à l'abattoir. Douze indicateurs ont été considérés : 3 sur la qualité du logement, 6 sur la santé et 3 sur les blessures comme indicateurs des comportements agressifs ou de la caudophagie, plus un indicateur de la relation homme-animal (Poissonnet *et al.*, 2024). A l'abattoir, les caractéristiques des carcasses des porcs MNC ont été mesurées (poids de la carcasse, épaisseurs de muscle M2 et de gras G2 pour calculer le TMP, note de nez humain selon la méthode Sanmalo). Des prélèvements de gras de bardière ont été réalisés afin d'effectuer le dosage au laboratoire des teneurs en A et S par HPLC (Batorek *et al*., 2012).

2.3.2. Résultats

Tableau 3 : Caractéristiques moyennes des carcasses et pourcentages des porcs dépassant les seuils d'acceptabilité pour l'androsténone et le scatol selon le traitement (Poissonnet *et al.*, 2024). T, *, **, *** indiquent un effet du traitement (T) ou de la bande (B) à P < 0,1, 0,05, 0,01 ou 0,001, respectivement. Les analyses de variance relatives à la teneur en muscle des pièces et aux épaisseurs de lard et de maigre prennent en compte le poids de la carcasse introduit en covariable.

Indicateurs		Conditions		
		Témoin (N=85)	**Test (N=80)**	**Stat***
Perf zootechnique	Poids de carcasse (kg)	98,8	95,7	B**
	Teneur en muscle des pièces	59,2	59,8	B*, P**
	Epaisseur de lard (mm)	15,7	14,8	Tf, B**, P**
	Epaisseur de maigre (mm)	58,7	58,3	B**, P**
Odeurs sexuelles	% porcs scatol > 0,15 µg/g	26	6	T***
	% porcs androstérone > 0,3 µg/g	9	1	T*
	% porcs scatol > 0,15 µg/g ou andro > 3 µg/g	27	6	T***
	% de porcs notes Nez Humain 1 ou 2	8	2	Tt

Les analyses des indicateurs recueillis en élevage ne montrent aucune différence statistique entre les traitements (Poissonnet *et al.*, 2024). Le paillage supplémentaire n'a pas eu d'effet significatif sur la propreté des animaux contrairement à ce qui était attendu. Les pourcentages moyens d'animaux sales sur toute la période d'engraissement sont de 14 % et 15 % respectivement pour les cases Témoin et Test. Plus globalement, le traitement n'a pas eu d'effet significatif sur les indicateurs de santé, ni sur la présence de lésions suggérant des niveaux similaires d'agressivité. A l'exception d'une tendance à la diminution de l'épaisseur de gras des carcasses du lot Test, il n'est pas observé de différence significative des caractéristiques de carcasse entre les deux traitements (Tableau 3). Cependant, les teneurs en S et A sont significativement réduites dans le lot Test (Poissonnet *et al.*, 2024), et la proportion de porcs avec une note de nez humain de 1 ou 2 tend à être réduite dans le lot test (P < 0,10), suggérant une réduction du risque de rejet de la viande par les consommateurs en raison des odeurs sexuelles. La réduction de la teneur en S s'explique probablement par l'augmentation de la teneur en fibres de l'aliment du lot Test en accord avec la bibliographie (Parois *et al.*, 2018). On ne peut exclure un effet cumulatif de l'addition de paille dans ce lot même si nos observations n'ont pas permis de mettre en évidence de différence de propreté entre les deux groupes. L'effet du traitement expérimental sur A est plus surprenant et d'autres études sont nécessaires pour le confirmer ou l'infirmer.

2.4. Conclusion intermédiaire

Ces études montrent qu'il est possible d'atteindre de bonnes performances techniques des porcs MNC avec un risque d'odeurs désagréables des viandes relativement faible dans certains élevages AB. Cependant, des adaptations seront à réaliser dans d'autres. Afin de limiter le risque d'odeur de la viande, il est essentiel d'être vigilant sur le choix de la génétique, de pailler régulièrement et en quantité suffisante, notamment lors de la dernière semaine avant le départ à l'abattoir, et d'apporter des fibres

dans l'alimentation. Une autre possibilité est d'abattre les porcs à un poids plus léger ou à un âge le plus faible possible tout en prenant en compte les débouchés et le bilan économique.

Les comportements plus agressifs des MNC par rapport aux femelles ou aux MC ainsi que leurs comportements sexuels sont également à prendre en compte dans la conduite d'élevage. Par exemple, il est nécessaire de séparer les MNC des femelles lors de l'entrée en engraissement et de maintenir des groupes stables jusqu'au départ à l'abattoir, ce qui nécessite de prévoir un nombre de cases suffisant lors de la conception du bâtiment. Limiter la compétition entre animaux et donc les conflits est également un enjeu crucial pour l'élevage de MNC, en proposant suffisamment de longueur d'auges, de dispositifs d'abreuvement ainsi qu'un débit d'eau suffisant. Enfin, ajouter des zones refuge et prévoir des cases tampons peut permettre de limiter les conséquences de l'agressivité. Ces recommandations concernant l'alimentation, le logement, le comportement et le départ à l'abattoir ont fait l'objet de fiches techniques à destination des éleveurs et des acteurs de la filière porcine biologique (FNAB, 2023).

3. Valorisation des carcasses

Les carcasses des porcs mâles non castrés demandent un traitement particulier lors de la transformation afin d'éviter les risques de rejet par le consommateur pour cause de goût et/ou d'odeur désagréables. Différentes stratégies existent pour limiter ce risque. Parmi elles, la stratégie de dilution qui a été travaillée dans le cadre du projet CASDAR FARINELLI, consiste à mélanger la viande et le gras issus de carcasses odorantes avec de la viande et du gras provenant de femelles.

L'évaluation des produits de charcuterie fabriqués à partir de différentes dilutions s'est faite en deux temps :

- en premier lieu, par un jury d'experts, pour déterminer le taux de dilution optimal pour réduire les goûts et odeurs dites sexuelles ;
- dans un second temps, par un panel de consommateurs pour évaluer l'acceptabilité des produits fabriqués.

Enfin, les conditions d'équilibre économique d'une filière MNC biologique ont été évaluées en se basant sur le taux de mâles odorants décrit dans la première partie du projet (cf. partie 1.1.3), sur des données économiques de la filière porc, des dires d'experts et de la bibliographie technique.

3.1. Détermination de la proportion maximale de matières premières issues de carcasses odorantes de PMNC

L'objectif de cette étape consistait à identifier un seuil de dilution des pièces de carcasses de porcs MNC pour quatre produits de charcuterie pour lesquels le risque d'odeur est relativement élevé : saucisse de Francfort, boudin noir, saucisse de Toulouse et pâté de campagne. En effet, les produits contenant beaucoup de gras et consommés chauds constituent des matrices alimentaires plus à risque de rejet par les consommateurs (Parois *et al.*, 2018). Les produits de charcuterie ont été préparés par l'ADIV (Association développement institut de la viande) (Tableau 4).

Tableau 4 : Produits fabriqués à partir des carcasses de porcs

Produit	Saucisse de Francfort	Boudin noir	Saucisse de Toulouse	Pâté de campagne
% de gras total dans la recette	18 %	30 %	50 %	65 %
Origine du gras	Bardière	Gorge	Poitrine	Gorge

3.2. Tri des carcasses pour les fabrications

Les carcasses ayant servi à la fabrication des produits ont été classées en 3 catégories (faiblement odorante FAO, moyennement odorante MOO, fortement odorante FOO) en fonction de leur concentration en molécules odorantes (androsténone, scatol) mesurée dans le gras de bardière (Tableau 5).

Tableau 5 : Caractéristiques des trois types de carcasses retenus pour la fabrication de produits de charcuterie en fonction de l'odeur

Classement de l'odeur des carcasses	Teneur en molécules odorantes	Classement selon nez humain
Niveau faible (FAO)	0,5 < [A] < 1 µg/g 0,05 < [S] < 0,1 µg/g	Non odorant
Niveau modéré (MOO)	1< [A] < 2,5 µg/g 0,25< [S] < 0,5 µg/g	Non odorant ou classé 1
Niveau fort (FOO)	[A] > 2,5 µg/g [S] > 0,25 µg/g	Non odorant, ou classé 1 ou 2

3.3. Les produits de charcuteries et les niveaux de dilution testés

Chaque catégorie de carcasse (FAO, MOO, FOO) a été utilisée pour fabriquer les 4 produits de charcuterie sélectionnés ci-dessus, avec les modalités suivantes :

- un produit témoin sans introduction de pièces de carcasse odorante ;
- un produit avec introduction de 100 % de gras odorant (modalité S1) ;
- 2 produits avec introduction graduelle de gras odorant ([S2] > [S3]).

Ces deux dernières modalités correspondent donc à des fabrications avec dilution : c'est-à-dire des produits pour lesquels le gras odorant est dilué avec du gras issu de carcasse non-odorante. En fonction de la catégorie de carcasse, les niveaux de dilution choisis étaient différents (Tableau 6).

La proportion de gras total est identique pour toutes les modalités d'un même produit. Les origines de gras (bardière, gorge, poitrine) ont également été respectées (cf. tableau 4). Ainsi, chaque produit a été testé selon 10 modalités (3 catégories de carcasses (FAO, MOO, FOO) x 3 modalités par catégorie (S1, S2, S3) + un produit témoin sans gras odorant). Par exemple, pour la saucisse de Francfort et les carcasses FAO, quatre produits ont été fabriqués contenant chacun un total de 18 % de gras dont un pourcentage variable de gras issu d'une carcasse FAO (Figure 3) : 0 % (Témoin), 100 % (S1), 89 % (S2) et 78 % (S3).

Tableau 6 : Proportion de gras odorant par rapport au gras total de la recette

	Essais S1	Essais S2	Essais S3
Carcasse FAO	100 %	89 - 91 %	75 - 78 %
Carcasse MOO	100 %	75 - 78 %	53 - 56 %
Carcasse FOO	100 %	53 - 56 %	22 - 23 %

Les modalités S1, S2 et S3 ont ensuite été déclinées pour les carcasses MOO et FOO. Les charcuteries ainsi fabriquées ont été testées sensoriellement par un panel de 10 dégustateurs experts entraînés pour la détection de l'odeur de mâle non castré avec un questionnaire de dégustation.



Figure 3 : Composition des saucisses de Francfort de quatre fabrications contenant des teneurs variables en gras odorant issu d'une carcasse à faible niveau d'odeur (FAO)

3.4. Résultats

3.4.1. Evaluation par un panel d'experts

La majorité des dégustateurs experts (75 %) détecte des différences d'odeur et de goût entre les fabrications essais (S1, S2, S3) et le Témoin, quels que soient la catégorie de carcasse et le niveau de dilution. Au niveau hédonique, les produits incluant du gras odorant sont moins appréciés par le panel expert que ceux des fabrications Témoin. Pour le boudin et la saucisse de Francfort une différence significative d'odeur ($P < 0,05$) a été relevée entre les séries S1 et S3. Aucune différence significative entre les séries n'a été relevée pour le goût ($P > 0,05$).

Avec les niveaux de dilution choisis, le panel entraîné détecte assez facilement et note négativement les produits incluant du gras odorant, même en faible pourcentage, et sans qu'il n'y ait de corrélation avec le niveau de dilution.

Certains produits comme le boudin confirment leur statut de produit moins à risque pour l'introduction de gras odorant avec des notes d'odeur peu différentes du Témoin. A contrario, la saucisse de Toulouse est un produit très sensible (odeur et goût) : les différentes formulations testées n'ont pas permis de nette amélioration pour limiter les écarts par rapport au témoin.

3.4.2. Panel de consommateurs et produits évalués

Afin de valider l'acceptation par le consommateur de produits fabriqués avec du gras odorant, seuls 3 produits ont été sélectionnés (pour leur niveau de risque plus faible de rejet par le consommateur). Il s'agit : du pâté de campagne, des saucisses de Francfort, du boudin noir.

Les produits utilisés pour ces tests consommateurs ont été fabriqués à partir de carcasses faiblement odorantes uniquement (carcasses FAO). Les recettes ont été adaptées par rapport à celles utilisées précédemment : le choix a été fait de diluer davantage le gras odorant, ce qui a conduit aux modalités présentées dans le tableau 7. Pour chaque produit, deux niveaux de dilution ont été choisis : 37-38 % de gras odorant sur le gras total (S4-1) et 25 % de gras odorant sur le gras total (S4-2).

Tableau 7 : Teneur en gras odorant et en molécules odorantes des essais destinés aux tests consommateurs

	Pâté		Boudin		Saucisse de Francfort	
	S4-1	**S4-2**	**S4-1**	**S4-2**	**S4-1**	**S4-2**
Androsténone (µg/g)	0,18	0,12	0,084	0,056	0,050	0,033
Scatol (µg/g)	0,019	0.,013	0,0090	0,0060	0,0055	0,0036
Indole (µg/g)	0,0049	0,0032	0,0022	0,0015	0,0013	0,0009
Gras odorant	24,4 %	16,3 %	11,3 %	7,5 %	6,8 %	4,5 %
Gras odorant sur gras total	37 %	25 %	38 %	25 %	38 %	25 %

Le laboratoire Qualtech a réalisé les tests dans ses locaux spécialement équipés de cabines d'essais individuelles conformes à la norme VF 09-105. Au total 64 personnes, de la région Grand-Est, ont participé à l'étude pour le pâté de campagne et la saucisse de Francfort et 60 personnes pour le boudin noir. Ces 2 panels étaient constitués en majorité de femmes (56 à 60 %), et plus de la moitié des personnes avaient plus de 60 ans. Moins d'un tiers ont déclaré, en amont de l'analyse, être gênés par le goût de porc prononcé. Pour chaque produit, 3 échantillons ont été présentés aux dégustateurs : un échantillon témoin sans gras odorant, un échantillon 1 (37 à 38 % de gras odorant sur gras total), et un échantillon 2 (25 % de gras odorant sur gras total).

3.4.3. Résultats de l'analyse sensorielle

Pâté de campagne

Le pâté de campagne a été dégusté à une température d'environ 6°C.

Sur l'appréciation globale (note de 1 à 9), le pâté 1 (le moins dilué) est la modalité la plus appréciée ($P < 0,01$). Les modalités avec du gras odorant semblent plus appréciées que le témoin, même pour les personnes ayant déclaré être sensibles à un goût de porc prononcé.

Pour l'appréciation de l'aspect, de l'odeur, du goût et de la texture, le pâté le moins dilué semble être plus apprécié que la recette Témoin. Les 2 pâtés contenant du gras odorant semblent être plus appréciés que la recette témoin. La recette la moins diluée (recette 1) est la plus appréciée des consommateurs sur l'ensemble des items.

Les intentions de re-consommation sont d'ailleurs significativement positives pour la recette 1 ($P < 0,001$) et la recette 2 ($P < 0,01$). Ce qui signifie qu'il y a significativement plus de consommateurs prêts à regoûter le produit que de consommateurs qui ne le souhaitent pas. Pour la recette Témoin, les intentions de re-consommation ou de non re-consommation ne diffèrent pas significativement, c'est-à-dire qu'il y a tout autant de consommateurs qui souhaitent regoûter la recette Témoin que de consommateurs qui ne le souhaitent pas.

Ces résultats semblent indiquer que les consommateurs apprécient davantage une recette de pâté incluant du gras faiblement odorant à hauteur de 37 % du gras total. Ceci constitue une voie de valorisation intéressante et qui semble peu risquée vis-à-vis du rejet du consommateur.

Saucisse de Francfort (type Knack)

Les saucisses de Francfort ont été dégustées à une température d'environ 58° après cuisson pendant 8 minutes dans de l'eau frémissante. Sur le critère de l'appréciation globale, les trois recettes ne diffèrent pas significativement ($P > 0,05$).

Sur les notes détaillées, une seule différence significative a été observée : la recette 2, plus diluée, est significativement plus appréciée que la recette 1 au niveau de l'odeur. Sur les autres aspects, il n'y a pas de différence ($P < 0,05$) entre les modalités. On peut noter que toutes les modalités de knacks ont des notes d'appréciation faibles (inférieures à 5 sur 10), ce qui indique qu'au-delà de l'introduction de gras odorant, la recette en elle-même n'a pas été appréciée par les consommateurs. Les commentaires des panélistes confirment cette hypothèse en rapportant des problèmes de texture. D'ailleurs, les intentions de re-consommation sont significativement négatives pour les 3 recettes ($P < 0,01$). Ceci signifie qu'il y a plus de consommateurs qui ne souhaitent pas re-consommer les produits que de consommateurs prêts à les consommer de nouveau.

Boudin noir

Le boudin a été dégusté à une température d'environ 53°C, après cuisson au four à 200°C pendant 15 minutes, arrosé d'un filet d'huile de tournesol. Sur le critère de l'appréciation globale, les trois recettes ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

Pour l'appréciation de l'aspect et de la texture, les trois recettes diffèrent significativement (P < 0,05). Il n'y a pas de différence significative concernant le goût et l'odeur. Le boudin le moins dilué (recette 1) est significativement plus apprécié que la recette Témoin (P < 0,05). Pourtant, la recette 2 (plus diluée) se démarque sur les intentions de reconsommation (P < 0,05). Ces résultats indiquent que pour le boudin, les formulations incluant du gras odorant sont mieux appréciées.

3.5. Impact de la valorisation de carcasses de porcs mâles non castrés à l'échelle de la filière porc biologique

3.5.1. Méthode retenue

L'évaluation de l'impact économique a mobilisé différentes données et informations : i) les résultats des suivis de l'observatoire (présentés dans la partie 1) ; ii) des informations collectées à dire d'experts auprès d'opérateurs économiques des filières (valorisation des pièces de porcs mâles non castrés) ; iii) de la bibliographie (Réseau des Nouvelles des Marchés ; France Agimer) et des résultats présentés dans les parties 2.1 et 2.2.

Différentes hypothèses d'utilisation des carcasses de MNC ont été élaborées et validées à dires d'experts par les opérateurs économiques partenaires du projet. En effet, la nécessité de diluer cette matière première avec des viandes non odorantes pour certaines catégories de produits, voire l'impossibilité de transformer certains morceaux, risque de conduire à ne pas valoriser certaines pièces dans des filières biologiques. Il s'agit donc de quantifier les pertes en analysant les scénarii de déclassement de ces viandes et de comparer les résultats économiques à ceux obtenus sur des viandes de porcs mâles castrés biologiques.

3.5.2. Projections à l'échelle filière

L'hypothèse de 5 % de mâles odorants ou douteux (cf. partie 1 ; Lombard *et al*., 2024) a été retenue. Trois scenarii de valorisation des différentes pièces ont été élaborés (figure 4). Afin de sécuriser les produits dans un contexte de prix élevé du porc biologique, les viandes non odorantes issues de MNC doivent être utilisées avec des contraintes spécifiques (moins fortes que celles pour les MNC odorants : 50 % de dilution et utilisation en fumaison pour les pièces entières). La valorisation optimale correspond à la situation actuelle d'utilisation des pièces de porcs biologiques (et donc à la tarification associée). La valorisation dégradée correspond à une baisse de valorisation des pièces concernées, en lien avec une utilisation différente. Par exemple, si la longe est utilisée en maigre pour fabrications en dilution (au lieu de fabriquer du bacon ou des produits de boucherie), le prix du kg baisse de plus de 30 %.

Les pièces vont être allouées à différents types de production afin de pouvoir mettre en œuvre des procédés de dilution, masquage et/ou cuisson afin de limiter l'apparition de risque d'odeur. La viande des femelles étant plus grasse que celle des PMNC, elle sera privilégiée pour une utilisation en boucherie (rôtis, côtes à griller). A l'heure actuelle, la part de boucherie représente environ 15 % des volumes de porc biologique (données filières/dires d'experts) et la charcuterie 85 % : 50 % de femelles sont donc suffisantes pour pourvoir ce segment.

Cette utilisation différente induit une baisse de la valorisation des carcasses via une perte de valeurs sur certaines pièces, afin d'en sécuriser l'utilisation en matière de risques d'odeurs des produits. Par exemple, pour les MNC-O, l'intégralité de la carcasse est utilisée en tant que maigre, ce qui diminue fortement leur valorisation. La valorisation des principales pièces selon l'utilisation technologique envisagée est donnée dans le tableau 8, en base 100 (avec jambon blanc =100).

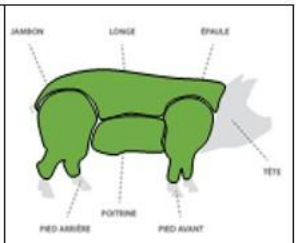
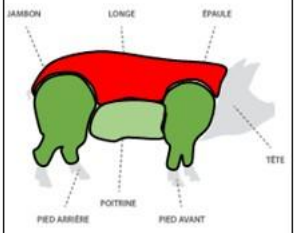
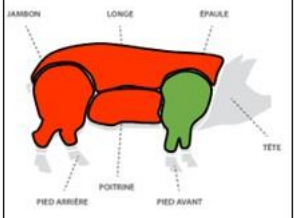
Femelles	Valorisation optimale Epaule : en maigre pour utilisation en mêlée Jambon : Jambon cuit Poitrine : produits de découpe et/ou lardons Longe : produits de découpe (rôti, côtes)	
Mâles non castrés non odorants (MNCNO) – Usage restreint 50 % / 100 % fumaison pour pièces à risque	Valorisation optimale Epaule : en maigre pour utilisation en mêlée Jambon : Jambon cuit Valorisation dégradée Poitrine : lardons fumés Longe : en maigre pour fabrication et bacon	
Mâles non castrés odorants (MNCO) – 100 % en charcuterie sécurisée avec dilution	Valorisation optimale Epaule : en maigre pour utilisation en mêlée Valorisation dégradée Jambon : en maigre pour utilisation en mêlée Poitrine : en maigre pour utilisation en mêlée Longe : en maigre pour utilisation en mêlée	

Figure 4 : Valorisation des pièces par catégories d'animaux

La figure 5 présente les produits cibles envisagés selon le type de carcasses afin de limiter le risque et de sécuriser les process.

Si l'on projette ces données à l'échelle de la filière (50 % femelles et 50 % mâles dont 5 % de MNC-O et 95 % de MNC-NO) et selon des rendements moyens de découpe, la perte de valorisation se situe à 5,5 % (indépendamment des surcoûts liés à la mise en place d'une traçabilité spécifique), à cause d'une baisse de valorisation de 9,5 % pour les PMNC non odorants, et 23,3 % pour les PMNC odorants par rapport à une carcasse femelle. Ceci équivaut à environ 30 cts/kg de carcasse de porc biologique.

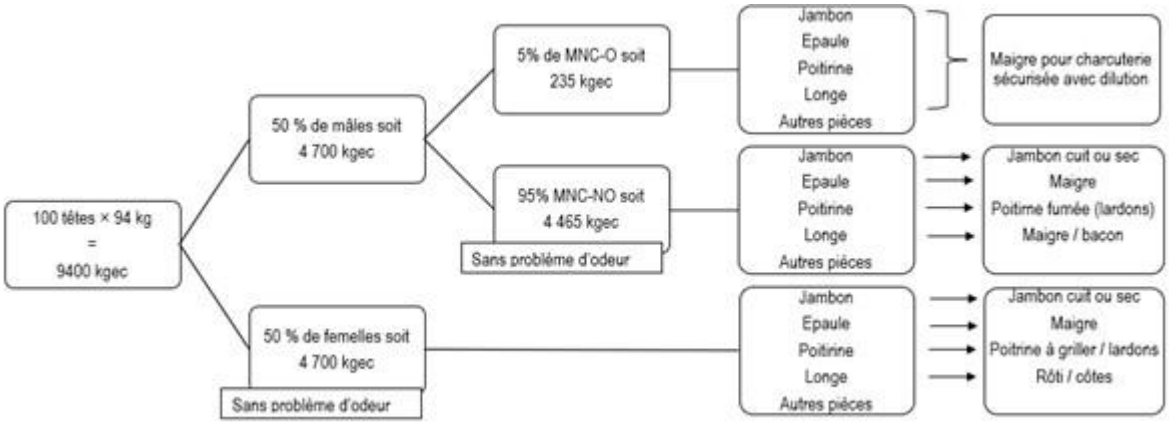


Figure 5 : Modèle d'utilisation des carcasses de porcs biologiques à l'échelle de la filière en cas d'arrêt de la castration. MNC-O / NO : mâles non castrés odorants / non odorants.

Tableau 8 : Valorisation des principales pièces par catégories d'animaux

	Femelle ou mâle castré		Mâle non castré non odorant (MNC-NO)		Mâle non castré odorant (MNC-O)	
Pièces	**Utilisation**	**Valorisation**	**Utilisation**	**Valorisation**	**Utilisation**	**Valorisation**
Jambon	Jambon	100	Jambon banc	100	Maigre	63,5
Epaule	Maigre	63,5	Maigre	63,5	Maigre	63,5
Poitrine	Lardon à griller	73,6	Lardon	73,6	Maigre	63,5
Longe	Rôti/côte	85,6	Maigre/bacon	63,5	Maigre	63,5

3.6. Conclusion intermédiaire

Cette première approche (partielle) permet d'évaluer à l'échelle des abatteurs l'impact économique de l'utilisation de porcs mâles non castrés sur le prix des pièces primaires des carcasses. Avec les hypothèses retenues de taux de mâles odorants et de destination des pièces, une dévalorisation minimum de 5,5 % des carcasses de porc biologique est attendue. Pour compléter cette analyse, l'impact technico-économique sur le maillon élevage devra être évalué (TMP et éventuel gain sur le coût alimentaire). De plus, une projection prenant en compte le « panier porc bio en France » complèterait l'analyse afin d'évaluer le nombre de PMNC que la filière BIO est en mesure de valoriser.

4. Conclusion générale

Au niveau de l'élevage, il paraît envisageable d'élever des MNC avec un taux de mâles odorants maîtrisé (<5 %), sous réserve de respecter les bonnes pratiques identifiées dans la littérature (propreté des animaux, type génétique approprié…), et observées dans le cadre du projet (distribution de fourrages, sexage des cases…). Cependant, un point de vigilance important concerne les comportements agressifs des MNC qui se sont avérés difficiles à gérer, en particulier lorsque tous les mâles d'une bande n'étaient pas castrés. L'impact technico-économique (ainsi que l'optimisation) pour les éleveurs doit encore être évalué pour permettre un développement à grande échelle de l'élevage de MNC.

Au-delà des adaptations à réaliser dans les élevages, les différents maillons de la filière doivent également modifier leur façon de travailler afin de pouvoir valoriser correctement les MNC. En particulier, les abattoirs doivent être pourvus de méthodes fiables de détection des carcasses odorantes, et assurer une traçabilité précise des différentes catégories de carcasses. Il est nécessaire d'explorer différentes voies d'utilisation des MNC odorants et non odorants en tenant compte des spécificités du secteur de l'agriculture biologique. Différents leviers de valorisation peuvent être actionnés (masquage, dilution…), afin de valoriser au mieux les carcasses de MNC (odorants ou non).

Cette première étude en France concernant le développement d'une filière de MNC a permis de i) confirmer des éléments déjà connus en élevage conventionnel ; ii) identifier des spécificités (distribution de fourrages, entretien de la litière et des courettes) et points de vigilance (gestion des comportements) dans le contexte de l'agriculture biologique ; iii) évaluer le taux de PMNC odorants ou douteux dans un contexte d'élevage « à faible risque » en agriculture biologique ; iv) apporter les premiers éléments concernant la capacité de la filière bio à utiliser et valoriser des carcasses de MNC.

Ces travaux seront à compléter par des études complémentaires pour approfondir l'analyse économique aux différents maillons et fournir des recommandations aux éleveurs.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Armelle Prunier : 0000-0003-3070-6613

Rodolphe Vidal : 0000-0002-3407-1646

Bénédicte Lebret : 0000-0001-5435-0389

Chloé Van Baelen : 0009-0001-2625-1057

Alexandre Poissonnet : 0009-0001-0198-5206

Contributions des auteurs

Sarah Lombard : coordination de la rédaction ; rédaction partie 2.1

Armelle Prunier : rédaction 2.2 ; relecture approfondie de tout le manuscrit

Florent Massoulier : rédaction partie 3

Rodolphe Vidal : rédaction partie 3 ; appui à la coordination de la rédaction

Bénédicte Lebret : rédaction 2.2 ; relecture approfondie de tout le manuscrit

Chloé Van Baelen : rédaction 2.2 ; relecture partie 2

Alexandre Poissonnet : rédaction 2.3 ; relecture partie 2

Florence Maupertuis : relecture partie 2

Samuel Frois : relecture

Antoine Tortereau : relecture partie 3

Antoine Roinsard : appui à la coordination de la rédaction ; rédaction partie 3 ; rédaction de la conclusion générale ; relecture générale

Tous les auteurs et autrices ont lu et approuvé le manuscrit final

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les rédacteur·rices remercient le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire pour son soutien financier ainsi que l'ensemble des partenaires et membres du comité de pilotage du projet.

Déclaration de soutien financier

Le projet FARINELLI a été financé par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire via l'appel à projet du Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural (CASDAR) Innovation et Partenariat 2019.

Références bibliographiques

Batorek, N., Škrlep, M., Prunier, A., Louveau, I., Noblet, J., Bonneau, M., Čandek-Potokar, M. (2012). Effect of feed restriction on hormones, performance, carcass traits, and meat quality in immunocastrated pigs. *Journal of animal science*, *90*(12), 4593-4603.

Bonneau, M., Chevillon, P. (2012). Acceptability of entire male pork with various levels of androstenone and skatole by consumers according to their sensitivity to androstenone. *Meat science*, *90*(2), 330-337.

Conan, P.-Y., Legaud, J.-Y., Buchet, A. (2024). Facteurs associés à la prévalence des porcs mâles entiers odorants, In *56. Journées de la Recherche Porcine (JRP)* (Vol. 56, pp. 13-18). IFIP.

Font-i-Furnols, M., Martín-Bernal, R., Aluwé, M., Bonneau, M., Haugen, J.-E., Mörlein, D., Mörlein, J., Panella-Riera, N., Škrlep, M., 2020. Feasibility of on/at Line Methods to Determine Boar Taint and Boar Taint Compounds: An Overview. Animals 10, 1886.

Gispert, M., Oliver, M. À., Velarde, A., Suarez, P., Pérez, J., Furnols, M. F. (2010). Carcass and meat quality characteristics of immunocastrated male, surgically castrated male, entire male and female pigs. *Meat science*, *85*(4), 664-670.

Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE). (2024) *GenESI Porganic*, Unité Expérimentale Elevages Porcins Innovants. https://doi.org/10.15454/1.5572415481185847E12

Fédération Nationale d'Agriculture Biologique (FNAB). (2023). *FARINELLI : Améliorer le bien-être des porcs mâles en élevage biologique : élevage et valorisation de mâles entiers, améliorer la prise en charge de la douleur lors de la castration*. (https://www.produire-bio.fr/articles-pratiques/alternatives-a-la-castration-des-porcelets-en-bio-projet-casdar-farinelli/)

Lombard, S., Maupertuis, F., Roinsard, A., Prunier, A., Farinelli, C. (2024). Caractéristiques des carcasses et risque d'odeur de la viande de porcs mâles biologiques non castrés.

Lundström, K., Malmfors, B., Malmfors, G., Stern, S., Petersson, H., Mortensen, A. B., Sørensen, S. E. (1988). Skatole, androstenone and taint in boars fed two different diets. *Livestock production science*, *18*(1), 55-67.

Mathur, P. K., Ten Napel, J., Bloemhof, S., Heres, L., Knol, E. F., Mulder, H. A. (2012). A human nose scoring system for boar taint and its relationship with androstenone and skatole. *Meat Science*, *91*(4), 414-422.

Mörlein, D., Grave, A., Sharifi, A. R., Bücking, M., Wicke, M. (2012). Different scalding techniques do not affect boar taint. *Meat Science*, *91*(4), 435-440.

Parois, S., Bonneau, M., Chevillon, P., Larzul, C., Quiniou, N., Robic, A., Prunier, A. (2018). Boar taint in the meat of entire male pigs: the problems and the potential solutions.

Pauly, C., Spring, P., O'Doherty, J. V., Kragten, S. A., Bee, G. (2008). Performances, meat quality and boar taint of castrates and entire male pigs fed a standard and a raw potato starch-enriched diet. *Animal*, *2*(11), 1707-1715.

Poissonnet, A., Courboulay, V., Huet, G., Gaudré, D., Prunier, A. (2024). Effet de l'incorporation de farine de luzerne dans l'alimentation et de l'ajout de paille. Sur le bien-être des porcs et le risque d'odeurs sexuelles en élevage biologique. In *JRP 2024*. IFIP.

Prunier, A., Devillers, N., Herskin, M. S., Sandercock, D. A., Sinclair, A. R. L., Tallet, C., von Borell, E. (2020). Husbandry interventions in suckling piglets, painful consequences and mitigation. In *The suckling and weaned piglet* (pp. 453-460). Wageningen Academic Publishers.

Van Baelen, C., Montagne, L., Ferchaud, S., Prunier, A., Lebret, B. (2024a). Feeding strategy in organic pig farming as a lever to improve various quality dimensions of pork. *animal*, *18*(7), 101190.

Van Baelen, C., Montagne, L., Ferchaud, S., Prunier, A., Lebret, B. (2024b). Quelles sont les conséquences d'une stratégie alimentaire sur les qualités des produits porcins issus de l'agriculture biologique ? In *56. Journées de la Recherche Porcine (JRP)* (Vol. 56, pp. 1-6). IFIP.

Van Baelen, C., Montagne, L., Gagaoua M., Prunier, A., De Smet, S., Vossen E., Lebret, B. (2025). How does feeding strategy affect the aromatic volatile compounds profile and sensory properties of organic fresh pork?. Meat Science, 228, 109869.

Von Borell, E., Bonneau, M., Holinger, M., Prunier, A., Stefanski, V., Zöls, S., Weiler, U. (2020). Welfare aspects of raising entire male pigs and immunocastrates. *Animals*, *10*(11), 2140.

Wesoly, R., Weiler, U. (2012). Nutritional influences on skatole formation and skatole metabolism in the pig. *Animals*, *2*(2), 221-242.

Pour citer cet article : Sarah Lombard, Armelle Prunier, Rodolphe Vidal, Florent Massoulier, Bénédicte Lebret, *et al*.. Farinelli : Elevage de porcs mâles non castrés et valorisation des carcasses en agriculture biologique. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.95-112. 10.17180/ciag-2025-vol107-art08

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

BeBoP : Evaluer le bien-être des taurillons : des indicateurs revus pour gagner en faisabilité sans perdre en fiabilité

Agathe CHEYPE[1], Béatrice MOUNAIX[1], Jérôme MANCEAU[2], Vincent GAUTHIER[2], Quentin DELAHAYE[3], Claire DUGUE[4], Laure-Anne MERLE[5], Xavier BOIVIN[3]

[1] Institut de l'élevage, 149 rue de bercy, 75595 Paris, France

[2] NeoTec-Vision, Pépinière ORCHIS 4, 91 route nationale, 35650 Le Rheu, France

[3] Université Clermont-Auvergne Inrae VetagroSup, UMR 1213 Herbivores, 63122 Saint-Genès Champanelle, France

[4] France Limousin Sélection, Pôle de Lanaud, 87220 Boisseuil, France

[5] Chambre d'Agriculture des Pays de Loire, Ferme des Etablières, route du moulin Papon, 85000 La Roche-sur-Yon, France

Correspondance : agathe.cheype@idele.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art09

Résumé

La mesure en routine du bien-être des taurillons nécessite des observations rapides et à distance. Quatorze indicateurs issus de la littérature et validés avec des éleveurs et techniciens, ont été testés dans 2 élevages expérimentaux et 31 élevages commerciaux. Ils se sont révélés globalement fiables et utilisables sur le terrain. Les difficultés concernent surtout l'observation directe de certains indicateurs (blessures, propreté, réactivité à l'humain). Les éleveurs les jugent majoritairement acceptables, bien que ceux basés sur le comportement soulèvent plus de réserves. Un outil d'analyse automatique du comportement des taurillons basé sur algorithme vidéo de Deep Learning a été conçu pour automatiser et fiabiliser ces mesures comportementales, avec des performances (spécificité >80 %, sensibilité >78 %) encourageantes.

Mots-clés : bien-être, taurillons, indicateurs, comportement, algorithme, vidéo

Abstract: Assessing the welfare of young fattening Bulls: refined indicators to improve feasibility without compromising reliability

The routine assessment of welfare in young fattening bulls requires rapid and remote observations. Fourteen indicators, derived from the scientific literature and validated in collaboration with farmers and technicians, were tested in two experimental farms and 31 commercial operations. These indicators proved to be generally reliable and feasible under field conditions. The main challenges relate to the direct observation of certain indicators (injuries, cleanliness, human reactivity). Most farmers found the indicators acceptable, although those based on behavioral assessment raised more concerns. To address this, an automatic behavioral analysis tool using a video-based Deep Learning algorithm was developed to enhance the reliability and ease of behavioral measurements. The algorithm showed promising performance, with specificity exceeding 80% and sensitivity over 78%.

Keywords: welfare, fattening bulls, indicators, behaviour, algorithm, video

1. Introduction

Dans un contexte d'attentes sociétales croissantes vis-à-vis de l'élevage, évaluer le bien-être est un levier de consensus possible pour rassurer les consommateurs et identifier les marges de progrès de

chaque élevage (Stomp *et al*, 2023). Des protocoles d'évaluation du bien-être ont été développés dans la plupart des filières, en majorité basés sur le protocole Welfare Quality (2009). Du point de vue méthodologique, la mesure du bien-être des taurillons à l'engraissement fait cependant l'objet de questions spécifiques : comment bien observer l'état des animaux à distance ? comment évaluer les indicateurs comportementaux des animaux sur un temps court ? Pour répondre à ces questions, le projet Casdar BeBoP a testé des indicateurs simplifiés et faisables qui pourraient s'inscrire demain dans un protocole d'évaluation des taurillons, avec un double objectif de fiabilité pour évaluer le bien-être des animaux, et de faisabilité dans une diversité d'ateliers d'engraissement français.

Parmi les questions posées par l'évaluation du bien-être, l'automatisation des observations est une piste possible pour faciliter les mesures (Dawkins, 2021). L'apport des nouvelles technologies comme l'analyse vidéo couplée à l'intelligence artificielle a donc été un des axes de travail du projet Casdar BeBoP, en se focalisant sur les indicateurs qui décrivent le comportement des animaux.

2. Méthode : deux axes de travail

2.1. Indicateurs collectifs d'évaluation du bien-être des taurillons

2.1.1. Choix initial des indicateurs à tester

En 2020, deux groupes composés au total de 17 techniciens d'élevage et éleveurs engraisseurs, ont été réunis en début de projet afin d'identifier les indicateurs d'intérêt pour évaluer le bien-être des taurillons dans les ateliers d'engraissement en France. Ces focus groupes ainsi qu'une revue de la littérature ont permis de retenir 20 indicateurs dans un prototype de protocole d'évaluation décrivant l'état corporel et sanitaire des animaux ainsi que leur comportement. Deux échelles d'observation des taurillons ont été retenues : à l'atelier et à la case. Les animaux étaient observés sans les manipuler, ni les contenir, en groupe dans leurs cases. A la suite, cette situation d'observation du groupe d'animaux sera dénommée « collective » en opposition à des situations d'observation dites « individuelles » où chaque animal du lot est isolé et contenu pour être évalué individuellement.

2.1.2. Tests en élevages

Dans un premier temps, la fiabilité scientifique intégrant la reproductibilité intra-observateur et la répétabilité inter-observateurs a été évaluée sur deux sites expérimentaux. La sensibilité des indicateurs, entendue comme la capacité de la mesure à varier en fonction de faibles variations de la valeur réelle, a aussi été calculée (Waiblinger *et al*, 2006). Ce calcul compare les résultats de mesures d'indicateurs de bien-être obtenus via cette observation collective des animaux en groupe, avec ceux obtenus via une évaluation individuelle pour 177 taurillons, répartis en 23 cases, de race Charolaise et Limousine. Les évaluations de concordance des résultats obtenus entre les 2 méthodes d'observation des taurillons (test de similitude de Kappa pondéré pour données à caractère ordinale) ont été réalisés avec le logiciel R.

Dans un deuxième temps, 31 fermes commerciales de taurillons (50 bâtiments et 211 lots observés, 2043 taurillons) ont été le support d'une évaluation de la faisabilité de ces indicateurs et de l'analyse de la distribution des données collectées. La faisabilité a été jugée par 3 évaluateurs habitués à l'évaluation du bien-être animal en élevage en attribuant des notes de 1 (pas du tout faisable) à 5 (tout à fait faisable) pour chaque indicateur. En complément, les éleveurs ont été aussi interrogés sur leur acceptabilité des indicateurs retenus (note de 1 : totalement inacceptable à 5 : totalement acceptable). Par la suite, les notes d'acceptabilité et de faisabilité >3 ont été considérées comme satisfaisantes.

2.2. Analyse vidéo automatisée du comportement des taurillons

2.2.1. Equipements expérimentaux

Les deux sites expérimentaux ont été équipés de caméras HIK vision fixées aux éléments de la charpente et permettant l'observation vidéo en continu de 12 cases de taurillons (8 cases en race Charolaise avec 12-13 animaux par case, 4 cases en race Limousine avec 6 animaux par case), avec enregistrement des vidéos en période diurne. Les équipements installés ont permis d'enregistrer les séquences vidéo d'une bande d'engraissement complète sur chaque site en 2021.

2.2.2. Analyse des vidéos

Un éthogramme, inventaire structuré et descriptif des comportements observables d'une espèce animale, spécifique aux taurillons conduits en engraissement en bâtiment, basé sur la littérature, a été réalisé, décrivant précisément les postures et les séquences comportementales à noter. Un observateur humain a été entrainé à rechercher et annoter les images ou les courtes séquences vidéo mettant en évidence des comportements d'intérêt, en recherchant une diversité de situations à différents moments de la journée, pour les deux races, et à différents stades d'engraissement. Les premières analyses portent sur les postures (debout, couché) et sur les activités principales des animaux : se lève, se couche, ingère, boit, se déplace. L'activité « rumine » a été jugée plus difficile à identifier sur vidéo dans un premier temps. Cette étape a conduit à l'annotation de 1694 séquences utilisées pour l'apprentissage de l'algorithme de deep learning. Le système de deep learning est composé de 2 phases : une phase d'apprentissage et une phase de validation (Figure 1). L'apprentissage de l'algorithme est automatique et supervisé, pour apprendre à détecter chaque animal puis à classifier chaque posture, activité et comportement à partir d'une base d'images et de séquences annotées au préalable par un expert.

La phase de validation permet de calculer la précision (précision = vrais positifs / (vrais positifs + faux positifs)) et la sensibilité (sensibilité = vrais positifs / (vrais positifs + faux négatifs)) des prédictions comportementales de l'algorithme afin de caractériser ses niveaux de performances sur de nouvelles séquences non annotées. Les résultats de l'algorithme sont ainsi comparés à une vérité terrain, réalisée aussi par un expert.

Au total, environ 1000 séquences annotées ont été utilisées pour servir à la phase d'apprentissage et 21h de vidéos pour le calcul des performances de l'algorithme.

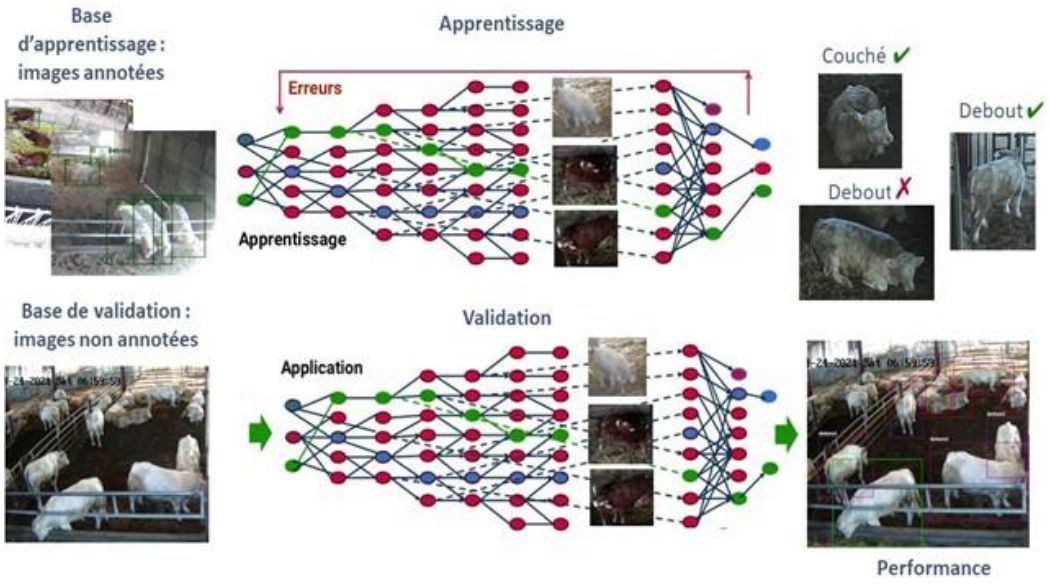


Figure 1 : Schéma du système de deep learning, composé d'une phase d'apprentissage et d'une phase de validation – Crédit : IDELE- projet BeBoP

3. Résultats

3.1. Des indicateurs en majorité fiables et faisables en élevages commerciaux

La majorité des indicateurs testés a montré une répétabilité acceptable entre observateurs (K ≥ 0,21) et une bonne sensibilité par rapport aux indicateurs mesurés individuellement à l'animal (K ≥ 0,21). Le tableau 1 présente les résultats des indicateurs les plus prometteurs. Une faible reproductibilité est surtout constatée pour les indicateurs observés à distance (blessures, indicateurs sanitaires) ou pour les indicateurs qui nécessitent de faire se déplacer les animaux (boiteries) ou pour d'autres plus spécifiques (grattage, comportement).

Tableau 1 : Evaluation des indicateurs collectifs d'intérêt dont la prévalence a été mesurée (n=31). NA : donnée manquante. K : indice de Kappa pondéré.

Indicateur	Répétabilité	Reproductibilité	Faisabilité (note/5)	% d'animaux observables	Acceptabilité (note/4)	Prévalence
Maigre	K ≥ 0,61	K ≥ 0,61	3,7	NA	3,2	7,0 %
Non propre	K ≥ 0,61	K ≥ 0,61	3,9	83 % ± 4,2	3,7	5,8 %
Blessé	K ≥ 0,61	K < 0,21	2,5	61 % ± 2,8	3,5	6,2 %
Se gratte	K ≥ 0,61	K < 0,21	3,3	NA	2,9	4,0 %
Trace de diarrhée	0,61 <K >0,21	0,61 <K >0,21	2,5	41 % ± 2,7	3,3	3,0 %
Boite	K ≥ 0,61	K ≥ 0,61	2,8	67 % ± 3,6	3,5	3,5 %
Case avec toux	K ≥ 0,61	K < 0,21	3,6	NA	3,5	34 % cases
Nb qui recule	0,61 <K >0,21	0,61 <K >0,21	2,7	22%	2,5	22,0 %

Sur la base de cette analyse de leur fiabilité scientifique ayant abouti à l'élimination des indicateurs « creux du flanc gauche » et « étendue de la salissure sèche et humide », 18 indicateurs ont été retenus, observés à l'échelle de l'atelier d'engraissement ou à l'échelle de la case en élevages commerciaux. La prévalence de ces indicateurs était en général faible dans les élevages (Tableau 1). Certains indicateurs comme la réaction à l'approche de l'humain, ont montré une forte variabilité entre élevages. Quelques indicateurs disposaient cependant d'une prévalence jugée trop faible pour être retenus, comme par exemple les écarts entre note d'engraissement des taurillons.

La faisabilité de la mesure des indicateurs retenus a été jugée satisfaisante pour 14 indicateurs (50 % des notes >3), mais moindre pour les indicateurs portant sur la boiterie, les blessures ou les troubles digestifs (50 % des notes <3). Le pourcentage d'animaux observables pour chaque indicateur traduit l'aptitude à voir les animaux dans des conditions suffisantes pour réaliser l'observation, c'est-à-dire pas trop loin de l'observateur, non masqué par d'autres bovins, etc. L'indicateur s'est révélé variable : par exemple, en moyenne 83 % des animaux étaient debout et visibles pour évaluer convenablement la présence de blessures. Le cas des tests à l'auge aura été le plus problématique sur ce point avec seulement 22 % des animaux de la case présents à l'auge pour réaliser les tests dans les 31 fermes, avec un pourcentage minimum de 7 % rencontré dans un élevage et un maximum de 52 % dans un autre.

3.2. Une acceptabilité par les éleveurs qui varie selon les indicateurs

Soumis à l'avis des 31 éleveurs, les indicateurs observés dans leurs élevages ont été majoritairement jugés pertinents (Figure 2). Aucun indicateur n'a été rejeté avec une note d'acceptabilité très faible (<2).

Les éleveurs plébiscitent davantage les dimensions du bien-être relatives au logement (par exemple 96 % d'avis positifs sur l'indicateur propreté des taurillons) et à la santé, même si celle-ci n'est pas toujours considérée comme faisant partie du bien-être. Les indicateurs basés sur le comportement suscitent plus de réserves (par exemple moins de 45 % d'avis positifs sur les stéréotypies).

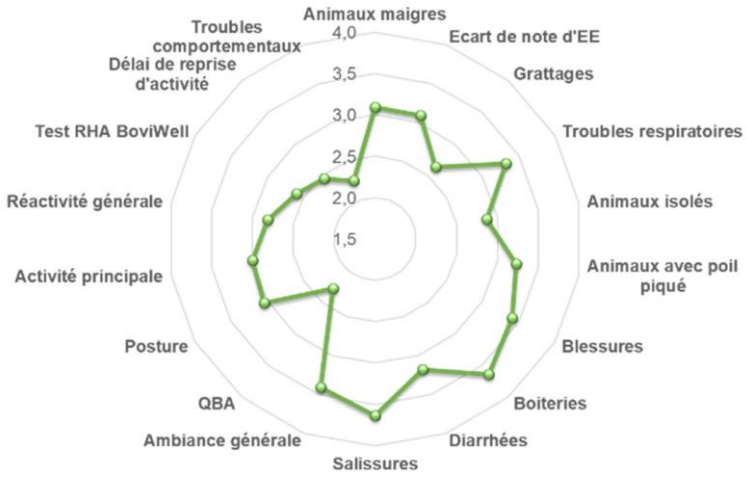


Figure 2 : Notes moyennes d'acceptabilité attribuées par les éleveurs aux indicateurs testés dans leurs élevages (Ecart de note d'EE : écart de note d'état d'engraissement, QBA : Qualitative Behaviour Assessment, Test RHA Boviwell : Test de relation humain-animal Boviwell)

3.3. La vidéo couplée à l'analyse automatisée des images : une technologie déjà fiable pour plusieurs comportements

L'algorithme développé présente une bonne précision sur la détection des taurillons sur les séquences vidéo, et pour la classification des postures « debout » et « couché » (Figure 3), ainsi que pour la qualification du comportement « ingère », avec plus de 94 % des séquences classifiées à juste titre (Tableau 2). Les autres comportements restent pour l'instant modérés en termes de précision, autour de 62 % pour « se lève », « se couche », « boit » et « se déplace », du fait d'un nombre de faux positifs encore important traduisant une confusion de l'algorithme au repérage de ce comportement. La précision moyenne pour ces premières prédictions de posture/activité se situe à 80 % avec un écart-type de 17 %.



Figure 3 : Caractérisation des postures des animaux par l'algorithme, Crédit : IDELE- projet BeBoP

La sensibilité moyenne s'élève à 78 % avec un écart-type resserré à 7 %. Elle est élevée pour l'activité d'ingestion à 93 % et plus proche de 75 % pour les autres comportements/postures. Par exemple, la sensibilité pour la posture « couché » reste moyenne pour l'heure. Les comportements « se lèche », « se frotte », « lutte », « chevauche » restent plus compliqués à observer sur les vidéos ; ils n'ont pas été considérés comme prioritaires dans la preuve de concept de cet outil.

Tableau 2 : Performances actuelles de prédiction des comportements par l'algorithme

Posture/Activité	Précision (%)	Sensibilité (%)
Détection des taurillons	97%	81%
Debout	95%	79%
Couché	97%	74%
Se lève	65%	73%
Se couche	68%	73%
Ingère	94%	93%
Boit	63%	77%
Se déplace	59%	71%

4. Discussion

La faisabilité de l'évaluation du bien-être des taurillons, en se basant sur des indicateurs collectifs, c'est-à-dire observables à l'échelle de la case ou de l'atelier et compatibles avec les conditions d'observations possibles dans les élevages français, a pu être vérifiée. Les résultats de pourcentage d'animaux réellement observables dans la case confirment cependant la nécessité de s'appuyer, dans tous les cas, sur l'observation détaillée de l'animal et en ne prenant en compte que le nombre réel d'animaux ayant pu être observés pour le calcul de score de bien-être. En 2009, le projet Welfare Quality faisait la preuve de concept de la possibilité d'évaluer le bien-être en s'appuyant sur une combinaison d'indicateurs de différentes natures (état des animaux, mesure de leur environnement de vie, comportement et état émotionnel). Les travaux qui ont suivi se sont attachés à documenter et à faciliter la faisabilité et l'acceptabilité de cette évaluation, mais surtout en élevage de bovins laitiers (De Boyer *et al*, 2012). Le projet BeBoP a participé à cet effort en taurillons, et démontre une faisabilité et une acceptabilité satisfaisante pour la plupart des indicateurs testés.

Certaines dimensions du bien-être ou indicateurs restent cependant difficiles à mesurer à distance ou dans le cadre d'un audit de durée limitée. En effet, entrer dans les cases de jeunes mâles pour les observer suffisamment près (blessures) ou les faire se déplacer (boiteries) présente des risques pour l'intervenant ou les animaux, y compris en présence de l'éleveur. La présence d'animaux en posture couchée limite également la visibilité des animaux et donc la bonne évaluation possible de leur état corporel. Or, les taurillons passent en moyenne 60 % du temps couchés en repos ou rumination (Tuomisto *et al*, 2015). D'ailleurs, ce comportement de couchage est fortement synchronisé (Mounier *et al*, 2005) au sein du lot et autour des plages d'alimentation, ce qui présente des limites quant à la capacité à pouvoir bien observer les indicateurs sur les animaux dans leur phase de repos. Il pourrait être recommandé de privilégier l'organisation des observations de bien-être aux horaires de distribution alimentaire, en favorisant les chances d'observer les animaux en posture debout, même si ce n'est pas toujours faisable dans le cadre d'un diagnostic d'élevage.

Les indicateurs décrivant le comportement des taurillons posent également des contraintes d'observation spécifiques. En effet, ces indicateurs varient au cours de la journée et leur expression dépend du moment d'observation (Philibert *et al*, 2020), du stade d'engraissement ou du type de logement (Cozzi *et al*, 2013). L'expression de certains comportements comme les stéréotypies ou les interactions peut être modifiée dans certaines situations de compétition ou par des évènements ponctuels (curage, paillage, température, météo). Mesurer des indicateurs comportementaux nécessite donc de pouvoir observer les animaux à différents moments de la journée et/ou dans la durée.

Par ailleurs, la présence de l'observateur peut impacter la qualité d'observation du comportement des animaux. La présence humaine entraîne des réactions des animaux, voire des interactions. Ces

éléments ont été étudiés surtout dans le cadre de la relation entre l'éleveur et ses animaux et peu en élevage de taurillons (Boissy *et al*, 2000), mais on peut faire l'hypothèse qu'ils sont également vrais lorsqu'il s'agit d'un intervenant extérieur : la présence de l'observateur peut modifier le comportement des taurillons. L'observation des indicateurs comportementaux nécessiterait idéalement un temps d'habituation des animaux à la présence de l'observateur, temps peu compatible avec la réalisation d'un audit d'élevage. Par ailleurs, l'observation du comportement relève de protocoles élaborés sur une base éthologique et définissant précisément pour chacun d'entre eux les caractéristiques, la durée, les signaux de début et de fin, etc. Ces protocoles garantissent la standardisation de la mesure et sa fiabilité, et sont assurés par la formation des observateurs. Les 3 observatrices impliquées dans BeBoP ont été formées à la mesure des indicateurs testés dans le projet : malgré cela, des écarts de reproductibilité ont été constatés pour certains indicateurs, notamment comportementaux (Tableau 1).

Pour l'ensemble de ces raisons, l'analyse vidéo automatisée du comportement offre des perspectives prometteuses et complémentaires de l'audit en ferme. Elle permet en effet d'éviter l'impact de la présence de l'observateur, et de mesurer le comportement à différents moments, sur des durées plus longues. La qualité des images captées peut constituer une limite, de même que la caractérisation de certains comportements reste difficile. La mise au point de l'algorithme nécessite également des travaux spécifiques pour chaque comportement. Il est parfois difficile de localiser précisément et de distinguer les animaux couchés dans le fond des cases, ainsi que lorsqu'ils sont masqués par d'autres taurillons. Les travaux qui ont consisté à tester la combinaison des 2 angles de vues de caméras positionnées sur chaque case (une pour l'avant et une pour l'arrière des cases) ont confirmé l'amélioration de la sensibilité de l'algorithme actuel. La précision modérée du comportement d'abreuvement est liée à des sur-détections par l'algorithme d'animaux buvant, dans les cas où la tête du taurillon est proche de l'abreuvoir mais sans qu'il ne boive réellement. Selon l'exposition des bâtiments et la météo, la localisation des taurillons peut aussi être complexifiée à certains horaires de la journée en cas d'ensoleillement fort (Figure 4).



Figure 4 : Exemple de visualisation problématique en situation d'ensoleillement fort - Crédit : IDELE-projet BeBoP

Néanmoins, ce système permettrait d'augmenter considérablement la fiabilité des mesures comportementales, mais aussi peut-être d'accéder à certains indicateurs d'état (propreté par exemple) en continu. Par ailleurs, il offre la possibilité de mesurer la variabilité des comportements exprimés par les animaux à différentes échelles (dans le temps, entre animaux ou entre cases) et ainsi la perspective de créer des références pour chaque comportement : les paramètres de sa distribution et les facteurs de variabilité. Cela permettrait non seulement de mieux comprendre le comportement des taurillons et

sa variabilité dans différentes modalités de logement, mais aussi de pouvoir, à terme, repérer des écarts à ces références (animaux ou lots dont les comportements s'écartent fortement des références).

Les participants d'un webinaire de présentation des résultats du projet BeBoP ont confirmé l'intérêt de ces approches. Sur 61 avis exprimés, 57 considéraient que l'analyse vidéo automatisée du comportement serait utile, par exemple pour gérer la santé, améliorer le suivi de l'alimentation, comprendre l'utilisation des espaces de vie, ou pour un meilleur suivi des troupeaux. La création de références sur le comportement des taurillons, en cours de développement dans les suites du projet, répond à ces attentes, ouvrant sur la possibilité, à terme, de générer des alertes en cas d'anomalie, en complément des observations de l'éleveur.

Au-delà des perspectives offertes par cette technologie, des questions techniques restent à résoudre pour envisager une utilisation en élevage commercial : le nombre et le positionnement des caméras, l'utilisation des images nocturnes, ainsi que l'identification individuelle des animaux, dans des systèmes surtout basés sur l'homogénéité des lots. La nécessité de sécurisation des données collectées via ces systèmes a également fait partie des besoins exposés lors du webinaire. Répondre aux attentes exprimées suppose aussi d'entrainer et de mettre à l'épreuve l'algorithme avec une diversité d'images importante, et ce pour chaque comportement ciblé. Le projet BeBoP, comme d'autres initiatives (Veissier *et al*, 2022), a montré l'attention à porter à ces étapes pour garantir la fiabilité attendue des informations ou des alertes, et les rendre utiles aux éleveurs.

Le comportement est un enjeu clé de l'évaluation du bien-être des animaux (Mirabito *et al*, 2018 ; Mounaix *et al*, 2013) : il traduit l'adaptation de l'animal à son environnement de vie et sa réponse aux changements de cet environnement, voire son état de santé (Guiadeur *et al*, 2022). Les variations de comportement sont souvent plus rapides et visibles que les modifications de l'état de l'animal (blessures, signes cliniques) et elles sont plus faciles à observer que d'autres paramètres (physiologiques, métaboliques). Comme nous l'avons vu dans nos observations, ils ne sont pas aussi répétables que les autres indicateurs. L'expression de stéréotypies peut, par exemple, fortement varier en fonction du moment d'observation, c'est-à-dire de la situation vécue par l'animal. Par ailleurs, certains comportements ont une variabilité inter-individuelle, liée à l'apprentissage et aux interactions au sein d'un groupe d'animaux élevés ensemble, mais aussi aux interactions avec l'humain. L'analyse du comportement présente donc une complexité intrinsèque et nécessite de s'appuyer sur des comparaisons, dans le temps, par rapport à un groupe, à la distribution de l'indicateur entre fermes, ou à une référence. Par ailleurs, ces indicateurs souffrent souvent d'une plus faible acceptabilité de la part des éleveurs et des intervenants en élevage. Lors de nos enquêtes, les indicateurs comportementaux ont été jugés moins acceptables, souvent qualifiés de « nouveaux » ou « méconnus » (par exemple les stéréotypies ou le QBA (Qualitative Behavioural Assessment)).

Pour ces raisons, les outils multicritères d'évaluation du bien-être animal comportent souvent peu d'indicateurs comportementaux : des tests de réactivité des animaux à l'humain (Boviwell, Lebrun *et al*, 2018), la mesure des interactions entre animaux (calculateur bien-être animal des veaux de boucherie, Mounaix *et al*, 2024), le temps mis pour se coucher ou le QBA (Welfare Quality, 2009). Les perspectives offertes par les nouvelles technologies permettront d'étoffer le nombre et la diversité de ces indicateurs à intégrer dans l'évaluation du bien-être animal. Combinés avec des indicateurs de l'état corporel ou sanitaire des animaux, le comportement pourrait alors être considéré comme un indicateur d'alerte, signalant la possibilité d'un risque pour le bien-être des animaux basé sur une « combinaison d'anomalies » et nécessitant un examen plus approfondi de leur environnement de vie pour identifier les causes et les solutionner.

5. Conclusion

Le projet BeBoP a permis d'établir un protocole d'évaluation basé sur des indicateurs validés et utilisables pour mesurer le bien-être de taurillons à partir d'observations faites sur les animaux en

groupe. Ces indicateurs, adaptés aux conditions d'observation en atelier d'engraissement de taurillons en France, complètent ceux déjà utilisés dans différentes méthodes ou outils d'évaluation. A terme, ils pourraient permettre à ces outils de gagner en faisabilité sans perdre en fiabilité. La bonne acceptabilité par les éleveurs enquêtés augure d'une mise en œuvre facilitée dans les élevages.

Les premiers résultats de l'analyse vidéo automatisée du comportement peuvent être considérés comme acceptables pour une preuve de concept, même si nous avons identifié certaines limites. Les suites de ce travail, visant à créer des références et à tester la possibilité d'alertes en cas de comportement différent de la référence, sont en cours pour répondre aux attentes des éleveurs. Cet outil pourrait aussi être utilisé pour analyser la répartition spatiale des taurillons dans les parcs, afin d'évaluer d'autres facteurs tels que l'espace disponible, l'accès aux ressources ou les interactions au sein du lot, voire, demain, pour aborder la question de l'enrichissement du milieu de vie en élevage de taurillons. A terme, la solution parait donc prometteuse pour les éleveurs et pour les chercheurs.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Cet article a été rédigé par Agathe Cheype et Béatrice Mounaix, et relu par l'ensemble des auteurs.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Quentin DELAHAYE qui a réalisé l'annotation des vidéos utilisées dans le projet, et Cécile PIQUEMAL, stagiaire ayant contribué aux tests en élevage.

Déclaration de soutien financier

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural (CASDAR). Projet BeBoP CASDAR n°19ART384781.

Références bibliographiques

Boissy A., Trillat G., Fernandez X., Boivin X., Sapa J., Culioli J., Le Neindre P., 2000. Réactivité comportementale et indicateurs de qualité de la viande chez le taurillon. Rencontres Recherches Ruminants 7 : 58-61.

Cozzi G., Tessitore E., Contiero B., Ricci R., Gottardo F., Brscic M., 2013. Alternative solutions to the concrete fully-slatted floor for the housing of finishing beef cattle: effects on growth performance, health of the locomotor system and behaviour. Veterinary Journal 197 (2): 211-215.

Dawkins M.S., 2021. Does Smart Farming Improve or Damage Animal Welfare? Technology and What Animals Want. Frontiers in Animal Science, 2, 736536.

De Boyer des Roches A., Mounier L., Coignard M., Bareille N., Guatteo R., Veissier I., 2012. Bien-être animal en élevage laitier : Problèmes majeurs rencontrés et relation avec certaines caractéristiques des fermes. Rencontres Recherches Ruminants 19 : 277-280.

Guiadeur M., Allain C., Assie S., Bertron J.-J., Concordet D., Merle L.-A., Mounaix B., Philibert A., Chassan M., 2022. Détecter les troubles respiratoires des jeunes bovins automatiquement et précocement à l'aide de capteurs multiparamètres. Rencontres Recherches Ruminants 26 : 407-410.

Lebrun A., Lemains C., Ballot N., Mounaix B., Cheype A., Mirabito L., 2018. Démarche interprofessionnelle pour un outil de suivi et d'amélioration du bien-être animal pour les éleveurs de bovins allaitants et bovins laitiers. Rencontres Recherche Ruminants 24 : 224-227.

Mirabito L., Boissy A., Mounier L., Mormede P., 2018. Bien-être animal : Quelques repères pour agir dans un paysage en évolution. Rencontres Recherche Ruminants 24 : 201-208.

Mounaix B., Terlouw C., Le Guenic M., Bignon L., Meunier-Salaun M.-C., Courboulay V., Mirabito L., 2013. L'évaluation et la gestion du bien-être animal : diversité des approches et des finalités. Rencontres Recherche Ruminants 20 : 189-192.

Mounaix B., Legris M., Aupiais A., Le Goic D., 2024. Évaluer le bien-être des veaux : du modèle scientifique à l'outil filière. Rencontres Recherche Ruminants 27 : 358-361.

Mounier L., Veissier I., Boissy B., 2005. Behavior, physiology, and performance of bulls mixed at the onset of finishing to form uniform body weight groups. Journal of Animal Science 83, 1696–1704.

Philibert A., Mounaix B., Vanbergue E., Aupiais A., Assie S., 2020. Budget temps des jeunes taurillons en engraissement : ce que nous disent les accéléromètres. Rencontres Recherche Ruminants 25 : 56.

Stomp M., Demont C., Veissier I., 2023. Pratiques actuelles d'évaluation du bien-être animal des filières volailles et bovins. *Innovations Agronomiques* 87, 19-28.

Tuomisto L., Mononen J., Martiskainen P., Ahola L., Huuskonen A.-K., 2015. Time budgets of finishing bulls housed in an uninsulated barn or at pasture. Agricultural and Food Science 24 : 173-182.

Veissier I., Lardy R., Mialon M.-M., Ruin Q., Antoine V., Koko J., 2022. Machine Learning appliqué au suivi du comportement pour identifier maladies, états reproductifs et perturbations des vaches laitières. Rencontres Recherche Ruminants 26 : 562-564.

Welfare quality, 2009. https://www.welfarequalitynetwork.net

Waiblinger S., Boivin X., Pedersen V., Tosi M. V., Janczak A. M., Visser E. K., Jones R.-B., 2006. Assessing the human–animal relationship in farmed species: a critical review. Applied animal behaviour science 101, 185-242.

Pour citer cet article : Agathe Cheype, Béatrice Mounaix, Jérôme Manceau, Vincent Gauthier, Quentin Delahaye, *et al.*. BeBoP : Evaluer le bien-être des taurillons : des indicateurs revus pour gagner en faisabilité sans perdre en fiabilité. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.113-122. 10.17180/ciag-2025-vol107-art09

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

AQUA BIEN-ÊTRE : Amélioration du bien-être des truites d'élevage : besoins, indicateurs spécifiques et effets des enrichissements.

Laurine MESSAGER[1], Aude KLEIBER[2], Violaine COLSON[2], Ségolène CALVEZ[3], Vanessa GUESDON[4], Mohamed MOUSTAPHA[5], Aurélien TOCQUEVILLE[6]

[1] ITAVI – 41 rue de Beaucemaine 22440 Ploufragan, France

[2] INRAE – LPGP - 16A All. Henri Fabre, 35700 Rennes, France

[3] ONIRIS – INRAE CS 40706 44307 Nantes, France

[4] JUNIA – 2 rue Norbert Ségard 59800 Lille, France

[5] CIPA – 32 rue de Paradis 75010 Paris, France

[6] ITAVI – Service Aquaculture 28 rampe Bouvreuil 76000 Rouen, France

Correspondance : tocqueville@itavi.asso.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art10

Résumé

L'article explore l'amélioration des conditions d'élevage des truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*), espèce dominante de l'aquaculture française, dans un contexte d'attentes croissantes en matière de bien-être animal. Le projet AQUA BIEN-ÊTRE a permis d'identifier 13 indicateurs sanitaires et 12 comportementaux pour évaluer leur bien-être, en mettant en lumière leurs besoins comportementaux. Des enrichissements environnementaux ont été testés, incluant la diffusion de bulles comme signal prédictif du nourrissage et l'introduction de structures physiques (tuyaux, plantes artificielles), réduisant les comportements agressifs, améliorant les capacités cognitives et maintenant les performances de croissance. L'outil EBENE®, développé en partie dans ce cadre, offre une méthode innovante pour évaluer et optimiser le bien-être en élevage, avec des perspectives d'adaptation à d'autres espèces d'intérêt économique.

Mots-clés : pisciculture, besoins comportementaux, bien-être animal, évaluation

Abstract: Improving the welfare of farmed trout: needs, specific indicators, and the effects of enrichments

The article explores the improvement of farming conditions for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), the dominant species in French aquaculture, in the context of growing expectations regarding animal welfare. The AQUA BIEN-ÊTRE project identified 13 health indicators and 12 behavioral indicators to assess their well-being, highlighting their behavioral needs. Environmental enrichments were tested, including bubble diffusion as a feeding predictive signal and the introduction of physical structures (pipes, artificial plants), which reduced aggressive behaviors, enhanced cognitive abilities, and maintained growth performance. The EBENE® tool, partially developed within this framework, offers an innovative method to assess and optimize welfare in farming practices, with potential for adaptation to other economically significant species.

Keywords: trout, animal welfare, indicators, enrichments

1. Introduction

L'aquaculture fournit aujourd'hui plus de 57 % des poissons destinés à la consommation humaine dans le monde, contre seulement 15 % dans les années 1990, selon la FAO (Food and Agriculture Organization, 2024). Cette augmentation accompagne une demande mondiale croissante : en 2022, la consommation mondiale de produits issus d'animaux aquatiques destinés à l'alimentation humaine a atteint 20,7 kg par habitant, tandis qu'en France, elle s'élevait à 32,5 kg par habitant (FranceAgriMer, 2023). Cependant, la production piscicole française reste limitée, couvrant à peine 2 % de cette consommation avec environ 41 000 tonnes de poissons issus de l'aquaculture. Parmi les principales espèces élevées figurent les salmonidés d'eau douce (32 310 T), les poissons marins comme le bar, la daurade et le saumon (4 929 T), les poissons d'étangs (2 949 T), et d'autres espèces comme l'esturgeon (263 T de chair d'esturgeon et 38 T de caviar) (Agreste, 2024 ; CIPA, 2024).

Parmi les espèces d'eau douce, la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) domine largement la production en France, représentant 98 % des 32 310 tonnes de salmonidés produits en 2022 (Agreste, 2024 ; CIPA, 2024). Avec cette production, la France est le deuxième producteur européen de truite arc-en-ciel, derrière le Danemark, se distinguant par sa première place pour les grandes truites et sa quatrième position pour les truites portions. A l'échelle mondiale, la production de truite arc-en-ciel a atteint 981 239 tonnes en 2020, dominée par l'Iran (20 %), l'Union européenne (19 %), la Turquie (15 %) et la Norvège (10 %) (EUMOFA, 2023).

Cependant, cette expansion de l'aquaculture s'accompagne de préoccupations croissantes quant aux conditions d'élevage et au bien-être des poissons. Pendant longtemps, les poissons étaient considérés comme des animaux incapables de ressentir la douleur. Toutefois, des recherches scientifiques récentes ont montré que les poissons, y compris la truite arc-en-ciel, possèdent des nocicepteurs, des récepteurs sensoriels qui leur permettent de détecter les stimuli nocifs, tels que des blessures ou des substances irritantes (Sneddon, 2003). Lorsqu'elles sont exposées à ces stimuli, les truites montrent des comportements caractéristiques de la douleur, comme des frottements contre des surfaces, une modification de la respiration et un arrêt de l'alimentation se prolongeant dans le temps (Sneddon, 2003). En outre, ces réactions qui durent dans le temps vont au-delà de simples réflexes. Les truites peuvent retenir ces expériences douloureuses, ce qui suggère une intégration cognitive de la douleur et de sensibilité émotionnelle (Sneddon, 2004, 2009). Les recherches récentes ont également révélé que les truites possèdent des capacités cognitives complexes. Elles sont par exemple capables de reconnaître leurs congénères individuellement par des repères visuels (Höjesjö *et al*., 2015 ; Johnsson et Åkerman, 1998), mais également d'apprentissages associatifs démontrés par le biais d'un conditionnement classique (Nordgreen *et al*., 2010) ou opérant (Kleiber *et al*., 2021), d'apprentissage spatial dans un labyrinthe en forme de T (Poisson *et al*., 2017), de mémoire de travail et même de flexibilité cognitive (Brunet *et al*., 2023). Les truites sont capables de s'adapter à des environnements nouveaux et d'adapter leur comportement en fonction d'expériences passées (Brown, 2015). Comme dans la nature, les processus cognitifs représentent une composante clé du bien-être des poissons en élevage puisqu'ils leur permettent d'anticiper et de se préparer à des événements spécifiques (repas, pêche) et de s'habituer à des situations stressantes précédemment rencontrées pour moduler leur réponse de stress et pour pouvoir faire face à l'anxiété générée par des conditions d'hébergement imprévisibles (Cañon Jones *et al*., 2012). En effet, les poissons peuvent ressentir des émotions telles que l'anxiété (Colson *et al*., 2019) ou encore la peur (Colson *et al*., 2015), et probablement d'autres qui restent encore à démontrer, les travaux sur ce sujet étant encore récents.

Ces avancées scientifiques ont ainsi contribué à renforcer la prise de conscience des besoins des poissons, conduisant à une évolution des attentes sociales sociétales et législatives en ce qui concerne leur bien-être. C'est ainsi qu'en 2016, une enquête Eurobaromètre révélait que 82 % des Européens jugeaient essentiel de garantir le bien-être des poissons d'élevage, un chiffre confirmé par de nouvelles enquêtes menées en 2021 (FranceAgriMer, 2022).

Pour répondre à ces attentes, la Commission Européenne a intégré en 2021 des mesures spécifiques de bien-être animal dans ses orientations stratégiques pour une aquaculture plus durable et compétitive dans l'UE (Union européenne) pour la période de 2021-2030, reconnaissant l'importance d'une approche éthique des pratiques d'élevage (FranceAgriMer, 2020). Cependant, hormis des recommandations pour le bien-être des animaux aquatiques (OIE, 2021), il n'existe toujours pas de directive ciblant spécifiquement le bien-être des poissons captifs. Bien qu'une définition bien acceptée du bien-être animal existe, notamment celle proposée par l'ANSES (2018), son application aux poissons est plutôt récente. En effet, pendant de nombreuses années, le bien-être a été principalement associé aux espèces connues pour être dotées de capacités cognitives complexes et capables de ressentir la douleur, excluant les poissons (Chandroo *et al*., 2004). La recherche sur la physiologie et le comportement de ces animaux est donc encore récente par rapport à celle sur les animaux terrestres et des lacunes persistent quant à leurs besoins comportementaux spécifiques. Ces défis appellent à davantage d'avancées scientifiques et éthiques pour concilier la croissance de l'aquaculture avec les attentes des consommateurs en matière de bien-être animal.

Dans ce contexte, le projet AQUA BIEN-ÊTRE (CASDAR 2019) constitue une initiative innovante visant à améliorer les conditions de vie des truites arc-en-ciel en élevage. Ce projet a permis de définir des principes, critères et indicateurs spécifiques au bien-être de cette espèce et de développer une méthode d'évaluation basée sur une grille d'indicateurs. Il a également exploré l'enrichissement environnemental comme levier d'amélioration, à travers des expérimentations sur des stratégies d'enrichissements physiques et cognitifs, menées en station expérimentale et en élevages commerciaux. Par ailleurs, une enquête a été réalisée pour évaluer la perception et le niveau de connaissances des consommateurs sur le bien-être des truites. Bien que cette dimension ne soit pas approfondie dans cet article, elle constitue une piste essentielle pour compléter la réflexion autour de l'acceptabilité sociétale des pratiques étudiées.

2. Besoins et indicateurs de bien-être des truites

2.1. Les besoins des truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*)

Les besoins des truites peuvent être regroupés en plusieurs grandes catégories : les besoins liés aux ressources disponibles, à leur environnement, à leur santé et à leur liberté d'expression comportementale. Ces catégories, interdépendantes, contribuent à l'état émotionnel des poissons et influencent directement leur niveau de bien-être (Figure 1).

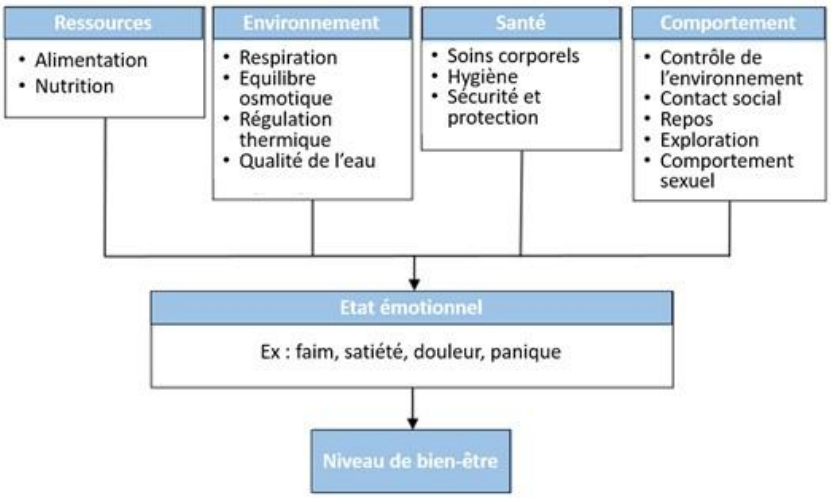


Figure 1 : Les besoins en matière de bien-être des truites arc-en-ciel peuvent être catégorisés en ressources disponibles, un environnement aqueux approprié, une bonne santé et en leur liberté d'expression

comportementale. Le degré de satisfaction de ces besoins influence leur état émotionnel et en conséquence leur bien-être (schéma adapté et traduit en français de Noble *et al*., 2020).

Un des points majeurs concernent les besoins comportementaux, tels que le contrôle de l'environnement, le contact social, le repos, l'exploration et les comportements sexuels. Par ailleurs, des recherches bibliographiques ont permis d'identifier d'autres besoins comportementaux essentiels observés à l'état naturel, qui seront analysés brièvement afin de mieux comprendre leur importance pour le bien-être des truites en élevage.

- *Se déplacer et explorer pour accéder aux ressources*

Les truites arc-en-ciel adoptent des comportements exploratoires pour rechercher de la nourriture, survivre, découvrir et s'informer sur des environnements nouveaux. Dans la nature, elles exploitent par exemple les substrats meubles, tels que les graviers, pour localiser des proies comme les insectes et les crustacés (Flamarique et Browman, 2001). Les truites nagent activement à contre-courant pour capter l'oxygène (Houlihan et Laurent, 2011). Leur mobilité varie selon les besoins alimentaires et écologiques (Olden *et al*., 2010). Pendant la reproduction, elles migrent vers ce qu'on appelle des zones de frai (Moore *et al*., 2010) et franchissent des obstacles naturels ou artificiels par des sauts, un comportement que l'on peut observer chez les salmonidés (Jonsson et Jonsson, 2009).

- *Se cacher pour se protéger*

Les refuges (rochers, racines, végétation) réduisent le risque de prédation, limitent le stress thermique en régulant la température de l'eau et diminuent les coûts énergétiques en modérant la vitesse du courant (Crook et Robertson, 1999 ; Johnson *et al*., 2005 ; Jonsson et Jonsson, 2009). Les truites privilégient d'ailleurs des refuges situés dans des zones à faible courant (Stewart *et al*., 2016). Les habitats complexes, incluant les zones rocheuses et les végétations submergées, sont ainsi particulièrement favorisés car ils fournissent des cachettes et facilitent l'accès aux proies, des facteurs cruciaux pour leur survie (Fausch *et al*., 2002).

- *Se reposer*

Les poissons comme tous les organismes, ont une horloge biologique qui leur permet de repérer les régularités de leur environnement et de s'y préparer. Les truites, comme tous les poissons, sont dépourvues de paupières et leur activité est régulée en fonction de leur rythme circadien. Elles alternent donc entre des périodes d'activité de forte intensité, notamment pour l'accès aux ressources ou lorsqu'elles adoptent des comportements anti-prédateurs, et des périodes d'activité modérée propices au repos (Bégout Anras et Lagardère, 2004), pendant lesquelles les truites stagnent généralement dans des zones à faible courant.

- *Interagir socialement*

Le besoin de contact social est associé à la quête de sécurité, permettant aux poissons de se protéger au sein d'un groupe, de partager des informations sur la nourriture et les menaces, et de rencontrer des partenaires pour la reproduction. Ce besoin peut évoluer en fonction des différents stades de vie, y compris chez les salmonidés (Noble *et al*., 2020) :

- Comportement grégaire chez les jeunes : les jeunes truites forment des groupes dans des zones offrant protection et ressources alimentaires (Héland, 1991) ;
- Territorialité chez les adultes : les adultes, surtout les mâles en période de reproduction, défendent activement les zones de frai et de nourriture par des comportements agressifs (Fausch *et al*., 2002) ;

- Hiérarchie sociale : les truites établissent des hiérarchies basées sur la taille et l'âge, avec les dominants occupant les meilleures zones de ressources, particulièrement en cas de stress environnemental (Fausch *et al*., 2002).

- *Chasser pour se nourrir*

La truite arc-en-ciel adopte un comportement alimentaire opportuniste, se nourrissant principalement de petits poissons, d'invertébrés et d'insectes (Adams et James, 2008), avec une activité de chasse accrue au lever et au coucher du soleil. Sa faim déclenche une recherche alimentaire énergique et compétitive, récompensée par la satiété et le plaisir du goût. La motivation et les préférences alimentaires, influencées par des expériences conditionnées, reflètent une composante émotionnelle importante (Noble *et al*., 2020).

- *Se reproduire*

Les femelles creusent des nids dans le gravier pour pondre et protéger leurs œufs, tandis que les mâles deviennent agressifs pour attirer les femelles et défendre les territoires de frai. La reproduction naturelle est rare en France, mais a été signalée dans des cas isolés comme au lac des Bouillouses (Quinn et Foote, 1994).

- *Contrôler son environnement*

Avoir un contrôle sur son environnement est un besoin biologique et comportemental, en lien avec la quête de survie et d'efficacité dans un environnement souvent imprévisible. Les poissons doivent pouvoir s'orienter et se positionner librement dans l'espace afin de fuir des potentielles menaces ou d'accéder à des ressources d'intérêt. Cela leur permet notamment d'apprendre à anticiper des événements aversifs ou positifs (interactions sociales, nourriture) futurs. En raison de leur vessie natatoire il est également important que les truites puissent contrôler leur flottabilité pour rester à des profondeurs spécifiques afin d'économiser de l'énergie.

La satisfaction ou l'amélioration des besoins active les circuits neuronaux de la récompense, favorisant les émotions positives et renforçant les comportements bénéfiques (Spruijt *et al*., 2001). Ces circuits, associés à la dopamine de la voie mésolimbique, sont présents chez les vertébrés, dont les poissons (Fife-Cook et Franks, 2019). À l'inverse, leur insatisfaction active les circuits de la punition, déclenchant des émotions négatives comme la peur ou la frustration (Cerqueira *et al*., 2017). Tous les besoins des poissons sont essentiels à leur bien-être, bien que certains soient spécifiques à un stade de vie et pas toujours réalisable en élevage (comme la reproduction).

En élevage, il est crucial de garantir ces besoins et d'adapter les conditions à chaque stade de vie. Des indicateurs connus et ceux développés dans le cadre du projet CASDAR AQUA BIEN-ÊTRE permettent de compléter les pratiques existantes. Les travaux menés sur les enrichissements environnementaux physiques et cognitifs apportent des pistes de solutions pour mieux répondre aux besoins des truites arc-en-ciel en élevage.

2.2. Développement d'indicateurs de bien-être chez la truite arc-en-ciel

Un des objectifs des travaux du programme AQUA BIEN-ÊTRE était le développement de premiers indicateurs de bien-être pour la truite d'élevage, afin de développer la méthode EBENE® en pisciculture, adaptée de la filière l'avicole (Bignon *et al*. 2017). Cette méthode repose sur l'élaboration d'une grille de critères spécifiquement conçue pour les poissons d'élevage, prenant en compte leurs besoins physiologiques et comportementaux. Un premier panel d'indicateurs sanitaires (17) et comportementaux (18) a été sélectionné et des protocoles d'observations testés sur 17 sites d'élevage pendant deux ans. Les protocoles d'observation ont été appliqués à différents lots de truites aux différents stades de leur vie en élevage (juvénile jusqu'à la très grosse truite). Des réunions d'échanges avec les acteurs de la filière ont permis de faire des ajustements sur ces indicateurs et sur les

protocoles d'observation, afin de les rendre plus adaptés aux conditions d'élevage et aux spécificités des sites observés.

Pour évaluer le bien-être animal et répondre à la définition la plus récente de l'ANSES (2018) dans le contexte piscicole, il a été choisi un panel d'indicateurs de résultats directement observables sur les poissons en élevage. Après une première analyse, 13 indicateurs sanitaires et 12 comportementaux ont été retenus (Tableau 1). La méthodologie d'observation de ces indicateurs s'articule en deux phases :

- *L'évaluation de l'état sanitaire externe*

Pendant cette phase, 30 poissons sont observés pour chaque indicateur sanitaire, depuis le bord des bassins, sans manipulation des animaux. Les indicateurs sanitaires retenus sont les suivants, exprimés en nombre d'individus présentant le dommage observé : « petit », « coup de soleil », « état de la nageoire caudale », « état de la nageoire dorsale », « état des nageoires pectorale », « état des opercules », « état du nez-bouche », « nécrose », « déformation vertébrale », « moribond », « mousse », « perte d'écaille », « mort ». Quelques indicateurs se distinguent par leur sévérité : « faible », « moyenne » et « forte » pour les érosions des nageoires caudale, dorsale et pectorales. Pour les opercules et le nez-bouche, les sévérités « faible » et « forte » sont distinguées.

- *L'évaluation comportementale*

Cette phase débute par l'observation de la « réaction à l'humain » lors de l'arrivée de l'évaluateur devant la zone d'observation. Un chronomètre se déclenche en cas de réaction des poissons et enregistre le temps nécessaire pour un « retour à la normale », avec une limite maximale de 3 minutes.

Ensuite, durant 5 minutes, l'occurrence des comportements suivants seront enregistrés selon la méthode du *all occurence sampling* (Lehner, 1992) : « hyperventilation », « comportement agressif », « accélération », « saut », « stéréotypie temporaire ».

Toutes les minutes, l'évaluateur caractérisera la nage selon la méthode de *scan sampling* (Altman, 1974), en qualifiant les critères suivants : l'activité de nage « nage active ou nage stagnante », le sens de nage : « nage à contre-courant ou dans le courant ou désorganisée ou tourne en rond », la forme du groupe de poisson « nage groupée ou non groupée » et enfin la « répartition des poissons sur la colonne d'eau » avec « le temps passé en surface ou au fond du bassin ».

Une première validation de ces indicateurs a consisté à observer des truites arc-en-ciel dans deux bassins (40 m x 5 m), avec 60 observations réalisées par deux observateurs. La redondance entre indicateurs a été testée par corrélations, et la répétabilité inter-observateur évaluée avec la corrélation de Spearman (quantitatif) et le Kappa de Cohen (qualitatif). Il en résulte que 12 indicateurs sur 25 étaient répétables (Tableau 1), mais les indicateurs sanitaires sur les érosions des nageoires indiquaient une difficulté de fiabilité entre observateurs.

Après avoir identifié les besoins comportementaux et les indicateurs spécifiques permettant d'évaluer le bien-être des truites, il était essentiel d'explorer les solutions pratiques pour y répondre. Les enrichissements cognitifs et physiques se présentent comme des leviers prometteurs pour améliorer les conditions d'élevage.

Tableau 1 : Tableau présentant les principes – critères – indicateurs de résultats et analyse des indicateurs envisagées dans la méthodologie EBENE® Truite.Principes

	Critères	Indicateurs de résultats	Redondance	Répétabilité inter-observateur
Bonne alimentation	Gestion adaptée de l'alimentation	Petits	✓	✓ *corr=0.443***

Bon environnement	Confort d'ambiance	Répartition sur la hauteur d'eau	✓	✓ *K=0.464****
		Hyperventilation	✓	✓ *corr=0.691****
	Capacité de mouvement	Nage active	✓	✓ *K=0.500****
		Nage à contre-courant	✓	X
	Rythme d'activité en accord avec le cycle biologique de l'espèce	Coups de soleil	✓	X
Bonne santé	Prévention des blessures et des maladies	Erosion des nageoires *(absence, sévérité faible-moyenne-forte)* :		
		Caudale	✓	X
		Dorsale	X	X
		Pectorale	✓	X
		Eta des opercules *(absence, sévérité faible-forte)*	X	X
		Etat des yeux	✓	✓ *corr=0.695****
		Nécrose	✓	✓ *corr=0.538****
		Déformation vertébrale	✓	X
	Soins aux animaux blessés et malades	Stéréotypie moribond	✓	✓ *corr=0.602****
		Mousse	*N.A*	*N.A*
	Bonnes pratiques des interventions sur les animaux	Perte d'écailles	✓	✓ *corr=0.559****
		Mort	✓	✓ *corr=0.864****
Comportement approprié de l'espèce domestiquée	Comportement du groupe	Comportement agressif	*N.A*	*N.A*
		Accélération	✓	X
		Saut	*N.A*	*N.A*
		Nage groupée ou désorganisée ou en rond	✓	X
	Adaptation aux exigences comportementales de l'espèce domestiquée	Stéréotypie temporaire	*N.A*	*N.A*
	Prévention de peur et de stress	Mouvement de groupe vif	✓	✓ *corr=0.694****
		Réaction à l'humain	✓	✓ *K=0.817****
		Temps d'habituation	✓	✓ *corr=0.980****

3. Enrichissements cognitif et physique : effets sur le bien-être des truites

En aquaculture, l'enrichissement environnemental vise à répondre aux besoins comportementaux et physiologiques des poissons d'élevage, souvent contraints par les limites de leur milieu. En effet, les conditions d'hébergement en élevage sont encore relativement appauvries, pouvant limiter l'expression de comportements naturels et exacerber le stress (Morgan et Tromborg, 2007).

L'enrichissement permet de diversifier l'environnement et d'offrir des stimulations essentielles au bien-être psychologique et physiologique des poissons. Il peut être de deux types principaux :

- *enrichissement cognitif* (*ou occupationnel)*, donnant la possibilité à l'animal de relever des challenges modérés en utilisant ses capacités cognitives et d'interagir activement avec son environnement. Cela peut se traduire par la prévisibilité d'événements (ex : nourrissage) pour encourager l'apprentissage et réduire l'anxiété liée à l'imprévisibilité. Une synthèse bibliographique sur les différentes stratégies d'enrichissements cognitifs chez les poissons a été publiée dans le cadre du projet AQUA BIEN-ETRE (Kleiber *et al*., 2023).
- *enrichissement physique :* il consiste à complexifier le milieu de vie de l'animal en ajoutant des éléments physiques (structures/accessoires, substrats) et/ou des stimuli sensoriels (visuels, auditifs, etc.), de façon permanente ou temporaire pour stimuler notamment l'exploration et limiter les interactions agonistiques.

Le projet visait à évaluer des enrichissements environnementaux en testant leurs effets sur différents indicateurs de bien-être :

- *le comportement (activité, agressions) ;*
- *les émotions et la cognition (réactivité émotionnelle,capacités d'apprentissage) ;*
- *les performances zootechniques (croissance, résistance aux pathogènes).*

Les enrichissements testés étaient cognitifs (prévisibilité du nourrissage) ou physiques (rideaux de bulles, structures laminaires, ombrières) en conditions contrôlées et en élevage.

3.1. Enrichissement cognitif : le bullage comme signal prédicteur du nourrissage (Kleiber *et al*., 2022, 2024)

La prévisibilité des événements quotidiens, comme le nourrissage, est une méthode d'enrichissement cognitif prometteuse. Chez les poissons, les études se concentrent principalement sur la prévisibilité temporelle, mais peu explorent l'effet des signaux visuels ou tactiles comme indicateurs alimentaires (Kleiber *et al*., 2023). Dans ce projet, l'enrichissement cognitif a été étudié dans le cadre d'un travail de thèse. Ces travaux visaient notamment à utiliser la diffusion de bulles comme un signal visuel et tactile, prédicteur du nourrissage, seul ou combiné à un horaire fixe, afin de déterminer son impact sur le comportement et le bien-être des truites.

Quatre conditions de prévisibilité du nourrissage ont été étudiées :

1. Temporelle seule : nourrissage à heure fixe ;
2. Signalée seule : bullage diffusé avant le repas ;
3. Double prévisibilité : bullage diffusé avant le repas à heure fixe ;
4. Imprévisible : repas distribués à des horaires aléatoires.

Les comportements observés incluaient l'activité de nage, les comportements agressifs (attaques, poursuites), les sauts et les accélérations soudaines. D'autres indicateurs étaient mesurés : croissance, réponses à des tests d'omission alimentaire et réactivité émotionnelle des poissons soumis à un

isolement social en environnement nouveau, et mesurée par leurs réponses comportementales et physiologiques (cortisol plasmatique).

Les truites ont rapidement appris à associer la diffusion des bulles au nourrissage. Une activité de nage anticipatoire a été observée dans les conditions « signalée seule » et « double prévisibilité ». Toutefois, la condition « temporelle seule » a entraîné une augmentation des comportements agressifs avant le nourrissage (sauts, accélérations), suggérant un effet stressant dû à l'attente.

La condition de double prévisibilité a réduit ces comportements agressifs tout en favorisant l'anticipation. En outre, le bullage, même hors contexte de nourrissage, a stimulé une activité de nage accrue dans le rideau de bulles, indiquant un possible enrichissement sensoriel. Les paramètres de croissance et la réactivité émotionnelle n'ont pas été affectés par les conditions testées.

Un enrichissement cognitif utilisant le bullage comme signal prédicteur du nourrissage présente plusieurs avantages :

- réduction des comportements agonistiques avant le repas grâce à une meilleure anticipation ;
- effet stimulant général en tant qu'enrichissement sensoriel.

Cette approche pourrait améliorer le bien-être des truites arc-en-ciel tout en restant facile à intégrer dans les pratiques piscicoles.

3.2. Enrichissements physiques : tests en stations expérimentales et en conditions réelles

3.2.1. Diffusions de bulles d'air (INRAE) (Amichaud *et al*., 2024)

L'introduction de rideaux de bulles diffusés régulièrement a été testée sur des truites juvéniles pendant 7 semaines (court terme) et 21 semaines (long terme). Les résultats montrent :

- **une réduction des comportements agressifs** : les diffusions de bulles ont significativement diminué les comportements agressifs et anormaux pendant leur diffusion. À long terme, cette réduction s'est aussi observée en l'absence de diffusion de bulles, notamment pendant les repas ;
- **l'attractivité des bulles** : lors d'un test de motivation à accéder à un rideau de bulles, les poissons ont passé plus de temps dans la zone où des bulles étaient diffusées, conférant à ce stimulus une valence positive ;
- **une réduction de la réactivité émotionnelle** : les poissons exposés aux bulles ont manifesté moins de comportements indicateurs de peur (vitesse maximale) lors du test d'isolement social en environnement nouveau ;
- **une amélioration des capacités cognitives** : dans un exercice d'apprentissage spatial, les truites ayant été exposées aux bulles ont appris plus rapidement à atteindre la zone associée à une récompense ;
- **une absence d'effet sur la croissance et les indicateurs physiologiques** : aucun effet sur les paramètres de croissance et sur le cortisol plasmatique n'a été observé.

Ces résultats indiquent que des diffusions de bulles dans les bassins d'élevage représentent une stratégie d'enrichissement à la fois physique, sensoriel et occupationnel, favorisant le bien-être des truites. L'application de ce dispositif en conditions commerciales mérite d'être testée.

3.2.2. Structures physiques diverses (Station ONIRIS/INRAE-Nantes)

Des études ont été menées à INRAE (Brunet *et al*., 2022, 2023 ; Cardona *et al*., 2022). Des plantes artificielles, des tuyaux en PVC et des galets ont été introduits dans les bassins d'élevage et les indicateurs du bien-être des truites, développés dans le projet AQUA BIEN-ETRE, ont été comparés à une condition témoin (sans enrichissement) à court après 2 mois et à long terme 12 mois.

Les résultats montrent une diminution des comportements agressifs et des érosions de nageoires dans la condition enrichie et de meilleures performances de croissance. Les truites en environnement enrichi ont manifesté moins de comportements de peur lors du test d'isolement social et moins de néophobie vis-à-vis d'un objet nouveau. Les capacités d'apprentissage, et notamment la flexibilité cognitive mesurée à long terme ont été améliorées chez les truites de la condition enrichie.

Ces résultats indiquent qu'un enrichissement physique affecte positivement les états physiques et mentaux des truites, ce qui répond à la définition du bien-être animal. L'enrichissement physique confère aux truites de meilleures capacités d'adaptation en leur permettant de mieux faire face aux évènements stressants potentiellement rencontrés en conditions d'élevage. Des structures d'enrichissement plus adaptées à la filière piscicole nécessitent d'être testées plus en détail.

Une autre étude, menée à ONIRIS, a comparé les effets respectifs de différents types de structures immergées (laminaires, filtres bleus, tuyaux en caoutchouc) sur le comportement, la santé et la résistance des truites arc-en-ciel.

- **Structures efficaces** : Les tuyaux en caoutchouc, les laminaires et les filtres bleus ont été fréquemment utilisés par les poissons et ont réduit les agressions tout en augmentant leur résistance aux infections.
- **Structures moins adaptées** : Les tapis d'herbe et les parois en caoutchouc, peu explorés par les truites, se sont révélés peu ou pas efficaces en termes de modifications comportementales.
- **Contraintes de transposition** : Bien que prometteuses, ces structures nécessitent des ajustements pour être viables économiquement et techniquement dans des élevages commerciaux.

3.2.3. Essais d'enrichissements en conditions d'élevage : les ombrières (ITAVI) (Messager *et al*. 2024)

Dans une expérimentation sur des bassins piscicoles en extérieur, des ombrières recouvrant 30 % et 60 % de la surface des bassins ont été installées. Les résultats préliminaires laissent penser que les zones d'ombre permettraient de réduire le stress des truites face à la prédation des oiseaux piscivores et du passage des humains à proximité des bassins. Un sondage auprès des éleveurs a mis en évidence que ces dispositifs, tout en apportant des bénéfices aux poissons, répondent également à des besoins opérationnels tels que la réduction de l'exposition au soleil et aux intempéries.

4. Conclusion

En conclusion, le projet AQUA BIEN-ÊTRE a permis de poser des bases solides pour l'évaluation du bien-être des truites en élevage, grâce à une méthodologie innovante combinant indicateurs sanitaires et comportementaux. Suite à ce projet, un travail a permis de développer et de proposer un outil sous le format d'une application numérique (EBENE®). Les pisciculteurs partenaires du projet peuvent tester l'outil sur le terrain ce qui va permettre sa consolidation. Il résulte également que les recherches menées lors de ce projet ont ouvert la possibilité d'intégrer des stratégies d'enrichissement du milieu de vie des truites permettant ainsi d'améliorer leur bien-être. Toutefois, des perspectives d'évolution restent à explorer. Il sera crucial d'affiner la méthodologie, notamment en intégrant des indicateurs capables de mesurer les émotions positives des truites, et de développer de nouveaux enrichissements encore mieux adaptés à leurs besoins comportementaux et aux contraintes en élevage. Par ailleurs,

l'adaptation de ces approches à d'autres espèces piscicoles d'intérêt économique, comme les esturgeons, les bars ou les daurades, constitue une étape essentielle pour élargir l'impact de ces travaux et contribuer à une aquaculture plus durable et respectueuse du bien-être animal.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Ségoléne CALVEZ https://orcid.org/0000-0001-6145-2666

Violaine COLSON https://orcid.org/0000-0003-0934-7935

Vanessa GUESDON https://orcid.org/0000-0003-3806-6163

Aude KLEIBER https://orcid.org/0000-0002-2333-472X

Contributions des auteurs

Ségolène CALVEZ	Méthodologie, enquête
Violaine COLSON	Méthodologie, conceptualisation, validation
Vanessa GUESDON	Enquête
Aude KLEIBER	Méthodologie, conceptualisation, enquête, analyse formelle, écriture
Laurine MESSAGER	Ecriture, révision, enquête, analyse formelle
Mohamed MOUSTAPHA	Enquête, Rédaction
Aurélien TOCQUEVILLE	Supervision, administration du projet, enquête, rédaction

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

A l'ensemble des partenaires du programme AQUA BEA, aux stagiaires ayant participé aux travaux, aux pisciculteurs volontaires, à la Fédération Française d'Aquaculture et tous ses syndicats régionaux, à l'ensemble des acteurs de la filière piscicole française qui ont suivi ces travaux.

Déclaration de soutien financier

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation - CASDAR Appel à projet Innovation et Partenariat 2019.

Références bibliographiques

Adams, P., James, C., 2008. Rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) Species and Conservation Assessment. https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5202738.pdf

Altmann, J. (1974). Observational study of behavior : Sampling methods. *Behaviour*, *49*(3), 227-267. https://doi.org/10.1163/156853974x00534

Anses. (2018). Avis de l'Anses relatif au « Bien-être animal : contexte, définition et évaluation ». https://www.anses.fr/fr/system/files/SABA2016SA0288.pdf (consulté le 23/03/2024)

Amichaud, O., Lafond, T., Fazekas, G. L., Kleiber, A., Kerneis, T., Batard, A., Goardon, L., Labbé, L., Lambert, S., Milla, S., Colson, V. (2024). Air bubble curtain improves the welfare of captive rainbow trout fry and fingerlings. *Aquaculture*, *586*, 740828. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740828

Agreste (2024). *La production aquacole en France en 2022*. https://www.agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/GraFra2024Chap7.2/detail/ (Consulté le 17/10/2024)

Bégout Anras, M.-L., Lagardère, J. P. (2004). Measuring cultured fish swimming behaviour : First results on rainbow trout using acoustic telemetry in tanks. *Aquaculture*, *240*(1-4), 175-186. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.02.019

Bignon L., Mika A., Mindus C., Litt J., Souchet C., Bonnaud V., Picchiottino C., Warin L., Dennery G., Brame C., Guesdon V., Bouvarel I. (2017) Une méthode pratique et partagée d'évaluation du bien-être en filière avicole et cunicole : EBENE. Douzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, 05 et 06 avril 2017

Brown, C. (2015). Fish intelligence, sentience and ethics. *Animal Cognition*, *18*(1), 1-17. https://doi.org/10.1007/s10071-014-0761-0

Brunet, V., Kleiber, A., Patinote, A., Sudan, P.-L., Duret, C., Gourmelen, G., Moreau, E., Fournel, C., Pineau, L., Calvez, S., Milla, S., Colson, V. (2022). Positive welfare effects of physical enrichments from the nature-, functions- and feeling- based approaches in farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, *550*, 737825. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737825

Brunet, V., Lafond, T., Kleiber, A., Lansade, L., Calandreau, L., Colson, V. (2023). Environmental enrichment improves cognitive flexibility in rainbow trout in a visual discrimination task : First insights. *Frontiers in Veterinary Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1184296

Cañon Jones, H., Noble, C., Damsgård, B., Pearce, G. (2012). Investigating the influence of predictable and unpredictable feed delivery schedules upon the behaviour and welfare of Atlantic salmon parr (Salmo salar) using social network analysis and fin damage. *Applied Animal Behaviour Sciences*, *138*, 132-140. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2012.01.019

Cardona, E., Brunet, V., Baranek, E., Milhade, L., Skiba-Cassy, S., Bobe, J., Calandreau, L., Roy, J., Colson, V. (2022). Physical Enrichment Triggers Brain Plasticity and Influences Blood Plasma Circulating miRNA in Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss). *Biology*, *11*(8), Article 8. https://doi.org/10.3390/biology11081093

Cerqueira, M., Millot, S., Castanheira, M. F., Félix, A. S., Silva, T., Oliveira, G. A., Oliveira, C. C., Martins, C. I. M., Oliveira, R. F. (2017). Cognitive appraisal of environmental stimuli induces emotion-like states in fish. *Scientific Reports*, *7*(1), 13181. https://doi.org/10.1038/s41598-017-13173-x

Chandroo, K. P., Duncan, I. J. H., Moccia, R. D. (2004). Can fish suffer? : Perspectives on sentience, pain, fear and stress. *Applied Animal Behaviour Science*, *86*(3), 225-250. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2004.02.004

CIPA (2023). *Rapport annuel sur la production piscicole en France*. https://www.poisson-aquaculture.fr/le-cipa/

Colson, V., Mure, A., Valotaire, C., Le Calvez, J. M., Goardon, L., Labbé, L., Leguen, I., Prunet, P. (2019). A novel emotional and cognitive approach to welfare phenotyping in rainbow trout exposed to poor water quality. *Applied Animal Behaviour Science*, *210*, 103-112. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2018.10.010

Colson, V., Valotaire, C., Geffroy, B., Kiilerich, P. (2015). Egg cortisol exposure enhances fearfulness in larvae and juvenile rainbow trout. *Ethology*, *121*(12), 1191-1201. https://doi.org/10.1111/eth.12437

Crook, D. A., Robertson, A. I. (1999). Relationships between riverine fish and woody debris : Implications for lowland rivers. *Marine and Freshwater Research*, *50*(8), 941-953. https://doi.org/10.1071/mf99072

EUMOFA (2023). Overview of Rainbow Trout Production Worldwide. https://eumofa.eu/documents/20124/35623/PTAT_Large+trout.pdf/4923045b-73a7-e7ce-16ec-bd33301286a8?t=1686569699668 (consulté le 5/09/2024)

FAO (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in Action. https://daciat.ro/fao-2024-the-state-of-world-fisheries-and-aquaculture-2024-blue-transformation-in-action/

Fausch, K. D., Torgersen, C. E., Baxter, C. V., Li, H. W. (2002). Landscapes to Riverscapes : Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes: A Continuous View of the River is Needed to Understand How Processes Interacting among Scales Set the Context for Stream Fishes and Their Habitat. *BioScience*, *52*(6), 483-498. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0483:LTRBTG]2.0.CO;2

Fife-Cook, I., Franks, B. (2019). Positive Welfare for Fishes: Rationale and Areas for Future Study. *Fishes*, *4*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/fishes4020031

Flamarique, I. N., Browman, H. I. (2001). Foraging and prey-search behaviour of small juvenile rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) under polarized light. *Journal of Experimental Biology*, *204*(14), 2415-2422. https://doi.org/10.1242/jeb.204.14.2415

FranceAgriMer (2022) Consommation des produits de la pêche et de l'aquaculture 2022. Edition décembre 2023. 2022 https://www.franceagrimer.fr/content/download/72643/document/STA_MER_CONSO_2022.pdf

FranceAgriMer (2023). Consommation des produits de la pêche et de l'aquaculture 2023. Edition juillet 2024. https://www.franceagrimer.fr/filiere-peche-et-aquaculture/Eclairer/Etudes-et-Analyses/Chiffres-et-bilans

Héland. (1991). Organisation sociale et territorialité chez la truite commune immature au cours de l'ontogénèse. In La truite, biologie et écologie. Ed. Baglinière et Maisse. INRA éditions (p.121-149)

Höjesjö, J., Axelsson, M., Dahy, R., Gustavsson, L., Johnsson, J. (2015). Sight or smell? Behavioural and heart rate responses in subordinate rainbow trout exposed to cues from dominant fish. *Peer J*, *3*. https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.880v1

Houlihan, D., Laurent, P. (2011). Effects of Exercise Training on the Performance, Growth, and Protein Turnover of Rainbow Trout (Salmo gairdneri). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *44*, 1614-1621. https://doi.org/10.1139/f87-195

Johnson, S. L., Rodgers, J. D., Solazzi, M. F., Nickelson, T. E. (2005). Effects of an increase in large wood on abundance and survival of juvenile salmonids (Oncorhynchus spp.) in an Oregon coastal stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *62*(2), 412-424. https://doi.org/10.1139/f04-222

Johnsson, J. I., Åkerman, A. (1998). Watch and learn : Preview of the fighting ability of opponents alters contest behaviour in rainbow trout. *Animal Behaviour*, *56*(3), 771-776. https://doi.org/10.1006/anbe.1998.0824

Jonsson, B., Jonsson, N. (2009). Population Enhancement and Population Restoration. In B. Jonsson & N. Jonsson, *Ecology of Atlantic Salmon and Brown Trout* (p. 567-632). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1189-1_11

Kleiber, A., Le-Calvez, J.-M., Kerneis, T., Batard, A., Goardon, L., Labbé, L., Brunet, V., Ferreira, V. H. B., Guesdon, V., Calandreau, L., Colson, V. (2022). Positive effects of bubbles as a feeding predictor on behaviour of farmed rainbow trout. *Scientific Reports*, *12*(1), 11368. https://doi.org/10.1038/s41598-022-15302-7

Kleiber, A., Roy, J., Brunet, V., Baranek, E., Le-Calvez, J. M., Kerneis, T., Batard, A., Calvez, S., Pineau, L., Milla, S., Guesdon, V., Calandreau, L., Colson, V. (2024). Feeding predictability as a cognitive enrichment

protects brain function and physiological status in rainbow trout : A multidisciplinary approach to assess fish welfare. *animal*, *18*(3), 101081. https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101081

Kleiber, A., Stomp, M., Rouby, M., Ferreira, V. H. B., Bégout, M.-L., Benhaïm, D., Labbé, L., Tocqueville, A., Levadoux, M., Calandreau, L., Guesdon, V., Colson, V. (2023). Cognitive enrichment to increase fish welfare in aquaculture : A review. *Aquaculture*, *575*, 739654. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739654

Kleiber, A., Valotaire, C., Patinote, A., Sudan, P.-L., Gourmelen, G., Duret, C., Borel, F., Goff, L. L., Peyrafort, M., Guesdon, V., Lansade, L., Calandreau, L., Colson, V. (2021). Rainbow trout discriminate 2-D photographs of conspecifics from distracting stimuli using an innovative operant conditioning device. *Learning and Behavior*, *49*(3), 292. https://doi.org/10.3758/s13420-020-00453-2

Lehner, P. N. (1992). Sampling Methods in Behavior Research. *Poultry Science*, *71*(4), 643-649. https://doi.org/10.3382/ps.0710643

Messager L., Faucrot A., Kot L., Pastorelli H., Laithier J., Basuyau V., Tocqueville A. (2024). Enrichissements et bien-être des poissons : Tests de faisabilité sur la mise en place d'ombrière et de leur impact sur les truites arc-en-ciel. JRFP 2024

Moore, M.E., Goetz, F.A., Doornik, D.M.V., Tezak, E.P., Quinn, T.P., Reyes-Tomassini, J.J., Berejikian, B. A. (2010). Early Marine Migration Patterns of Wild Coastal Cutthroat Trout (Oncorhynchus clarki clarki), Steelhead Trout (Oncorhynchus mykiss), and Their Hybrids. *PLOS ONE*, *5*(9), e12881. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012881

Morgan, K. N., Tromborg, C. T. (2007). Sources of stress in captivity. *Applied Animal Behaviour Science*, *102*(3), 262-302. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2006.05.032

Noble C, Gismervik K, Iversen MH, Kolarevic J, Nilsson J, Stien LH & Turnbull JF (eds.) (2020) Welfare Indicators for farmed rainbow trout: tools for assessing fish welfare. Fishwell handbooks. Tromso, Norway: Nofima. https://nofima.no/en/fishwell/

Nordgreen, J., Janczak, A. M., Hovland, A. L., Ranheim, B., Horsberg, T. E. (2010). Trace classical conditioning in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss): What do they learn? *Animal Cognition*, *13*(2), 303-309. https://doi.org/10.1007/s10071-009-0267-3

OIE. (2021). Accès en ligne au code aquatique - OIE - Organisation Mondiale de la Santé Animale. 1017 https://www.oie.int/fr/ce-que-nous-faisons/normes/codes-et-manuels/acces-en-ligne-au-code-1018 aquatique/

Olden, J. D., Kennard, M. J., Leprieur, F., Tedesco, P. A., Winemiller, K. O., García-Berthou, E. (2010). Conservation biogeography of freshwater fishes : Recent progress and future challenges. *Diversity and Distributions*, *16*(3), 496-513. https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00655.x

Poisson, A., Valotaire, C., Borel, F., Bertin, A., Darmaillacq, A.-S., Dickel, L., Colson, V. (2017). Embryonic exposure to a conspecific alarm cue triggers behavioural plasticity in juvenile rainbow trout. *Animal Behaviour*, *133*, 35-45. https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2017.09.013

Quinn, T. P., Foote, C. J. (1994). The effects of body size and sexual dimorphism on the reproductive behaviour of sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*. *Animal Behaviour*, *48*(4), 751-761. https://doi.org/10.1006/anbe.1994.1300

Sneddon, L. U. (2003). The evidence for pain in fish : The use of morphine as an analgesic. *Applied Animal Behaviour Science*, *83*(2), 153-162. https://doi.org/10.1016/S0168-1591(03)00113-8

Sneddon, L. U. (2004). Evolution of nociception in vertebrates : Comparative analysis of lower vertebrates. *Brain Research Reviews*, *46*(2), 123-130. https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2004.07.007

Sneddon, L. U. (2009). Pain Perception in Fish : Indicators and Endpoints. *ILAR Journal*, *50*(4), 338-342. https://doi.org/10.1093/ilar.50.4.338

Spruijt, B. M., van den Bos, R., Pijlman, F. T. A. (2001). A concept of welfare based on reward evaluating mechanisms in the brain : Anticipatory behaviour as an indicator for the state of reward systems. *Applied Animal Behaviour Science*, *72*(2), 145-171. https://doi.org/10.1016/s0168-1591(00)00204-5

Stewart, W. J., Tian, F., Akanyeti, O., Walker, C. J., Liao, J. C. (2016). Refuging rainbow trout selectively exploit flows behind tandem cylinders. *Journal of Experimental Biology*, *219*(14), 2182-2191. https://doi.org/10.1242/jeb.140475

Pour citer cet article : Laurine Messager, Aude Kleiber, Violaine Colson, Ségolène Calvez, Vanessa Guesdon, *et al*.. AQUA BIEN-ÊTRE : Amélioration du bien-être des truites d'élevage : besoins, indicateurs spécifiques et effets des enrichissements. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.123-137. 10.17180/ciag-2025-vol107-art10

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

ACOR : Améliorer l'installation des punaises prédatrices dans la culture grâce aux plantes relais – exemple en tomate hors sol

Benjamin GARD[1], Amélie BARDEL[1], Laurent CAMOIN[2], Nicolas DESNEUX[3], Hervé FLOURY[4], Valérie Fontaine[2], Jérôme LAMBION[5], Anthony GINEZ[6], Caroline Baconnier[7], Olivier ROUDIL[7], Roselyne SOURIAU[8], Solène TREHIOU[1]

[1] CTIFL, Centre opérationnel de Balandran, 751 chemin de Balandran 30127 -Bellegarde, France

[2] Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône, 22, avenue Henri Pontier - 13626 AIX-EN-PROVENCE Cedex 1, France

[3] INRAe PACA, Institut Sophia Agrobiotech, Équipe Multitrophic Interactions & Biocontrol, 400 route des Chappes, BP 167, 06903 Sophia Antipolis Cedex, France

[4] Terre d'essais, Le Glazic 22740 Pleumeur Gautier, France

[5] GRAB, Région Sud Provence Alpes Côte d'Azur, BP 11283, 84911 Avignon Cedex, France

[6] APREL, Route de Mollégès, D31, 13210 St Rémy de Provence, France

[7] EPLEFPA Terre d'Horizon, 1414 chemin de Rosey Ouest, BP224 26105 Romans sur Isère cedex, France

[8] Savéol nature / Coopérative Maraîchère de l'Ouest, Kervao - 29490 GUIPAVAS, France

Correspondance : benjamin.gard@ctifl.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art11

Résumé

Ce projet vise à renforcer la lutte biologique contre les ravageurs en culture de tomates hors sol. Un système de plantes relais a été développé pour augmenter les populations de punaises prédatrices, *Macrolophus pygmaeus* et *Dicyphus errans*. Trois espèces ont été sélectionnées : *Calendula officinalis* et *Geranium macrorrhizum* pour *M. pygmaeus*, et *Erodium trifolium* pour *D. errans*. Les plantes relais permettent de multiplier par 3 les populations de punaises et d'assurer une colonisation plus rapide des cultures. La combinaison de ces plantes dans un même pot s'est révélée particulièrement efficace. Cette méthode permet également de limiter l'installation du ravageur *Nesidiocoris tenuis*. Cependant, la fécondité plus faible de *D. errans* nécessite une période d'élevage plus longue. Bien que prometteurs, ces résultats doivent être validés en conditions de production.

Mots-clés : Miridae, Dicyphinae, lutte biologique, combinaison, auxiliaires, serre

Abstract: Enhancing the introduction and spread of predatory bugs onto the crop using the banker plant system - example of soilless tomato cultivation

The aim of this project is to improve biological control of pests in soilless tomato crops by using an innovative system of banker plants. The aim is to increase populations of the beneficial predatory bugs *Macrolophus pygmaeus* and *Dicyphus errans*. Three banker plants have been selected: *Calendula officinalis* and *Geranium macrorrhizum* for *M. pygmaeus*, and *Erodium trifolium* for *D. errans*. The banker plants increase predatory bug populations by a factor of 3 and ensure faster crop colonisation. The combination of these plants in the same pot has proved particularly effective. This method has also proved effective in limiting the establishment of the pest *Nesidiocoris tenuis*. However, the lower fecundity of *D. errans* requires the system to be adapted, with a longer rearing period. Although promising, these results require further validation under real production conditions.

Keywords: Miridae, Dicyphinae, biological control, combination, natural enemies, greenhouse

1. Introduction

La lutte biologique augmentative repose sur l'introduction et l'établissement d'une population suffisante d'ennemis naturels pour contrôler les ravageurs ciblés au cours de la saison de culture. En production de tomates sous serre, cette approche est largement utilisée, avec comme principal auxiliaire la punaise prédatrice *Macrolophus pygmaeus* (Arnó *et al*., 2018). Cependant, en culture hors sol, les conditions abiotiques favorables et le développement rapide des ravageurs limitent l'efficacité des lâchers classiques. De plus, les producteurs font face à des impasses techniques. C'est le cas de *Nesidiocoris tenuis,* une punaise prédatrice dont le comportement phytophage peut causer des dommages significatifs aux cultures (Arnó *et al*., 2010 ; Castañé *et al*., 2011). Les solutions actuelles sont insuffisantes et entrainent des effets indésirables sur le principal auxiliaire utilisé : *M pygmaeus* (Gard *et al*., 2022). Ces contraintes nécessitent des approches innovantes pour améliorer l'installation préventive et la dispersion des auxiliaires. Le système des plantes relais offre une piste intéressante. Le mode d'action des plantes relais repose sur la fourniture pour l'auxiliaire d'un support à la reproduction et la ponte et d'une ressource nutritive pour le développement, permettant ainsi de conserver, et de développer les populations de l'auxiliaire (Huang *et al*., 2011 ; Djian-Caporalino, 2020). Bien que cette méthode ait démontré son efficacité en culture en sol, son adaptation aux systèmes hors sol reste peu explorée (Lambion, 2014).

L'introduction d'autres auxiliaires dans la stratégie de protection intégrée permet d'envisager de nouvelles combinaisons pour la gestion des ravageurs (Dainese *et al*., 2017). *Dicyphus errans* est une punaise prédatrice naturellement présente en culture de Solanacées mais non commercialisée par les firmes du biocontrôle. Pourtant, la combinaison des punaises prédatrices *M. pygmaeus et D. errans* offre un potentiel intéressant pour renforcer la lutte biologique en culture de tomates (Lucas *et al*omar, 2002). *Dicyphus errans* se distingue par une voracité élevée et une activité phytophage très limitée, ce qui en fait un complément stratégique à *M. pygmaeus* (Ingegno *et al*., 2017). La combinaison de ces deux espèces pourrait jouer un rôle dans la gestion de *N. tenuis* en limitant ses capacités à coloniser la culture.

Cet article décrit une approche innovante pour la culture de tomates hors sol, utilisant les plantes relais pour favoriser la multiplication et l'établissement précoce de deux auxiliaires *M. pygmaeus* et *D. errans*. Plusieurs espèces végétales ont été sélectionnées pour leur potentiel à soutenir le développement de ces auxiliaires, à partir d'une analyse bibliographique, complétée par des études au laboratoire et au champ. Les espèces retenues ont été évaluées en serre hors sol afin de caractériser leur potentiel d'utilisation. L'association de ces plantes a été testée, car des études suggèrent que des mélanges d'espèces végétales peuvent accroître l'efficacité des plantes relais (Chen *et al*., 2022). L'objectif est de comparer cette approche avec les lâchers classiques d'auxiliaires adultes, en vue de renforcer la lutte biologique contre les ravageurs des tomates en conditions hors sol.

2. Choix des plantes de service adaptées au système hors sol

Les plantes relais intéressantes pour favoriser la croissance de *M. pygmaeus* et de *D. errans* ont été sélectionnées avec une étude bibliographique. Le choix des espèces végétales a été discuté avec deux groupes de producteurs de tomates en système hors sol, lors d'ateliers de co-conception, animés dans les bassins Sud-Est et breton. Ce travail préliminaire a permis d'établir une liste d'espèces végétales à étudier en tant que plantes relais (Tableau 1). Les travaux de screening ont été conduits en laboratoire sur des plantes en pots et sous abris froid sur des ilots au sein de bandes fleuries, plantés au pied des bâches des tunnels.

2.1. Screening de plantes de service au laboratoire

Au laboratoire, 2 dispositifs ont été utilisés pour évaluer la fécondité, la longévité et le développement de *M. pygmaeus* et *D. errans* sur les plantes sélectionnées (Tableau 1). Pour le premier, la fécondité est étudiée sur un groupe de 10 femelles et 5 mâles de chaque punaise, maintenus sur la plante relais pendant une semaine. Les œufs pondus sont suivis jusqu'à l'apparition des premiers adultes, puis le total des individus est comptabilisé. Pour la longévité, la survie des adultes, déposés sur un disque de feuille de plante étudiée, et nourris avec des œufs d'*Ephestia kuehniella*, est observée quotidiennement. Pour le second dispositif, seul *M. pygmaeus* a été étudié. La fécondité est mesurée sur un groupe de 4 mâles et 6 femelles, maintenus sur la plante relais pendant 1 semaine. Le suivi se concentre sur le nombre de larves émergées sur les plantes pendant 4 semaines. Pour mesurer l'effet de plante relais sur le développement, 20 larves sont individualisées et placées sur un disque de feuille, nourries avec des œufs d'*E. kuehniella*. Le nombre de jours entre chaque stade larvaire est noté, puis les adultes émergés sont mesurés du vertex au bout de l'abdomen.

Tableau 2 : Liste des plantes de service testées en screening par le CTIFL, le GRAB et Savéol nature.

PLANTE DE SERVICE	NOM VERNACULAIRE	PUNAISE PREDATRICE CIBLE	CONDITIONS DE L'ESSAI
Ballota hirsuta	Ballotte hirsute	*M. pygmaeus*	Laboratoire
Calendula officinalis	Souci officinal	*M. pygmaeus*	Laboratoire et tunnel
Cucumis sativus	Concombre cv. Gynial	*M. pygmaeus, D. errans*	Laboratoire
Cucurbita pepo	Courgette cv. Anissa	*M. pygmaeus, D. errans*	Laboratoire
Erodium manescavii	Erodium de manescau	*D. errans*	Tunnel
Erodium trifolium	Erodium à feuilles trilobées	*D. errans*	Tunnel
Erodium x 'Stephanie' G	Erodium de Stéphanie	*D. errans*	Tunnel
Fragaria x ananassa	Fraise cv. San Andreas	*M. pygmaeus, D. errans*	Laboratoire
Geranium incanum x robustum	Géranium maculé	*D. errans*	Tunnel
Geranium macrorrhizum	Géranium à grosses racines	*M. pygmaeus, D. errans*	Laboratoire et tunnel
Geranium pyraenaicum	Géranium des Pyrénées	*D. errans*	Tunnel
Geranium robertianum	Géranium Herbe à Robert	*D. errans*	Tunnel
Geranium sylvaticum	Géranium des bois	*D. errans*	Tunnel
Geranium x cantabrigiense	Bec de grue	*D. errans*	Tunnel
Nicotiana tabacum	Tabac	*M. pygmaeus*	Laboratoire
Pelargonium endlichlerianum	-	*D. errans*	Tunnel
Pelargonium x fragrans	Géranium odorant	*D. errans*	Tunnel
Phaseolus vulgaris	haricot nain cv. Soliman	*M. pygmaeus, D. errans*	Laboratoire
Solanum lycopersicum	Tomate cv. Plaisance	*M. pygmaeus, D. errans*	Laboratoire
Verbascum thapsus	Bouillon blanc	*D. errans*	Laboratoire
Solanum melongena	Aubergine cv. Black Beauty Ovale	*M. pygmaeus, D. errans*	Laboratoire

Au total, 13 espèces végétales ont été étudiées. Quelle que soit la plante, la fécondité de *D. errans* est bien inférieure à celle de *M. pygmaeus* ce qui laisse supposer de moins bonnes capacités d'installation sur la culture de tomate (Figure 1). La fécondité de *M. pygmaeus* est significativement supérieure sur l'aubergine, le concombre, la courgette, la fraise, le géranium et le tabac en comparaison du haricot, de la molène, du souci et de la tomate. La tomate ne ressort pas comme un hôte préférentiel, cependant une mauvaise qualité des plantes utilisées peut expliquer ce résultat. Pour *D. errans*, la fécondité est significativement supérieure sur la courgette, le géranium, le tabac et la tomate comparée à l'aubergine, au concombre, à la fraise, au haricot, à la molène et au souci. Pour les deux espèces étudiées, le tabac et la courgette sont les espèces hôtes les plus favorables. Dans le second dispositif, le géranium ressort comme l'espèce la plus favorable pour la ponte (98,8 individus émergés), suivi de la tomate, du

souci et de la ballote hirsute avec respectivement 80,7 ; 72,2 et 65,5 individus émergés. La durée du cycle de développement est en moyenne égale à 15,3 j sur le souci, la tomate et le tabac, 17,3 j sur la ballote et 18 j sur le géranium.

Dans les différents essais, le géranium apparaît comme une espèce hôte favorable pour le développement de *M. pygmaeus*. En revanche pour d'autres espèces, des différences sont notables entre les essais, par exemple pour le tabac, la tomate et le souci. La qualité des plantes influe fortement sur le comportement et le développement des mirides. Lorsque les plantes sont abimées, le développement des auxiliaires est affecté. C'est le cas de la tomate et du souci attaqués par l'oïdium.

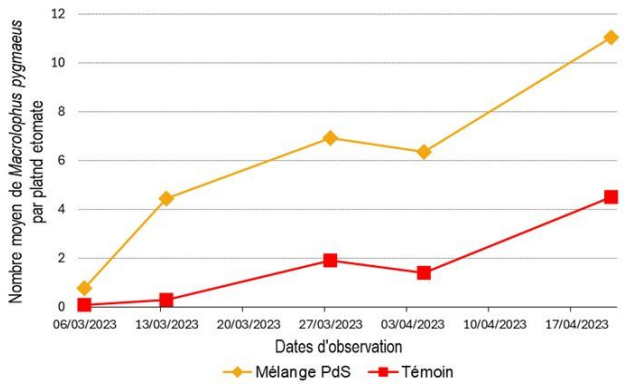


Figure 10 : Comparaison de la fécondité de *Macrolophus pygmaeus* et *Dicyphus errans* sur différentes plantes relais. Avec PH1 et PH2 : plante hôte protégée par les accords de confidentialité du projet. Les lettres indiquent l'appartenance à des groupes statistiques différents (test de comparaisons multiples). Les différences significatives suite au test de Wilcoxon-Mann-Whitney sont représentées par des astérisques, avec p <0,05 * ; p <0,01 ** ; p <0,001 *** (Essai Savéol 2021).

2.2. Screening de plantes relais au champ

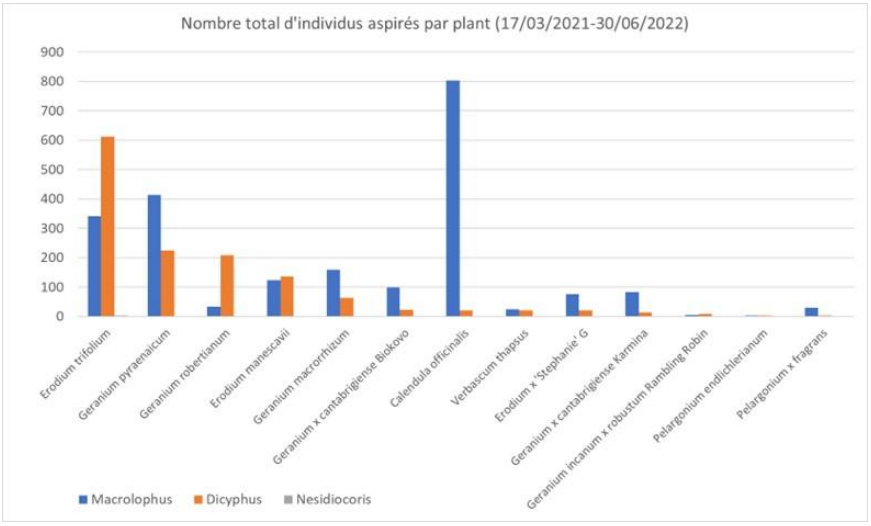


Figure 11 : Cumul du nombre d'individus (adultes et larves) sur les plantes banques étudiées pour chaque espèce de punaises, lors des expérimentations menées en 2021 et 2022 en tunnels plastiques non chauffés (essais GRAB).

Quatorze espèces ont été étudiées entre 2020 et 2022, implantées à l'intérieur de 2 tunnels plastiques, au pied des bâches. La plantation est réalisée le 15/10/2020, dans le paillage plastique. Chaque espèce testée est représentée par une parcelle de 2 m linéaire. Des aspirations mensuelles sur la zone centrale de la parcelle sont effectuées à l'aide d'un aspirateur mécanique pendant une minute (1 plant par parcelle élémentaire). Les insectes collectés sont identifiés et dénombrés en distinguant les adultes des larves.

Les résultats cumulés des comptages 2021 et 2022 confirment l'intérêt du souci comme plante relais pour l'installation de *M. pygmaeus* et de *E. trifolium* pour *D. errans* (Figure 2). *Erodium trifolium*, *E. manescavii* et *Geranium pyraenaicum* se révèlent intéressantes pour les deux espèces de punaises prédatrices avec un recensement d'une population supérieure à 100 individus par plant pour chacune. À noter que ces résultats comptabilisent larves et adultes, ce qui atteste d'une capacité des insectes à effectuer leur cycle complet sur ces plantes. De plus, aucun individu de *N. tenuis* n'a été observé sur les

plantes étudiées ce qui pourrait signifier que *N. tenuis* n'affectionne pas ces plantes, ou qu'une compétition existe avec les mirides auxiliaires, limitant ainsi son installation.

2. Evaluation du système plantes relais en culture hors sol

Plusieurs expérimentations ont été réalisées en stations expérimentales et chez des producteurs. Ces expérimentations ont permis de mettre au point et de tester le système plante relais pour la culture de tomate hors sol. Sept espèces végétales sélectionnées grâce au screening ont été évaluées : le souci officinal, la ballotte hirsute, le géranium à grosses racines, l'érodium à feuilles trilobées, l'aubergine, et le poivron. Ces plantes ont été évaluées seules ou associées ensemble dans le même pot, et avec *M. pygmaeus* ou *D. errans* ou les deux punaises ensemble, selon l'expérimentation (Tableau 2).

Tableau 3 : Description des plantes relais évaluées en serres hors sol sur la durée du projet ACOR (2020-2023).

PLANTE DE SERVICE	NOM VERNACULAIRE	PUNAISE PREDATRICE	LIEU DE L'ESSAI	ANNEES D'ESSAI	NOMBRE D'ESSAIS
Ballota hirsuta	Ballotte hirsute	*M. pygmaeus*	CTIFL, Terre d'Essais	2020, 2021, 2022	4
Calendula officinalis	Souci officinal	*M. pygmaeus*	CTIFL, Terre d'Essais, Terre d'Horizon	2021, 2022, 2023	4
Erodium manescavii	Erodium de manescau	*D. errans, M. pygmaeus*	CTIFL	2022	1
Erodium trifolium	Erodium à feuilles trilobées	*D. errans*	CTIFL, Terre d'Essais	2023	2
Geranium macrorrhizum	Géranium à grosses racines	*D. errans, M. pygmaeus*	CTIFL, Savéol nature, Terre d'Essais, Terre d'Horizon	2020, 2021, 2022, 2023	7
Capsicum annuum	Poivron	*M. pygmaeus*	Terre d'Essais	2020	1
Solanum lycopersicum	Tomate cv. Crazy Cherry	*M. pygmaeus*	Savéol nature	2023	1
Solanum melongena	Aubergine cv. Black Beauty Ovale	*M. pygmaeus*	Terre d'Essais	2020	1
DETAIL DES ASSOCIATIONS DE PLANTES DE SERVICE TESTEES					
Ballotte hirsute + Souci officinal + Géranium à grosses racines		*M. pygmaeus*	Terre d'Essais	2022	1
Ballotte hirsute + Erodium de manescau + Géranium à grosses racines		*D. errans, M. pygmaeus*	CTIFL	2022	1
Erodium à feuilles trilobées + Souci officinal + Géranium à grosses racines		*D. errans, M. pygmaeus*	CTIFL, Terre d'Essais, Terre d'Horizon	2023	3

Les plantes relais sont disposées sous un filet insect-proof dans un compartiment dédié de la serre ou une chambre climatique (Figure 3). L'introduction des punaises prédatrices (*M. pygmaeus* et *D. errans*) sur les plantes était réalisée 30 à 40 jours avant leur introduction dans la serre afin de favoriser leur développement (Sanchez J.A. *et al.*, 2021). Durant cette période dite de « pré-installation », un nourrissage des mirides était réalisé avec des œufs d'*E. kuehniella* sur les PdS (3 nourrissage sur la période) (Gard B. *et al.*, 2024). La densité d'introduction des mirides sur les PdS variait de 2 à 5 individus/m² en fonction de la zone d'essai (Bretagne et Sud-Est). La densité de pots introduits dans la serre est de 2,5 pots/mètre linéaire. Ainsi, le nombre de pots et le nombre de mirides introduits par pot étaient calculés en fonction de la surface de serre à couvrir.

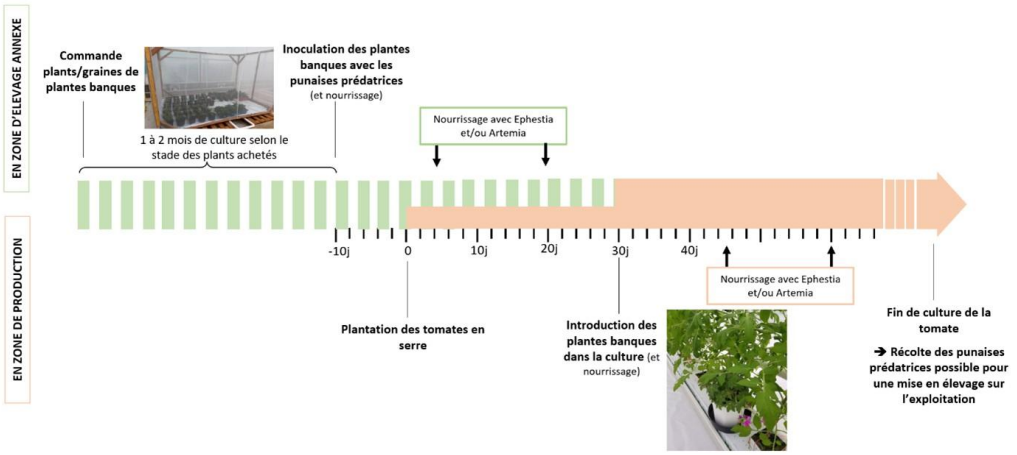


Figure 12 : Schéma de mise en place du système plante relais utilisé pour l'élevage et l'introduction des punaises prédatrices *Macrolophus pygmaeus* et *Dicyphus errans*, en culture de tomate hors sol.

3.1. Mise au point du système plante banque

La croissance de la population de punaises prédatrices sur les plantes relais était évaluée une fois, à la fin de la période de pré-installation. Ensuite, les plantes étaient réparties de manière homogène dans chaque rangée de culture, en fonction de la surface à protéger. Le même jour, des lâchers classiques de *M. pygmaeus* étaient effectués sur les rangs de contrôle sans plante relais (témoin) afin d'imiter la stratégie de lutte biologique augmentative utilisée dans les serres professionnelles (2 à 5 ind./m²).

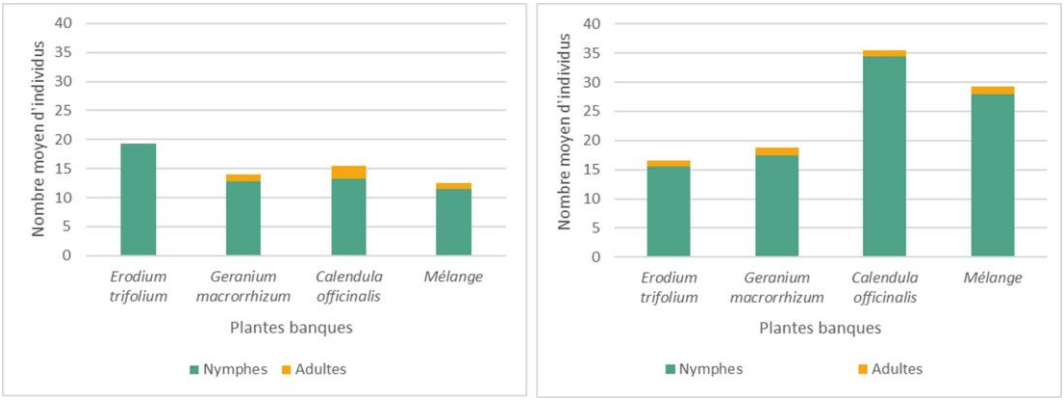


Figure 13 : Nombre de punaises prédatrices sur les plantes relais à l'issue de la période de pré-insallation, avec A : *Dicyphus errans* et B : *Macrolophus pygmaeus* (adultes en orange et nymphes en vert). La ligne en pointillés bleus représente le nombre d'adultes introduits au départ sur les plantes relais. Les lettres indiquent les groupes statistiques significativement différents au seuil de 5 % (Tukey HSD) avec NS = non significatif. (Essai CTIFL 2023)

Les échantillonnages réalisés sur les plantes relais montrent que la phase de pré-installation, d'une durée de 30 à 40 jours, permet de multiplier par 2 voire par 3 les effectifs de *M. pygmaeus* en fonction de la plante relais étudiée (Figure 4). En revanche, cette période semble trop courte pour permettre un développement de la population de *D. errans*. Ce résultat peut s'expliquer par un taux de fécondité beaucoup plus faible de *D. errans* par rapport à *M. pygmaeus*, et cela quelle que soit la plante hôte étudiée (Figure 1) (Poss B., 2021). Le souci et le géranium à grosses racines apparaissent comme les plus favorables pour héberger *M. pygmaeus*. En outre, il semble que lorsque différentes plantes relais sont associées, la qualité du refuge est meilleure et l'accroissement de la population plus important, mais ce résultat n'est pas constant entre toutes les expérimentations. La combinaison des plantes relais peut toutefois limiter le risque de perte de plante lors de problème sanitaire. Cela est d'autant plus

important lorsqu'elles sont produites en pot. C'est le cas pour le souci qui ressort comme un excellent support pour le développement de *M. pygmaeus* mais qui est fortement sensible à l'oïdium et peut dépérir rapidement.

3.2. Evaluation en conditions semi-contrôlées

Entre 2020 et 2023, 5 expérimentations ont été réalisées : 3 au CTIFL et 2 à Terre d'Essais, en culture de tomate hors sol afin de tester l'effet du système pante relais sur l'installation des mirides dans la culture et le contrôle des ravageurs. Les résultats présentés ici se focalisent sur le souci officinal et le géranium à grosses racines car ce sont les espèces végétales les plus intéressantes, du point de vue du développement de la population de *M. pygmaeus* et de leur intégration dans le système hors sol.

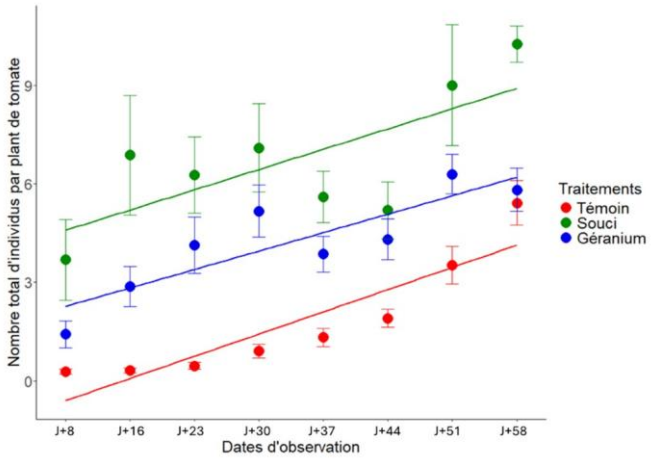


Figure 14 : Évolution du nombre de *Macrolophus pygmaeus* (adultes et nymphes), après introduction sur la culture de tomate, soit par le système plante banque (souci officinal en vert et géranium à grosses racines en bleu), soit par lâcher classique d'adultes (Témoin en rouge). Synthèse des essais CTIFL 2020-2023. Les droites représentent la régression linéaire pour chaque modalité. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

L'introduction de *M. pygmaeus* grâce au système plante relais aboutit, dès les premières semaines, à une population plus importante sur les plants de tomate en comparaison du lâcher classique d'adultes, ce qui améliore significativement la colonisation de la culture (Figure 5). L'effet est plus marqué avec le souci en comparaison du géranium à grosses racines. On constate que plus la population initiale est élevée, plus le transfert sur la culture est effectif et la population d'auxiliaires importante. Les plantes relais, une fois transférées dans la serre, n'étaient plus irriguées afin de favoriser le transfert des auxiliaires vers la culture. En ce qui concerne le contrôle des aleurodes, les résultats obtenus montrent que le système plante relais aboutit à un niveau de contrôle du ravageur au moins équivalent, voire supérieur, aux lâchers classiques (Figure 6).

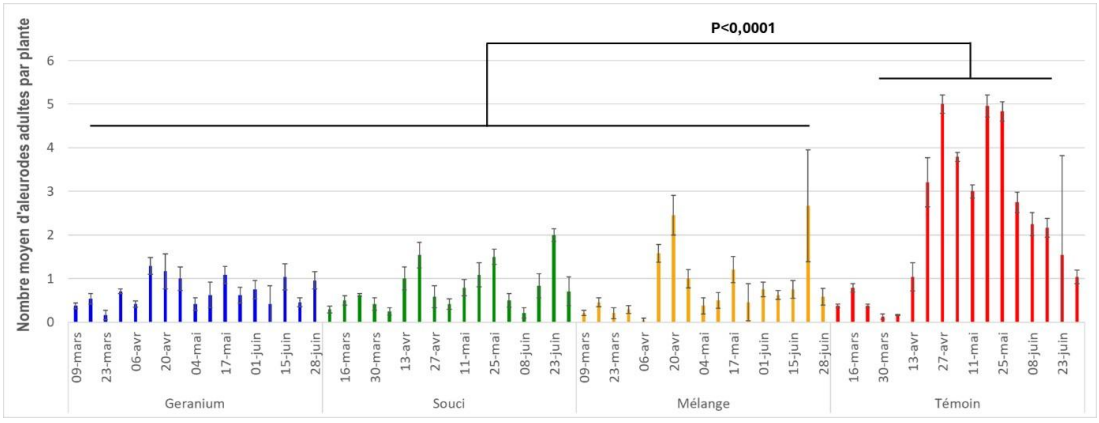


Figure 15 : Évolution du nombre d'aleurodes adultes sur la culture de tomate en fonction du mode d'introduction de la punaise prédatrice *Macrolophus pygmaeus,* à l'aide du système plante banque (avec en bleu géranium à grosses racines, en vert souci officinal, en orange le mélange souci, géranium, érodium) ou par lâcher classique d'adultes (Témoin en rouge) (Essai CTIFL 2023).

Les résultats obtenus confirment que le souci est une plante hôte appropriée pour promouvoir la croissance de la population de *M. pygmaeus*. Toutefois, il est indispensable que les plantes relais utilisées soient adaptées aux conditions de la culture (température, lumière), qu'elles ne soient pas sensibles aux mêmes ravageurs. Le géranium, bien qu'il ne ressorte pas comme le meilleur refuge, répond bien à ces critères. Cette espèce est bien adaptée à l'ombre portée de la culture, et sa morphologie en forme de boule, sa bonne résistance à la manipulation rendent son utilisation commode pour le développement sous les plants de tomate, en serre. Dans les différents essais réalisés, nous n'avons observé aucun ravageur ou maladie de la tomate se développant sur ce géranium.

3.3. Evaluation en conditions proches de la pratique

En 2023, des essais en condition proche de la pratique agricole ont été réalisées par plusieurs partenaires, en serre verre hors sol. Ces essais capitalisent sur les résultats obtenus précédemment, et les meilleures stratégies sont testées avec des protocoles communs entre les partenaires. Deux partenaires ont testé l'association des plantes relais comparée à un lâcher classique de *M. pygmaeus* directement sur la culture. Sur le site de terre d'Essais, 3 espèces étaient associées : érodium à feuilles trilobées, géranium à grosses racines et souci officinal. Sur le site du lycée agricole Terre d'Horizon, deux espèces étaient associées car l'érodium n'était pas disponible. Les résultats obtenus sur les deux sites montrent une meilleure installation de *M. pygmaeus* en début de culture grâce au système de plante banque et donc une meilleure protection en début de culture, un avantage par rapport à la méthode classique de lâcher (Figure 7).

Cependant, dans un autre essai réalisé chez deux producteurs de tomate hors sol, les résultats obtenus sont mitigés. Les modalités utilisant les plantes relais, avec la tomate (cv Crazy Cherry) et le géranium à grosses racines, montrent une abondance et une dispersion de *M. pygmaeus* plus faibles que le témoin avec lâcher classique. Néanmoins, les populations des différentes modalités atteignent le pic de deuxième génération au même moment (Duwer, 2023). On peut supposer que les étapes d'arrosage et de déplacement des pots dans les rangées ont pu gêner, voire induire de la surmortalité chez *M. pygmaeus*. De même, on peut supposer que les plants n'étaient pas assez développés pour favoriser une fécondité maximale de *M. pygmaeus*: Il aurait été préférable de commencer les semis plus tôt pour bénéficier d'une période de pré-installation suffisamment longue. C'est une des principales différences entre cet essai et ceux conduits par les autres partenaires.

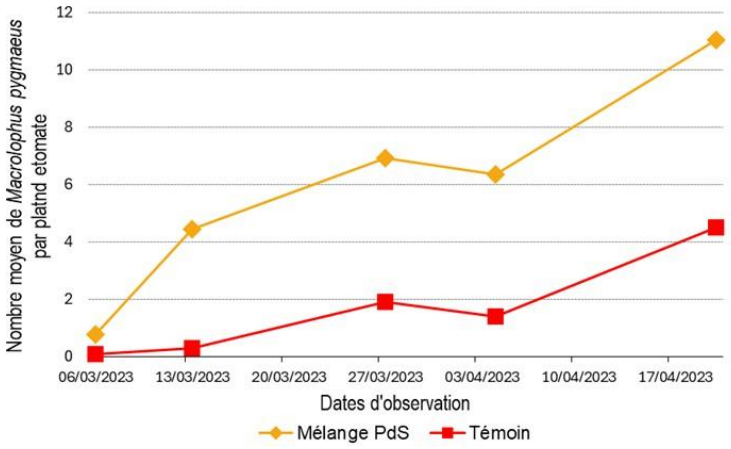


Figure 16 : Évolution du nombre de *Macrolophus pygmaeus* par plant de tomate en fonction de la modalité de lâcher, avec le système plante banque (en orange mélange de souci officinal, géranium à grosses racines et érodium à feuilles trilobées) et par lâcher classique (en rouge).

4. Discussion & Conclusion

Dans cette étude, nous avons évalué l'efficacité du système plantes relais pour améliorer l'établissement des punaises prédatrices et favoriser une gestion durable des ravageurs dans les cultures de tomate hors sol. Nos résultats corroborent les travaux antérieurs qui soulignent l'intérêt de cette approche pour promouvoir le développement des ennemis naturels (Huang *et al*., 2011 ; Sanchez *et al*., 2021).

4.1. Évaluation des plantes relais

Le choix de l'espèce végétale pour les plantes relais est un facteur critique pour la réussite du système. Parmi les espèces testées, le souci officinal et le géranium à grosses racines apparaissent comme les plus intéressantes pour développer le système plantes banques pour *M. pygmaeus*. L'érodium à feuilles trilobées est l'espèce la plus intéressante pour soutenir le développement de *D. errans.* Toutefois, pour que le système soit fonctionnel pour *D. errans*, il semble nécessaire de prolonger la durée de la phase de pré-installation pour permettre un meilleur développement sur la plante relais. Enfin, l'association des espèces végétales au sein d'un même pot semble plus efficace que les espèces pures. Cependant, les résultats ne sont pas constants à travers l'ensemble des essais réalisés. Parmi les trois espèces sélectionnées, le souci et le géranium sont très faciles à se procurer ce qui facilite leur utilisation. Ce n'est pas le cas pour l'érodium à feuilles trifoliées. La difficulté d'approvisionnement est un frein majeur pour la réussite de cette méthode et sa diffusion plus large auprès des professionnels.

4.2. La méthode plante relais : efficacité et coût

L'utilisation du système plante relais permet une augmentation significative de la population de *M. pygmaeus* grâce à la période de pré-installation de 30 à 40 jours qui aboutit à une colonisation plus importante de la culture de tomate, et des effectifs jusqu'à 2 fois plus élevés par plante. Cette phase est indispensable à la réussite de la méthode (Sanchez *et al*., 2021), et les échecs observés au cours du projet semblent en partie liés à des difficultés lors de cette étape. Cette méthode nécessite donc une forte anticipation afin de disposer des plantes relais et des insectes plus d'un mois avant la plantation de la culture pour mettre en place le système et qu'il soit opérationnel peu après la plantation. Il n'a pas été possible de chiffrer précisément le coût de cette méthode au cours du projet. Une étude technico-économique est maintenant nécessaire pour évaluer la faisabilité économique de cette méthode et pouvoir la situer par rapport aux méthodes de lâchers classiques. A ce stade, il n'y a pas forcément d'économie sur l'achat des auxiliaires car la dose introduite sur les plantes de service est équivalente à celle lâchée par les producteurs mais on peut se projeter sur une économie indirecte liée à la réduction des traitements annexes grâce à une lutte biologique plus efficace.

4.3. L'association des auxiliaires pour une lutte biologique plus efficace

Les travaux réalisés en conditions contrôlées ont permis de valider l'intérêt de la combinaison des punaises *M. pygmaeus* et *D. errans* pour améliorer le contrôle des ravageurs (Konan *et al*., 2023). Lorsque *D. errans* est présent dans le système, associé à *M. pygmaeus* et *N. tenuis*, les populations des deux ravageurs *Tuta absoluta* et *Bemisia tabaci* sont significativement plus faibles et les dégâts réduits. De plus, lorsque *D. errans* est associé à *M. pygmaeus*, la croissance de la population de *N. tenuis* est réduite ce qui est corrélée à une baisse des dégâts. L'association de *M. pygmaeus* et *D. errans* peut donc aboutir à un meilleur contrôle des différents ravageurs et une réduction des dégâts liés à l'action phytophage de *N. tenuis*.

Les travaux réalisés sur l'effet de la réduction de la fertilisation montrent qu'une baisse de la fertilisation azotée réduit l'impact des ravageurs sur la culture de tomate (dans ce cas *B. tabaci* et *T. absoluta*) et contribue à accroître le contrôle exercé par les auxiliaires sur ces ravageurs (Konan *et al*., 2024). Cette

étude vient également confirmer l'intérêt d'associer *M. pygmaeus* et *D. errans* pour le contrôle des ravageurs de la tomate. Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer les leviers de protection phytosanitaire avec les leviers agronomiques pour accroître l'efficacité des stratégies de protection biologique intégrée. Dans le projet ACOR, d'autres facteurs ont été étudiés tels que la température, le nourrissage des auxiliaires, l'injection de CO_2 dans la serre, la date de lâché, l'effeuillage, la typologie variétale cultivée. Parmi ces facteurs, le contrôle des températures de jour et de nuit, le nourrissage, le raisonnement de l'effeuillage sont des pratiques culturales qui permettent d'améliorer l'installation de l'auxiliaire *M. pygmaeus* dans la culture (Gard *et al*., 2024 ; Duwer, 2023).

4.4. Limites et perspectives

Les résultats obtenus avec le système plantes relais sont encourageants mais doivent être consolidés avant de pouvoir envisager un transfert vers les professionnels en culture hors sol et un déploiement à grande échelle. Tout d'abord, le contexte sanitaire à risque en culture hors sol, notamment à cause des virus et en particulier du TOBRFV, complexifie l'acceptation de ce type d'essai et de méthode par les producteurs. De fait, certains essais n'ont pas pu être mis en place chez des producteurs comme cela avait été envisagé au départ du projet. La crainte d'introduire un ravageur ou un pathogène avec les plantes relais est un frein. De plus, il reste des contraintes logistiques à lever, comme l'approvisionnement en plants pour les plantes relais, et l'organisation sur l'exploitation pour stocker ces plantes et aménager l'espace nécessaire pour la réalisation de la période de pré-installation. Enfin, il est important de poursuivre le travail d'expérimentation afin d'optimiser la densité de plantes relais/ha de serre, mesurer la dispersion inter-rang, essayer de proposer une méthode de récupération des punaises auxiliaires en fin de culture et d'élevage sur l'exploitation pour réduire les couts de la méthode.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Nicolas DESNEUX : https://orcid.org/0000-0002-8171-3154 /

Benjamin GARD : https://orcid.org/0000-0003-3541-250X /

Jérôme LAMBION : https://orcid.org/0000-0002-9605-856X

Contributions des auteurs

Conception : Benjamin Gard, Laurent Camoin, Nicolas Desneux, Hervé Floury, Jérôme Lambion, Anthony Ginez, Roselyne Souriau

Méthodologie et réalisation de la recherche : Benjamin Gard, Amélie Bardel, Caroline Baconnier, Laurent Camoin, Nicolas Desneux, Hervé Floury, Jérôme Lambion, Anthony Ginez, Olivier Roudil, Roselyne Souriau, Solène Trehiou

Analyse des données : Benjamin Gard, Caroline Baconnier, Laurent Camoin, Nicolas Desneux, Hervé Floury, Jérôme Lambion, Anthony Ginez, Roselyne Souriau, Solène Trehiou

Acquisition du financement et administration du projet : Benjamin Gard

Rédaction du manuscrit original : Benjamin Gard

Rédaction – examen et révision : Benjamin Gard, Nicolas Desneux, Hervé Floury, Valérie Fontaine, Jérôme Lambio , Anthony Ginez, Olivier Roudil, Roselyne Souriau

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des étudiants et étudiantes qui ont participé à la réalisation de ce projet ainsi que les personnels techniques pour leur appui dans la réalisation des expérimentations.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été financée par le Compte d'Affectation Spécial Développement Agricole et Rural dans le cadre du projet ACOR (N°5911) et par l'Interprofession de la filière des fruits et légumes frais.

Références bibliographiques

Arnó J., Castañé C., Alomar O., Riudavets J., Agustí N., Gabarra R., Albajes R., 2018. Forty years of biological control in Mediterranean tomato greenhouses: The story of success. Israel Journal of entomology, 48 (2), 209-226.

Arnó J., Castañé C., Riudavets J., Gabarra R., 2010. Risk of damage to tomato crops by the generalist zoophytophagous predator *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) (Hemiptera: Miridae). Bulletin of Entomological Research, 100 (1), 105-115.

Castañé C., Arnó J., Gabarra R., Alomar O., 2011. Plant damage to vegetable crops by zoophytophagous mirid predators. Biological Control, 59 (1), 22-29.

Chen X., Jaworski C.C., Dai H., Liang Y., Guo X., Wang S., Zang L.-S., Desneux N., 2022. Combining banker plants to achieve long-term pest control in multi-pest and multi-natural enemy cropping systems. Journal of Pest Science, 95 (2), 685-697.

Dainese M., Schneider G., Krauss J., Steffan-Dewenter I., 2017. Complementarity among natural enemies enhances pest suppression. Scientific Reports, 7 (1), 8172.

Djian-Caporalino C. 2020. Agrosystèmes légumiers: les plantes de service contre les bioagresseurs. INFOS CTIFL Hors-série.

Duwer A., 2023. Définition et optimisation des facteurs impliqués dans la qualité de l'implantation de la punaise prédatrice Macrolophus pygmaeus en serres de production de tomate en Bretagne. Thèse de Master 2, UniLaSalle, Beauvais, France

Gard B., Baconnier C., Bardel A., Camoin L., Floury H., Ginez A., Lambion J., Desneux N., Roudil O., Souriau R., Tosello L., Trehiou S., 2024. Système de plantes banques - élevage et introduction des punaises prédatrices en culture de tomate hors-sol. POINT SUR, (13), 1-10

Gard B., Bout A., Chaillout S., Camoin L., Canal X., Cesari L., Clerc H., Delamarre C., Ginez A., Lambion J., Genson G., Streito J.C., Tosello L., Verfaille T., Pierre P., 2022. IMPULsE - développement et Intégration de Méthodes innovantes pour la maîtrise des PUnaises en cultures LEgumières. *Innovations Agronomiques*, 85, 199-212.

Huang N., Enkegaard A., Osborne L.S., Ramakers P.M.J., Messelink G.J., Pijnakker J., Murphy G., 2011. The banker plant method in biological control. Critical Reviews in Plant Sciences, 30 (3), 259-278.

Ingegno B.L., Bodino N., Leman A., Messelink G.J., Tavella L., 2017. Predatory efficacy of *Dicyphus errans* on different prey. Acta Horticulturae, (1164), 425-430.

Konan K.A., Jaworski C.C., Boll R., Desneux A., Ouali-N'Goran S.-W.M., Martin T., Gard B., Souriau R., Lavoir A.-V., Desneux N., 2024. Benefits of intraguild interactions between zoophytophagous predators and of bottom-up effects of fertilisation for sustainable management of tomato pests. Entomologia Generalis, 44, 347-355

Konan K.A.J., Jaworski C.C., Monticelli L.S., Zuma M., Boll R., Kouadio M.-F.N., Martin T., Gard B., Souriau R., Lavoir A.-V., Desneux N., 2023. Combined use of zoophytophagous mirids for sustainable biological protection of greenhouse tomato crops. CABI Agriculture and Bioscience, 4 (1), 28.

Lambion J., 2014. Flower strips as winter shelters for predatory miridae bugs. Acta Horticulturae, (1041), 149-156.

Lucas É., Alomar O., 2002. Impact of the presence of *Dicyphus tamaninii* Wagner (Heteroptera: Miridae) on whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) predation by *Macrolophus caliginosus* (Wagner) (Heteroptera: Miridae). Biological Contro*l*, 25 (2), 123-128.

Poss B., 2021. Caractérisation des traits de vie de la punaise prédatrice Dicyphus errans et comportement en serres de production de tomate en Bretagne. Thèse de Master 2. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, France.

Sanchez J.A., López-Gallego E., Pérez-Marcos M., Perera-Fernández L., 2021. The effect of banker plants and pre-plant release on the establishment and pest control of *Macrolophus pygmaeus* in tomato greenhouses. Journal of Pest Science, 94 (2), 297-307.

Pour citer cet article : Benjamin Gard, Amélie Bardel, Laurent Camoin, Nicolas Desneux, Hervé Floury, *et al*.. ACOR : Améliorer l'installation des punaises prédatrices dans la culture grâce aux plantes relais -exemple en tomate hors sol. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.138-149. 10.17180/ciag-2025-vol107-art11

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Conserver les auxiliaires de culture avec « le gîte et le couvert »

Ange LHOSTE-DROUINEAU[1], Marie-Anne JOUSSEMET[2], Marine LITZLER[2], Benjamin GARD[3], Jérôme LAMBION[4], Nicolas DESNEUX[5]

[1] ASTREDHOR Méditerranée, 727 avenue Alfred Décugis, 83400 Hyères, France

[2] Planète Légumes, Fleurs et Plantes, 28 rue du Chêne, 88700 Roville-aux-Chênes, France

[3] CTIFL, Centre de Balandran, 751 Chemin de Balandran, 30127 Bellegarde, France

[4] GRAB, chemin Castelette, 84140 Montfavet, France

[5] INRAE, UMR-ISA, 400 route des Chappes, BP 167, 06903 Sophia Antipolis, France

Correspondance : ange.drouineau@astredhor.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art12

Résumé

La protection biologique intégrée des cultures, réalisée par des lâchers d'auxiliaires, pourrait être optimisée en termes d'efficace et de rentable si ces auxiliaires pouvaient se maintenir durablement dans la culture. À cette fin, le projet Hab'Alim vise à identifier des habitats fournissant des sources d'alimentation et des abris pour la faune auxiliaire des cultures en serre et en plein air. L'intérêt d'apport de pollens, d'utilisation de plantes de service, de matériaux naturels en tant qu'aliment et habitat, a été étudié tant sur les populations d'utiles que de nuisibles. Dans des conditions d'essais et de tests de laboratoire, des résultats encourageants ont été obtenus avec les matériaux issus du chanvre, des cosses de sarrasin, du miscanthus et la laine de brebis ; des plantes de service *Inula helenium, Lobularia maritima, Sorbaria sorbifolia* et *Viburnum tinus* ainsi que du pollen de *Typha angustifolia* et des acariens proies *Thyreophagus entomophagus.*

Mots-clés : auxiliaire, habitat, alimentation, horticulture, maraîchage

Abstract: Hab'Alim, shelters and food sources for the beneficials of greenhouse and outdoor crops.

In IPM packages, efficiency of biological control is strongly dependent on the capacity of natural enemies to sustain in crops, whether these natural enemies have been released or promoted (through conservation methods) in the crops. To this purpose, the Hab'Alim project aims to identify and develop habitats providing feeding sources and shelters for the predators and the parasitoids of several greenhouse and outdoor crop pests. The possibility of using natural materials, supplying pollen, using companion plants, as well as foods supplements are studied both for their effects on pests and beneficial arthropod populations. Under laboratory and trials conditions, very encouraging results were obtained with materials studied as hemp as well as buckwheat husks, miscanthus and shetland wool, with pollens of *Inula helenium*, *Lobularia maritima, Sorbaria sorbifolia, Typha angustifolia* and *Viburnum tinus,* as well as prey mite *Thyreophagus entomophagus*.

Keywords: beneficial, shelter, food, horticulture, market gardening

1. Introduction

30 000 exploitations horticoles et maraîchères, soit 115 000 emplois permanents, sont directement concernées par la limitation des risques liés aux applications de pesticides (Val'Hor, 2024). Depuis

plusieurs décennies, l'alternative est la protection biologique intégrée (PBI). Or, la PBI ne peut être efficace et rentable que si les auxiliaires de culture se maintiennent durablement dans les parcelles de production végétales.

Ces éléments de contexte ont conduit à la mise en place du projet Hab'Alim. Ce projet a pour objectif d'apporter les moyens et les méthodes de protection des cultures pour **sécuriser la lutte biologique contre** le thrips californien, les pucerons et les tétranyques, tout en **assurant la viabilité économique** des exploitations horticoles et maraichères.

Sous un angle opérationnel, le projet vise à développer des stratégies innovantes pour « offrir le gîte et le couvert » aux auxiliaires de culture. Pour cela, les partenaires du projet ont défini les actions suivantes :

- caractériser la **capacité de plantes ou de matériaux naturels à fournir un hébergement** de qualité aux auxiliaires ;
- évaluer **l'effet de compléments alimentaires** (sources exogènes et plantes de services) **sur la capacité de contrôle** des principaux ravageurs **par les auxiliaires** pour deux types de production sous abri : la production horticole (roses fleurs coupées et rosiers paysagers en conteneur) et la production maraichère sous abri (aubergine et fraise) ;
- valider **la combinaison pertinente des solutions d'habitat et d'alimentation dans des stratégies de protection** *(à noter que ce type de combinaisons de leviers est novatrice dans une stratégie de protection des plantes) ;*
- et assurer un **transfert** vers les différents acteurs des filières concernées.

Le projet répond aux objectifs du plan Ecophyto II, notamment sur la **réduction du nombre de produits phytosanitaires** homologués et le **respect** de l'**environnement** et de la **santé**, Hab'Alim a été conduit dans un réseau de quatre stations d'expérimentation d'instituts techniques et d'un laboratoire de recherche de l'INRAE répartis entre le Nord-Est et le Sud-Est de la France. Il associe la recherche fondamentale sur l'écologie inféodée aux agro-systèmes et à la recherche appliquée en horticulture et maraîchage. Le présent article rapporte les expertises de :

- ASTREDHOR Méditerranée à Hyères (Var) sur la lutte biologique contre le thrips californien et les pucerons de la rose fleur coupée ;
- Planète Légumes, Fleurs et Plantes à Roville-aux-Chênes (Vosges) sur la lutte biologique contre les pucerons des rosiers de jardin ;
- Grab à Châteaurenard (Bouches-du-Rhône) sur la protection biologique de l'aubergine ;
- CTIFL site de Balandran (Gard) sur la lutte biologique contre le thrips californien de fraisiers hors-sol ;
- l'INRAE à Sophia Antipolis (Alpes Maritimes) sur les caractérisations de plantes de services et de matériaux biologiques.

2. Les leviers étudiés pour sécuriser la lutte biologique

Dix leviers habitats et ressources alimentaires ont été caractérisés indépendamment au laboratoire et évalués sur les quatre sites d'essais.

2.1. Des habitats issus de matériaux naturels

Quatre matériaux naturels sont l'objet de tests de caractérisation en laboratoire et d'évaluations dans les essais : laine de brebis, les cosses de sarrasin *Fagopyrum esculentum,* les fibres de chanvre *Cannabis sativa*, les fibres de miscanthus *Miscanthus miscanthus.*

De même, quatre plantes types habitat ont été testées : le laurier-tin ou viorne-tin *Viburnum tinus,* grande aunée ou inule aunée *Inula helenium,* alysse maritime ou corbeille d'argent *Lobularia maritima, et le sorbaire à feuille de sorbier Sorbaria sorbifolia.*

2.2. Des compléments alimentaires exogènes

Un complément alimentaire d'origine animale a été testé : l'acarien des denrées Thyreophagus entomophagus, d'appellation commerciale Mitefood® (utilisé comme proie pour les acariens prédateurs).

Ainsi que quatre pollens : le pollen de massette ou typha Typha angustifolia, commercialisé sous le nom de Nutrimite®, le pollen de laurier-tin V. tinus, le pollen de sorbaire à feuilles de sorbier ou fausse spirée Sorbaria sorbifolia, et le pollen d'alysse maritime L. maritima.

Dans un premier temps, les travaux visaient à améliorer l'installation des auxiliaires dans les cultures par le nourrissage ou l'habitat indépendamment l'un de l'autre. Pour cela, deux actions ont été conduites simultanément sur les sites d'expérimentation, l'une consistant à comparer des habitats à un témoin sans habitat, et l'autre à comparer des sources alimentaires à un témoin sans nourrissage.

L'impact était évalué sur les populations d'auxiliaires, de ravageurs et la qualité des récoltes. Parmi les leviers étudiés, ceux qui se révèlent favorables aux auxiliaires sont sélectionnés pour combiner à la fois un habitat et une ressource alimentaire par agrosystème.

3. Agrosystèmes étudiés

3.1. La rose fleur coupée

3.1.1. Le contexte de production

Le pilotage de la stratégie de protection de la rose est essentiellement guidé par le contrôle du thrips californien. Son seuil de nuisibilité ne doit pas dépasser 1 % de bouton avec un individu pour qu'une exploitation soit économiquement viable. De fait, nous avons choisi une stratégie préventive de long terme qui se compose d'un agencement des méthodes que sont : mesures prophylactiques (retrait des boutons de la strate poumon, désherbage), pratiques culturales, lutte biologique et en dernier recours la lutte chimique. La stratégie donne la priorité aux agents de contrôle que sont : substances de biocontrôle, macroorganismes et microorganismes.

3.1.2. La conception du système

Les essais sur roses fleurs coupées ont été mis en place dans une unité de serre verre mitoyenne d'une collection variétale de roses, et conduits dans des conditions de production afin que les résultats soient directement applicables dans les exploitations.

Sous la chapelle de 150 m², la plantation a eu lieu mi-mars 2020 dans des bacs de perlite en double rang à la densité de 10 plants par mètre de table de culture. Le choix du matériel végétal s'est porté sur des jeunes plants greffés à *Indica major* et deux variétés conseillées par les rosiéristes pour la qualité des tiges florales : Aziza ! et Cherry Avalanche+.

3.2. Le rosier paysager

3.2.1. Le contexte de production du rosier paysager

La commercialisation des plants de pépinière est dépendante de la qualité esthétique du plant (son port, sa taille) et de la qualité sanitaire. En effet, la présence de ravageurs, principalement des pucerons, va déclasser le végétal, voire le rendre impropre à la commercialisation.

3.2.2. La conception du système

Les essais ont été mis en place sous tunnel plastique au printemps (mars à mai) puis déplacés sur une plateforme extérieure jusqu'en septembre. Pour les besoins de l'essai, seules les variétés *Rosa* x *floribunda* 'Korselary' et *Rosa x polyantha* 'The Fairy' sont sélectionnées après la première année pour leurs caractéristiques sur la période de floraison et leur sensibilité des pucerons similaires.

Le dispositif est construit de façon à tester l'effet de la distance des plantes de service sur la présence des auxiliaires dans la culture. Le bitunnel sous lequel est disposé la culture au printemps est une structure de 500 m² non-chauffée. Les rosiers paysagers sont conduits en conteneur, distancés, avec une irrigation en goutte-à-goutte. Le paillage est mis en place lors de l'empotage.

3.3. Le fraisier en hors-sol

3.3.1. Le contexte de production

Le moindre défaut sur les fraises les rend non commercialisables. La position des populations de thrips au cœur des boutons floraux limite l'efficacité des produits phytosanitaires conventionnels ou de biocontrôle. Les acariens prédateurs utilisés pour lutter contre le thrips sont des acariens prédateurs généralistes nécessitant des conditions d'hygrométrie autour de 70% d'humidité relative (HR). Ces conditions ne sont pas toujours présentes en culture de fraise surtout sous abris, impactant fortement les capacités d'installation ou de survie des populations d'acariens prédateurs lâchées sur la culture. Il est alors important de trouver des leviers permettant le maintien des populations.

3.3.2. La conception du système

Deux essais ont été mis en place sur deux années consécutives 2021 et 2022 en tunnels froids hors sol sur le centre de Balandran. La culture a été conduite de manière à se rapprocher au plus de la méthode de production classique. Les plants de fraisier ont été plantés dans des pains de substrat composés d'un mélange de tourbe et d'écorces de pin et les récoltes ont été réalisées deux fois par semaine.

En 2021, l'essai a été mis en place dans un tunnel plastique double paroi le 29/04/21. Il a été réalisé en parallèle d'un essai variétal sur fraisier dans le tunnel. Le dispositif expérimental du projet Hab'Alim a donc été placé sur les bordures de l'essai variétal et conduit sur les variétés 'Cléry' et 'Dream'. La culture a été plantée en semaine 49 (2020) et était déjà bien avancée au début de l'essai. Plusieurs ravageurs étaient présents : pucerons, aleurodes et thrips dans une moindre mesure.

En 2022, l'essai a été mis en place dans deux tunnels plastiques simple paroi. Le choix variétal s'est porté sur le cultivar Amandine en raison de sa physiologie (variété remontante de jours longs). La plantation a été réalisée en semaine 4. L'objectif était d'étudier quel type d'aménagement (habitat et /ou nourriture) permettait une meilleure installation et un maintien des acariens prédateurs dans la culture.

3.4. L'aubergine en AB

3.4.1. Le contexte de production

La gestion des ravageurs sur aubergine est souvent problématique, notamment les acariens tétranyques. Les auxiliaires prédateurs des tétranyques utilisés en lutte biologique sont essentiellement des acariens phytoseiides. Malheureusement, leur installation dans les cultures d'été est assez

aléatoire, et leur maintien, notamment au cœur de l'été, est assez rare (absence de proies, climat trop sec ?).

3.4.2. La conception du système

L'essai a été mis en place sous un tunnel plastique non chauffé (9mx64m) dans une exploitation en AB à Châteaurenard (13). La variété Aubergine zébrée variété 'Rioca' (Gautier) greffée sur 'Fortamino' est le support expérimental. Chaque année, les plantations se font en avril sur six rangs.

4. Dispositifs et résultats

Le projet a débuté en 2020, année marquée par la propagation du virus de la Covid-19 nécessitant une adaptation des équipes chez tous les partenaires. Les laboratoires de l'INRAE ont cessé toutes activités durant les neuf premiers mois, qui par la suite ont été rattrapés avec la prolongation du projet jusqu'en décembre 2023. De fait, des résultats d'essais en station ont été les premiers obtenus notamment pour les tests en laboratoire des matériaux naturels type habitat.

4.1. Favoriser l'habitat des auxiliaires dans les agrosystèmes

4.1.1. Matériaux naturels dans les dispositifs expérimentaux

Dans des conditions de laboratoire équipé d'enceintes climatisées, le broyat de chanvre, les cosses de sarrasin et la laine de brebis ont été soumis à cinq températures (6, 10, 15, 20 et 25°C) et complémentés de nourriture via l'ajout de pollen de *Typha angustifolia* pour le maintien de l'acarien auxiliaire *Transeius montdorensis*. L'humidité relative a été maintenue à 50%. La survie des populations a été étudiée durant 40 jours.

Les essais sous abri et en extérieur sur cosses, chanvre, miscanthus et laine ont été conduits dans des cultures d'aubergine en AB, fraisier en hors-sol, rose fleur coupée en hors-sol et de rosier paysager en potée fleurie. Les comparaisons avec les témoins sont spécifiques à chaque agrosystème : le paillage plastique micro-perforé dans l'essai aubergine, le mélange de tourbe et d'aiguilles de pins dans l'essai fraisier, la perlite dans l'essai rose fleur coupée et le substrat de pépinière dans l'essai rosier paysager.

4.1.2. Matériaux naturels : résultats par type d'habitat

Le chanvre soumis aux températures basses (6, 10 à 15°C) ou plus fortes (20 à 25°C) a permis le maintien de *T. montdorensis*. Après 40 jours de suivi de ces populations dans des conditions de laboratoire, 20 à 40 % des individus ont survécu aux basses températures, alors qu'ils ont disparu dans le témoin. Les résultats suggèrent que le chanvre, et dans une moindre mesure les cosses de sarrasin, pourrait être utilisé pour accroitre la survie et donc le maintien du prédateur *T. montdorensis*, et plus généralement les acariens prédateurs utilisés en lutte biologique, au sein des cultures ciblées. De plus, nous avons noté que le chanvre a augmenté la prospection de *T. montdorenis* dans les conditions d'essais de ce matériau d'une culture de l'aubergine.

Si la cosse de sarrasin n'a pas été le matériau le mieux noté pour maintenir *T. montdorensis* dans les conditions drastiques de laboratoire à fortes températures (mais similaire à l'éfficacité du chanvre et de la laine à basses températures), des essais conduits dans les agrosystèmes aubergine, rose et rosier, ont révélé des résultats plus positifs lorsque ces cosses sont utilisées. En effet, une augmentation significative des effectifs d'acariens prédateurs des thrips et des tétranyques a été démontrée tant dans le matériau (essais aubergine, rose et rosier) que sur les strates végétales basse, moyenne et haute de l'aubergine et de la rose fleur coupée. Ce paillage augmente l'humidité relative améliorant ainsi le contrôle des tétranyques de l'aubergine et la production de roses. Il offre un habitat favorable à des prédateurs indigènes des thrips et des tétranyques indigènes dont les espèces identifiées dans la rose fleur coupée sont *Phytoseiulus persimilis*, *Neoseiulus californicus*, *Neoseiulus barkeri*. Des cunaxes, des spécimens d'acariens prédateurs (non identifiés) et des acariens des denrées du type proie

(*Thyreophagus* et *Tyrophagus)* ont été également observés dans le paillage au pied des roses. L'inventaire faunistique de la strate végétale basse dite « poumon » des roses a permis d'identifier les phytoseiides prédateurs des aleurodes, thrips et tétranyques que sont *Neoseiulus cucumeris*, *N. californicus*, *Euseius gallicus, Typhlodromus recki* et d'une majorité de *Transeius montdorensis*).

Si la mise en place est facile en bac et en conteneur, elle est jugée difficile voire impossible pour la culture en sac de fraisiers.

La laine, comme le chanvre, favorise le maintien des populations du prédateur à 10°C (laine, $p < 0.01$) et à 15°C (laine et chanvre, $p < 0.05$), tout du moins dans des conditions drastiques de laboratoire.

Utilisée pour le paillage des rosiers paysagers, la laine de brebis a attiré des ennemis naturels des pucerons en plus grand nombre que le témoin, ceci sur des périodes plus prolongées avec des pics de pression. Cependant, l'abondance et la diversité des auxiliaires indigènes n'ont pas amélioré le contrôle des aphides durant les deux campagnes consécutives d'essais 2020 à 2021.

Le miscanthus est le plus intéressant des matériaux étudiés dans les conditions de culture des rosiers paysagers. Comme les cosses de sarrasin, ce paillage fluide a aussi offert des conditions de vie favorables à des acariens prédateurs des tétranyques. De plus, la couche épaisse permet de garder l'humidité suffisante au bon développement de la faune auxiliaire. Dans les conditions de l'essai, il a attiré une diversité de prédateurs de pucerons qui a été retrouvée sur les plantes. Etant donné son potentiel bénéfique sur la gestion des aphides en pépinière, le miscanthus est un levier habitat à combiner avec une plante nourricière de la faune auxiliaire.

Des indices et critères ont été attribués aux matériaux naturels du type « habitat », ils sont extraits du Guide référentiel et du cahier méthodologique et synthétisés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Tableau des indices et critères des matériaux naturels du type « habitat ». Légende : + faible, ++ moyen ; +++ élevé ; NO : non observé.

Levier	Culture	Fonction	Communauté	Faisabilité	Facilité de manipulation	Coût	Compétition avec la culture	Attractivité des ravageurs	Risque	Autre avis
Sarrasin (cosses)	Rose fleur coupée	Habitat	Acariens prédateurs et proies	+++	+++	+++	NO	NO	NO	Rentable après plusieurs années.
Sarrasin (cosses)	Fraisier	Habitat	Acariens prédateurs et proies	+++	+	++	NO	NO	NO	Pas d'intérêt
Sarrasin (cosses)	Aubergine	Habitat	Acariens prédateurs	+	++	+++	+	+	+	Coûteux
Sarrasin (cosses)	Rosier de jardin	Habitat	Collemboles, acariens prédateurs	+++	+++	++	NO	NO	NO	Pas d'avis
Miscanthus (broyat)	Rosier de jardin	Habitat	Collemboles, acariens	+++	+++	+	NO	NO	NO	Pas d'avis

			prédateurs							
Laine de brebis (fibres)	Rosier de jardin	Habitat	Absente	+	+	++	NO	NO	NO	Nidification d'oiseaux : à éviter.

4.2. Nourrir avec des compléments les auxiliaires de culture

4.2.1. Plantes de service nourricières dans les dispositifs expérimentaux

L'alysse maritime ou corbeille d'argent, (*Lobularia maritima* (L.) Desv., 1815 ; *Brassicaceae*) a été identifiée comme étant l'espèce candidate la plus pertinente car sa manipulation est pratique, facile, pour un coût raisonnable) ; elle n'entre pas en compétition avec la culture de rente ; elle est une source alimentaire (nectar, pollen) et/ou un abri pour la punaise *Orius laevigatus*, principal prédateur des thrips phytophages et des pucerons (Bennison *et al*., 2011).

La viorne (ou laurier-tin *Viburnum tinus)*, la grande aulnée (*Inula helenium)* et le sorbaire à feuille de sorbier (*Sorbaria sorbilofia)* ont été étudiées dans l'essai rosier paysager. L'impact de deux distances entre les plantes de service et les rosiers ont été évalués sur à la fois la diversité et la dynamique des populations d'auxiliaires.

4.2.2. Compléments alimentaires exogènes dans les dispositifs expérimentaux

Dans les essais conduits sous serre de production sur les cultures de roses, d'aubergines et de fraises, le pollen de *Typha angustifolia* et les acariens proies *Thyreophagus entomophagus* sont étudiés en comparaison avec un témoin sans nourrissage. L'impact sur les populations de *Transeius montdorensis* est évalué au niveau des strates végétales (basse, moyenne, haute et récolte) dans les cultures de roses et d'aubergines. L'essai sur les fraisiers en hors-sol compare l'utilisation indépendante des espèces de phytoseiides *Amblyseius swirskii* et *T. montdorensis* testées dans deux modalités : l'une avec un complément alimentaire, l'autre sans nourriture complémentaire exogène.

4.2.3. Résultats sur les compléments alimentaires

L'alysse maritime complément de nourriture pour *Orius laevigatus*, auxiliaire de la culture de fraises

Dans les conditions de serre mésocosme, dans l'expérience 1 en 2021, *Lobularia maritima* favorise la population de la punaise prédatrice *Orius laevigatus* et optimise son efficience de bio-contrôle. Le complément d'œufs irradiés d'*Ephestia kuehniella* a accentué la croissance de la population de la punaise prédatrice, probablement grâce à son effet bénéfique sur la fécondation. A l'inverse, l'unique présence des fleurs de fraisiers ne permet pas de soutenir la population du prédateur ; au contraire, les conditions sont favorables à l'expansion du ravageur *Macrosiphum euphorbiae (Aphididae).*

La quantité des fraises par plant, qui est proche du rendement chez un maraicher est maximal dans les modalités avec l'alysse, intermédiaire pour la modalité avec seuls des œufs d'*Ephestia* et faible pour le témoin avec uniquement le pollen des fraisiers.

Au printemps-été 2023, dans les conditions de serre mésocosme, le meilleur contrôle du puceron *M. euphorbiae* a été obtenu par *O. laevigatus* nourri avec le pollen d'alysson comme unique ressource alternative. L'ajout de pollen n'a pas conduit à un meilleur contrôle des populations de pucerons, et l'ajout d'une mixture de pollen et d'alysse a eu des résultats intermédiaires. Les apports de ressources alternatives étaient considérés comme non limitants (fournies *ad libitum*). En conclusion, l'alysse maritime, unique ressource alternative *d'O. laevigatus*, a amélioré le contrôle des populations d'aphides.

La viorne

A partir de février, la plante de service est mise en place dans un bi-tunnel et maintenue dans la culture jusqu'en mai. Sa floraison de début de printemps attire les premiers ennemis naturels des pucerons.

La grande aulnée

En remplacement de la viorne, *Inula helenium* rentre dans l'itinéraire cultural des rosiers au mois de mai afin de maintenir l'attractivité des ennemis naturels des pucerons.

Le sorbier à feuille de sorbaire

A la sortie des rosiers du bitunnel fin mai, les sorbiers sont mis en bout de travée avec les rosiers à la suite, en tenant compte du sens du vent dominant. Plus la plante de service est proche de la culture (au mieux 0.6 m) et plus les auxiliaires seront observés tôt. Dans les conditions de l'essai, les ennemis naturels des pucerons ont été observés successivement d'avril à mi-mai pour les syrphes, de mi-avril à fin mai pour les coccinelles et de fin mai à fin juin pour les parasitoïdes, notamment des praons.

Le pollen de *Typha angustifolia*

Dès la première année d'essais du nourrissage, dans les conditions de culture de la rose et de l'aubergine, les populations d'acariens prédateurs n'ont pas été augmentées avec les apports très réguliers de pollen du Typha. La pression thrips est restée forte dans les roses. Ni la dispersion, ni les effectifs de phytoseiides n'ont été améliorés dans les parcelles d'aubergine.

Les acariens proies *Thyreophagus entomophagus*

Après seize mois de cinq essais successifs de nourrissage des auxiliaires de la rose, la stratégie de lâchers hebdomadaires des acariens proies a maintenu et diversifié la communauté d'utiles. Le contrôle du thrips a été satisfaisant durant la période à haut risque entre avril et juin. Les essais successifs de positionnement des apports ont révélé qu'ils devaient se faire sur la strate 'poumon', pour augmenter de manière significative les populations de phytoseiides de cette niche.

Dans les essais sur fraisiers, les populations de phytoseiides, que sont *Amblysieus swirskii* et *Transeius montdorenis*, ont été également augmentées. Après trois lâchers tous les quinze jours, *A. swirskii* voient sa population augmenter de manière très hautement significative comparativement au témoin.

De même, l'essai sur aubergine a révélé une meilleure installation des phytoseiides avec un effet visible pendant un mois environ en début de culture. Le renouvellement du nourrissage fin juillet aurait favorisé une remontée des phytoseiides et permis l'installation de l'auxiliaire indigène *Macrolophus*.

Au regard de l'ensemble de ces résultats très encourageants, le nourrissage avec *Thyreophagus entomophagus* est retenu pour les essais de combinaison avec un matériau naturel type habitat.

Des indices et critères ont été attribués aux plantes de service étudiées dans le projet. Ils sont extraits du guide référentiel et du cahier méthodologique et synthétisés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Tableau des indices et de critères des plantes de service (PdS). Légende : + faible, ++ moyen ; +++ élevé ; NO : non observé.

Levier PdS	Culture	Fonction	Communauté	Floraison continue	Facilité de culture	Faisabilité	Compétition avec la culture	Attractivité ravageur	Risque	Coût	Autre avis
Lobularia maritima	Fraisier en hors-sol sous serre de	Alimentation et Habitat	*Orius* Acariens prédateurs	+++	+++	+++	+	++	+	+	Occupe la surface de culture : définir le seuil

	production										d'acceptabilité
Lobularia Maritima	Fraisier en hors-sol sous serre insect-proof	Alimentation et Habitat	*Orius*	+++	+++	+++	NO	NO	NO	+	Moins de pucerons : meilleur rendement
Inula helenium	Rosier paysager	Habitat	Insectes mellifères Coccinelles	++	++	+++	+	+	+	+	Pas d'avis
Sorbaria sorbifolia	Rosier paysager	Alimentation	Syrphes, chrysopes	+++	+++	+++	++	++	+	+	Pas d'avis
Viburnum tinus	Rosier paysager	Alimentation et Habitat	Syrphes	+++	+++	+++	+	+++	+	+	Pas d'avis

4.3. Habitat et complément alimentaire combinés

4.3.1. Pour la production de roses fleurs coupées

- Dans les conditions de culture, l'essai a démontré que :

La lutte biologique contre le thrips californien de la rose avec une combinaison d'un habitat et d'un complément alimentaire est presque efficace sur une année de production (Diop, 2022). Dotée des leviers agroécologiques cosses de sarrasin et proies *Thyreophagus entomophagus*, la stratégie de protection biologique de la culture hors-sol de roses est renforcée et contribue à augmenter les rendements.

- Au niveau de l'habitat et du nourrissage : cf. paragraphes 3.1.2 et 3.2.2.
- Au niveau de la réalisation pratique :

La mise en place de l'habitat doit se faire aussitôt après la plantation des rosiers. Les lâchers se font dix à quinze jours après selon la hauteur des plants. Les solutions de lâchers de proies et d'habitat sont compatibles avec l'introduction de microorganismes, d'applications de substances biologiques. Ce concept « gite et couvert » s'intègre aux autres méthodes de protection dont les mesures prophylactiques. Le suivi sanitaire de la culture se fait toute l'année pour anticiper les pics d'attaques et s'assurer du maintien des organismes utiles : il est un levier majeur dans la stratégie de protection de la rose.

- Impact environnemental :

Indice de fréquence de traitements chimiques de 30 sur 12 mois, soit une baisse de 80% par rapport à la base d'IFT chimique 150 en exploitation. Ces aménagements agro-écologiques sont favorables aux auxiliaires indigènes, notamment à des agents de contrôle qui ne sont pas commercialisés.

4.3.2. Pour la production de rosiers paysagers

- Dans les conditions de culture, l'essai a démontré que :

L'objectif de gestion des pucerons sur les rosiers paysagers a pratiquement été atteint avec la combinaison des leviers habitat et plante de service. Les différentes pratiques mises en place ont augmenté la présence d'auxiliaires proches des cultures. Néanmoins, pour avoir une attractivité

continue durant la saison, il est nécessaire de sélectionner une association de plantes à floraison étalée.

- Au niveau de la réalisation pratique :

Habitat : un paillage fluide, de type miscanthus ou cosses de sarrasin, offre des conditions de vie favorables à l'installation des acariens prédateurs. Une bonne couche de paillage est nécessaire pour garder l'humidité suffisante à leur bon développement.

Alimentation : l'attractivité des auxiliaires est meilleure lorsque les plantes de service sont disposées aléatoirement sur la parcelle. Il est également important de favoriser des variétés diverses pour avoir plusieurs couleurs et formes de fleurs et ainsi attirer différentes espèces d'auxiliaires.

- Impact environnemental :

Aucune application de produit phytosanitaire n'a été réalisée. La combinaison des leviers a permis de valoriser la faune auxiliaire indigène.

4.3.3. Pour la production de fraises en hors-sol

- Dans les conditions de culture, l'essai a démontré que :

Habitat : la cosse de sarrasin ne permet pas de maintenir les populations d'acariens prédateurs dans le temps. Au vu des résultats obtenus en aubergine de plein sol, il se pourrait que ce système soit plus adapté à une culture en sol. En culture de fraisiers hors-sol, il semble plus intéressant de privilégier l'utilisation des plantes nourricières, source de pollen, dont le coût et la mise en place sont compatibles avec les contraintes des exploitations agricoles.

Alimentation : la présence de pollen, qu'il soit d'origine exogène (apport de pollen de *Typha*) ou apporté via des plantes de service comme l'alysse maritime, contribue de façon significative à l'installation et à l'accroissement des populations d'acariens prédateurs en culture. Considérant l'effet marqué de l'alysse en comparaison des autres modalités, il semble plus intéressant de poursuivre cet axe de recherche. Les plantes de service sont relativement simples à mettre en place : un pot peut être placé entre deux sacs de culture. La plante peut aussi être positionnée dans le sac de culture. L'irrigation de ces plantes peut se faire avec un goutteur et avec la solution nutritive apportée au fraisier.

- Au niveau de la réalisation pratique :

Habitat : pour permettre le maintien des cosses sur les pains de culture et maintenir un taux d'humidité suffisant, il a fallu ouvrir les pains de culture ajoutant du temps de manipulation. De plus, lors des interventions sur la culture, une quantité non négligeable est susceptible de tomber au milieu des allées ce qui peut contribuer à la perte d'auxiliaires. De fait, le matériau n'est pas adapté pour la culture en sac.

Alimentation : la seule plante de service testée au cours des deux années d'essais est l'alysse maritime. Les plants d'alysse ont été placés entre les pains. Pour les arroser, un goutteur a été ajouté à chaque plant. Il n'a pas été réalisé d'entretien supplémentaire pour les alysses. Les plants étaient assez volumineux mais n'ont pas eu d'impact négatif sur la culture de fraises, ils ont une floraison longue et permettent aux auxiliaires d'avoir un apport de pollen tout le long de la culture.

4.3.4. Pour la production d'aubergine en AB

- Dans les conditions de culture, l'essai a démontré que :

Habitat : le paillage végétal à base de cosses de sarrasin a permis d'augmenter la colonisation de la culture par *T. montdorensis* (dispersion, effectifs et maintien dans le temps). En conséquence, l'attaque d'acariens tétranyques a été divisée par 3. La colonisation des différents étages foliaires de la culture par les phytoseiides a été homogène en troisième année, alors que les deux années précédentes avaient montré une présence accrue en bas de plante. Le paillage à base de chanvre montre aussi un

effet positif, mais de moindre ampleur comparativement aux cosses de sarrasin. La création de zones refuges par paillage se révèle être une piste prometteuse pour limiter les populations d'acariens tétranyques.

Alimentation : la proie *Thyreophagus entomophagus* a permis une meilleure installation des phytoseiides, avec un effet visible dès le premier mois de culture, et a renforcé la présence spontanée de la punaise prédatrice indigène *Macrolophus*. Le pollen de *Typha* n'a pas permis d'améliorer la dispersion des auxiliaires observés, ni leurs effectifs.

- Au niveau de la réalisation pratique :

Habitat : l'épandage de cosses de sarrasin est facilité en bandes assez étroites (25 cm de part et d'autre du rang de plantation).

Alimentation : l'apport se fait par saupoudrage sur la végétation trois fois à deux semaines d'intervalle.

- Au niveau de l'impact environnemental :

La présence des cosses de sarrasin a permis de maintenir des populations d'auxiliaires indigènes (acariens prédateurs, araignées, staphylins, *Macrolophus*) significativement plus importantes qu'en cas de paillage plastique. Dans ce type d'agrosystème il n'y a pas d'intervention chimique.

- L'impact environnemental :

Aucune intervention chimique ce qui implique un Indice de Traitement Phytosanitaire chimique 0.

5. Conclusion et perspectives

Dans les conditions expérimentales du projet Hab'Alim, nous avons pu démontrer que la combinaison de leviers du type « gite et couvert » favorise un maintien de la faune auxiliaire, améliore une protection des cultures, valorise une biodiversité fonctionnelle et respecte notre environnement comme notre santé. De plus, la combinaison est compatible avec l'application des mesures prophylactiques notamment pour la culture de roses fleur coupée où il est fondamental de retirer les boutons floraux de la strate basse, une niche potentielle pour le thrips californien. Ainsi, les agrosystèmes étudiés dans le projet, que sont la rose fleur coupée, le rosier paysager, l'aubergine en AB et le fraisier en hors-sol, ont vu leur protection améliorée vis-à-vis de leurs principaux ravageurs qui sont le thrips californien, les pucerons et les tétranyques. Après trois années d'études, les références acquises sont transférables d'une filière végétale à l'autre avec des adaptations et des freins à lever. Les réseaux Dephy Ferme et Groupe 30000 des filières concernées œuvrent dans ce sens. L'idée d'intégrer un écosystème dans un agrosystème pour sécuriser la lutte biologique chemine, tout en veillant à la faisabilité économique. Parmi les leviers du type habitat, le chanvre et le miscanthus qui ont montré des caractéristiques de maintien des phytoseiides très intéressantes dans des conditions de laboratoire, seront évalués dans les prochains d'essais nationaux dès 2025. En effet, ces leviers s'ajoutent à la liste des autres solutions écologiques d'amélioration de la protection biologique. Ils seront testés dans les projets horticoles HortGel* et HortiChaud** du programme Déphy Expé 2025-2031 ainsi que dans le projet GAMHA*** du casdar 2025-2028. Dans la continuité du projet Hab'Alim, des partenaires des deux filières du maraichage et de l'horticulture se retrouvent autour du projet GAMHA pour améliorer la protection biologique de cycles de culture courts de production sous abris. Les actions techniques et scientifiques des projets seront conduites sous les différents climats de notre territoire.

* Protection biologique de cultures HORTicoles sous abri hors-GEL.

** Zéro pesticides sous serres : promouvoir les équilibres biologiques tout en contrôlant la croissance des plantes.

*** Gestion Agroécologique en Maraichage et en Horticulture des Acariens tétranyques.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Benjamin Gard : https://orcid.org/0000-0003-3541-250X

Contributions des auteurs

Ange Lhoste-Drouineau : co-rédaction du manuscrit, administration du projet.

Marie-Anne Joussemet : co-rédaction du manuscrit.

Marine Litzler : co-rédaction du manuscrit.

Benjamin Gard : co-rédaction du manuscrit.

Jérôme Lambion : co-rédaction du manuscrit.

Nicolas Desneux : co-rédaction du manuscrit.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

A Madame Marie-Claude Bonicel, de la société Bioline pour ses conseils techniques.

Déclaration de soutien financier

Le ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire a financé le projet Hab'Alim dans le cadre du Casdar n°19AIP5901 qui s'inscrit dans la liste des leviers vers la transition agroécologique des exploitations agricoles.

L'interprofession Val'Hor s'est également portée partenaire du projet Hab'Alim.

Références bibliographiques

Bennison J., Pope T., Maulden K., 2011 L'utilisation potentielle de la fleur alysse en tant que plante « banquière » pour soutenir la création d'*Orius laevigatus* dans la fraise toujours porteuse pour améliorer le contrôle biologique des thrips de fleurs occidentales. IOBCWPRS Bull 68 :15-18.

Diop K., 2022. Evaluations d'un habitat combiné à un nourrissage sur le maintien des acariens prédateurs dans une stratégie de protection biologique intégrée de la rose vis-à-vis du thrips californien. Master II Sciences Plantes Saclay, Université Paris-Saclay. 32 pages.

Lhoste-Drouineau A., *et al* 2024 : Guide référentiel et cahier méthodologique. 107 pages. https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/astredhor_200

Zuma *et al*., 2023. Les plantes complémentaires et les proies alternatives améliorent le contrôle biologique par Orius laevigatus sur la fraise. In Journal Pest Science, volume 96, pages 711-721.

Val'hor, BO note institutionnelle : Les produits phytosanitaires dans la filière fleur coupée. Décembre 2024.

Pour citer cet article : Ange Lhoste-Drouineau, Marie-Anne Joussemet, Marine Litzler, Benjamin Gard, Jérôme Lambion, *et al*.. Conserver les auxiliaires de culture avec « le gîte et le couvert ». Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.150-162. 10.17180/ciag-2025-vol107-art12

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Repulse : Mise au point et évaluation de stratégies de protection des cultures légumières contre les ravageurs basées sur l'utilisation de plantes répulsives

Sébastien PICAULT[1], Anne-Marie CORTESERO[2], Hélène GAUTIER[3], Laurent GOMEZ[3], Juliette PELLAT[4], Christele ASSEGOND[5]

[1] CTIFL, 35 allée des sapins ZI Belle Etoile Antarès 44483 Carquefou Cedex, France

[2] UMR IGEPP, Domaine de la Motte BP 35327 35653 Le Rheu cedex, France

[3] UR PSH, Domaine Saint-Paul 228 - route de l'Aérodrome - CS 40509 84914 Avignon Cedex 9, France

[4] CTIFL, 751 Chemin de Balandran 30127 Bellegarde, France

[5] Université de Tours – CETU ETICs, 3 rue des Tanneurs 37041 Tours Cedex, France

Correspondance : sebastien.picault@ctifl.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art13

Résumé

Des stratégies de protection des cultures légumières contre les thrips, les pucerons et la mouche du chou *Delia radicum* reposant sur l'utilisation de plantes répulsives ont été étudiées par le CTIFL (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes) et ses partenaires dans le cadre du projet REPULSE. Dans ce projet, des plantes induisant un comportement de fuite chez les thrips et les pucerons ou perturbant le comportement de ponte de *D. radicum* ont été identifiées. L'effet de plantes compagnes aux potentiels effets répulsifs associées aux plantes cultivées sur la sévérité des dégâts occasionnés par ces ravageurs a également été évalué. Des résultats très encourageants ont été obtenus pour *D. radicum*, avec des pontes pouvant être réduites de 70 % à l'aide de souci officinal ou d'immortelle à grandes bractées. Le thym, la sarriette et la coriandre pourraient s'avérer intéressantes pour gérer les thrips en culture de poireau et de fraise. Les résultats sont plus nuancés pour ce qui concerne les pucerons, une même plante pouvant repousser une espèce de puceron et en attirer d'autres.

Mots-clés : plantes répulsives, COV, *Delia radicum*, thrips, pucerons, *Aphis gossypii*, *Macrosiphum euphorbiae*, cultures légumières

Abstract: Development and evaluation of strategies for protecting vegetable crops against pests based on the use of repellent plants

The aim of the REPULSE project, carried out by CTIFL and its partners, was to study vegetable crop protection solutions against thrips, aphids and the cabbage root fly *Delia radicum* based on repellent plants. In this project, some plants leading thrips and aphids to be on run or disrupting cabbage fly egg-lying behavior have been identified. Companion plant effect on damage severity were also assessed. Promising results were obtained for *D. radicum*, whose egg-lying to be reduced up to 70 % with marigold or *Helichrysum bracteatum*. Thyme, savory and coriander could be interesting to manage thrips in leek or strawberry crops. Results are more contrasting for aphids, one single plant species being likely to repel one aphid species while to attract another one.

Keywords: repellent plants, VOC, *Delia radicum*, Thrips, aphids, *Aphis gossypii*, *Macrosiphum euphorbiae*, vegetable crops

1. Les thrips, les pucerons et les mouches : un enjeu technique et économique majeur pour les producteurs de légumes

Les thrips, les pucerons et les mouches peuvent avoir un impact économique très important en cultures légumières en empêchant la croissance des plantes, en dégradant la qualité du produit final, en rendant les fruits impropres à la consommation et/ou en véhiculant des virus.

1.1. Destruction de récoltes et/ou déclassement commercial

En cultures de fraise hors-sol, le thrips *Frankliniella occidentalis* s'attaque aux fleurs et aux fruits. Les fraisiers attaqués par les thrips produisent moins de fruits (avortement des fleurs) et les fruits produits sont ternes (fruits « bronzés »), durs et desséchés avec des akènes qui ressortent ou des plages décolorées. Les thrips constituent un problème majeur pour les cultures de fraise car leur seuil de nuisibilité est très bas (1 individu par fleur). En Bretagne, où la fraise de Plougastel est produite, les producteurs de fraise peuvent perdre jusqu'à un mois de récolte sur la période de production. Cela est très préjudiciable car la fraise de Plougastel est une fraise à forte valeur ajoutée (chiffre d'affaires espéré en cultures chauffées : environ 400000 euros/ha). Dans le Sud-Ouest, le Sud-Est et le Centre Ouest de la France, qui sont de grosses régions de production de fraise, les thrips peuvent détruire complètement la production de l'une des trois principales périodes de production. Pour ne pas perdre leur production, certains producteurs sont obligés d'égrapper voire d'effleurer la culture, ce qui engendre des pertes de rendements et des surcoûts de production non négligeables.

En cultures d'alliacées, c'est le thrips *Thrips tabaci* qui est problématique. Il dégrade la qualité du feuillage des poireaux et des oignons en absorbant le contenu des cellules de l'épiderme qui se dessèchent pour former des groupes de petits points blancs visibles à l'œil nu souvent accompagnés de petits tas d'excréments noirs. Le feuillage prend alors un aspect argenté qui compromet fortement la qualité commerciale des plantes. En cas d'attaque intense, des pertes de rendement importantes peuvent être observées. En France, les problèmes de thrips concernent 5 200 ha de poireau, 10 350ha d'oignon de couleur, 2 700 ha d'oignon blanc (industrie) et 400 ha d'oignon de printemps.

1.2. Perturbation de la croissance des plantes, souillures et transmission de virus

De nombreuses espèces de pucerons s'attaquent aux cultures légumières, et tout particulièrement aux cultures de fraise, d'aubergine, de courgette, de melon… La capacité de nuisance des pucerons est très forte du fait de leur courte durée de développement (de l'ordre de 8 à 10 jours à 20°C), de leur température minimale de développement souvent basse, de leur mode de reproduction parthénogénétique au printemps et en été, et de leur aptitude à se déplacer sur de longues distances (formes ailées). L'évolution rapide de leurs populations peut gêner voire bloquer la croissance des plantes et provoquer l'avortement des bourgeons floraux. Le miellat excrété par les pucerons offre par ailleurs des conditions favorables au développement de champignons saprophytes et entraine l'apparition de fumagine, ce qui réduit la photosynthèse et affaiblit les plantes. Par ailleurs, le miellat et la fumagine souillent les fruits, ce qui déprécie leur valeur marchande et impose une étape supplémentaire de nettoyage des fruits lors du conditionnement. Les pucerons peuvent aussi être vecteurs de virus et la salive de certaines espèces peut avoir une action irritative et toxique qui provoque une réaction de la part du végétal (les feuilles se déforment, tombent, les fleurs avortent et se dessèchent et les fruits grossissent mal).

1.3. Dégradation du système racinaire et éclatement des plantes engendrés par la mouche

La mouche du chou *Delia radicum* a quant à elle un impact économique important en cultures de choux, non seulement en termes de dégâts provoqués (perte de plants, de rendement commercial, diminution

de la qualité du produit final…) mais aussi en termes de coûts liés aux différentes méthodes de protection. La mouche du chou peut se montrer très préoccupante dans certaines régions, pouvant parfois remettre en cause la viabilité des exploitations. La production française de choux (30 000 ha, tous types de choux confondus) dépend ainsi directement de la maîtrise de cette mouche, dont les attaques sont particulièrement difficiles à gérer en fin de cycle de culture, même avec une protection chimique car les mouches pondent directement à l'intérieur des pommes de chou. En l'absence de traitement phytosanitaire ou de protection physique des plants, les attaques précoces de *D. radicum* peuvent entraîner de très lourdes pertes de production, les préjudices pouvant aller jusqu'à 100 % de perte pour les parcelles les plus touchées. En moyenne, la profession estime qu'en l'absence de protection des cultures, la perte de chiffre d'affaires serait de 30 à 50 %.

2. Une protection des cultures difficile

La protection des cultures légumières contre les thrips, les pucerons et *D. radicum* est difficile à cause des évolutions réglementaires qui visent à réduire l'utilisation des produits phytosanitaires et leur impact sur l'environnement, et parce que les maraîchers sont confrontés à des impasses techniques. La gestion des thrips en cultures de poireau et de fraise est particulièrement difficile, car les moyens de protection à l'aide de produits phytosanitaires sont limités (retrait de substances actives, cible difficile à atteindre, développement de résistances) et les stratégies de lutte biologique ne sont pas suffisamment efficaces (Picault *et al*., 2018). La gestion des pucerons en cultures sous abri froid peut se faire à l'aide de produits phytosanitaires et/ou de produits de biocontrôle, mais les pullulations les plus précoces sont souvent incontrôlables. Des stratégies de lutte biologique par augmentation ou par conservation peuvent également être mises en œuvre, mais leur efficacité est parfois limitée à cause de problèmes de spécificité d'hôte et/ou de températures trop froides sous les abris. Enfin, la gestion de *D. radicum* en cultures de brassicacées peut se faire à l'aide de produits phytosanitaires et/ou de filets insect-proof, mais ces solutions coûtent cher et sont parfois insuffisantes.

3. Repousser les ravageurs avec les odeurs de plante

Pour pallier les insuffisances des solutions de protection actuellement disponibles, l'utilisation de plantes émettant des odeurs répulsives pour les thrips, les pucerons et *D. radicum* apparaît comme une nouvelle piste à explorer. Ces plantes pourraient en effet permettre de protéger efficacement les cultures de fraise précoces et les cultures précoces sous abri froid contre les pucerons en attendant que les températures augmentent et que les moyens de lutte biologique classiques puissent ensuite être mis en œuvre et prendre le relais. Combinées à l'utilisation d'autres plantes de service favorisant la colonisation des parcelles par les ennemis naturels de thrips, ces plantes pourraient aussi rendre opérationnelles les stratégies de lutte biologique par conservation des habitats travaillées jusqu'à présent en cultures d'alliacées, en améliorant le ratio ennemis naturels de thrips / thrips pour le rendre favorable à la production. En cultures de brassicacées, où les possibilités de lutte biologique contre *D. radicum* semblent limitées, ces plantes pourraient être utilisées dans le cadre de stratégies « push-pull ».

L'intérêt de stratégies de protection des cultures légumières contre les thrips, les pucerons et *D. radicum* basées sur l'utilisation de plantes répulsives a été étudié par le CTIFL et ses partenaires (INRAE – UMR PSH, Université de Rennes I – UMR IGEPP, ITEIPMAI, Chambre d'Agriculture du Loir-et-Cher, Terre d'Essais, ACPEL, lycée agricole du Fresne, Agrocampus Ouest – Centre d'Angers, Université de Tours, SAVEOL) dans le cadre du projet REPULSE, qui s'est déroulé de 2020 à 2023 avec la contribution financière du compte d'affection spéciale développement agricole et rural (CASDAR) et le soutien du GIS PIClég (Picault *et al*., 2021). Le premier objectif de ce projet était d'identifier des plantes induisant un comportement d'évitement ou de répulsion chez les pucerons, les thrips et *D. radicum*, en effectuant des tests de comportement ou d'olfactométrie en conditions

contrôlées. Le deuxième objectif du projet était de concevoir et d'évaluer en parcelle expérimentale des stratégies de protection des cultures légumières contre ces ravageurs basées sur l'utilisation de plantes répulsives. Le troisième objectif du projet était d'identifier les conditions favorables à l'appropriation par les producteurs de stratégies de protection contre les ravageurs impliquant l'association de plantes compagnes à la plante cultivée.

4. Des résultats encourageants pour la mouche du chou *D. radicum*

4.1. Tests de comportement en cage

Afin d'identifier des plantes dont les odeurs repoussent *D. radicum* et/ou des plantes dont la présence à proximité immédiate de la plante cultivée (brocoli) diminue le niveau d'infestation de la culture, un travail de screening sans *a priori* ainsi que des tests de comportement ont été effectués en conditions semi-contrôlées par l'UMR IGEPP. Le choix des plantes testées a été effectué en fonction de leur phénologie et de leur capacité à être associées avec une culture de brocoli de printemps. Au total, 55 espèces de plantes appartenant à 17 familles botaniques différentes ont été testées. L'influence de ces plantes sur le niveau des pontes de *D. radicum* a été étudiée dans des cages de 18 m^3 placées dans des serres où la température variait entre 18 et 20°C la nuit et entre 20 et 25°C le jour. Dans chaque cage, deux plaques de brocolis associés à l'une des espèces testées (modalité « associée » : 8 plants de brocoli + 8 plants de l'espèce testée) et deux plaques de brocolis purs (modalité « témoin » : 8 plants de brocoli) ont été introduites. Dans chaque cage, 32 femelles gravides (i.e. femelles pleines d'œufs matures) ont été introduites et laissées pendant une durée de trois jours. Au bout de cette durée, les racines des brocolis ont été lavées et le nombre d'œufs pondus a été compté et comparé entre la modalité « témoin » et la modalité « associée ». Sur les 55 espèces testées, 15 ont induit une réduction significative du niveau des pontes de *D. radicum* au collet des plantes. Parmi ces plantes, deux se sont révélées particulièrement intéressantes : le souci officinal *(Calendula officinalis*) et l'immortelle à grandes bractées (*Helichrysum bracteatum*) avec lesquelles le niveau des pontes a été réduit de 70 % en moyenne par rapport au témoin. A contrario, trois plantes ont induit une augmentation significative du niveau des pontes de *D. radicum* : l'anis vert (*Pimpinella anisum*), la camomille matricaire (*Matricaria recutita*) et la valériane officinale (*Valeriana officinalis*), avec un nombre moyen d'œufs pondus par plante jusqu'à deux fois plus élevé sur les brocolis associés à ces plantes que sur les brocolis témoins.

4.2. Expérimentation en culture de brocoli

Une expérimentation au champ a été menée par l'UMR IGEPP et la station régionale Terre d'Essais afin d'évaluer l'influence du mode d'association du souci officinal et du brocoli (souci officinal semé dans les mini-mottes de brocoli vs souci officinal planté sur le rang) sur le niveau d'infestation de la culture par *D. radicum*. Le dispositif comprenait quatre répétitions randomisées de chaque modalité sur une parcelle expérimentale de 900 m^2. L'expérimentation s'est déroulée pendant la seconde période de vol de *D. radicum* (soit du 20 juin au 20 juillet). Cette expérimentation a confirmé le potentiel très intéressant du souci officinal pour réduire le niveau des pontes de *D. radicum* lorsqu'il est associé au brocoli dans la mini-motte au moment du semis (Figure 1). La plantation de souci officinal sur le rang, entre deux brocolis, permet également de réduire le niveau des pontes de *D. radicum*, mais dans une moindre mesure. L'association du souci officinal dans la mini-motte de brocoli demande de la technicité pour éviter la compétition avec le brocoli tout en assurant le bon développement du souci officinal. L'utilisation de ce type de plante répulsive demandera de développer de nouveaux itinéraires techniques, à la fois pour garantir un effet significatif sur les pontes de *D. radicum* et éviter qu'elles ne deviennent envahissantes (e.g. salissement de la parcelle par les graines produites par le souci officinal).

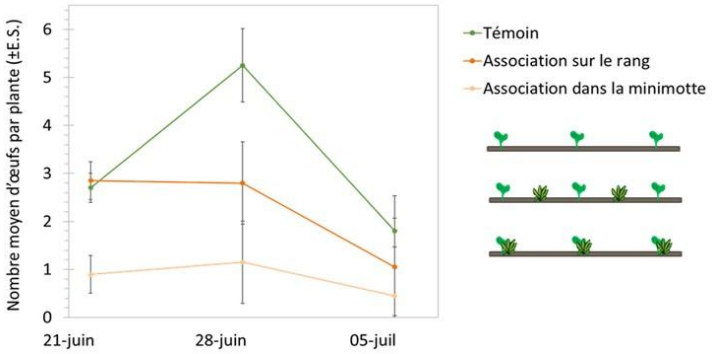


Figure 1 : Nombre moyen d'œufs de la mouche du chou *D. radicum* par plante mesuré par l'UMR IGEPP et la station Terre d'Essais dans une culture de brocoli associée à du souci officinal sur le rang ou dans la mini-motte et dans une culture témoin de brocoli seul.

5. L'effet des odeurs de plante varie d'une espèce de pucerons à l'autre

Afin d'identifier des plantes exerçant un effet répulsif sur les pucerons *A. gossypii* et *M. euphorbiae*, des tests d'olfactométrie en conditions contrôlées ont été effectués par l'UR PSH à l'aide d'un olfactomètre tubulaire dynamique. Ce type d'olfactomètre permet de mesurer un indice de répulsion, qui représente le nombre de pucerons qui adoptent un comportement de fuite face à une stimulation olfactive par rapport à un nombre initial de pucerons introduits dans l'olfactomètre. Plus cet indice est élevé, plus le mélange d'odeurs produit par la plante testée est répulsif. L'effet des plantes testées en olfactométrie sur la fécondité des pucerons a également été évalué, et les COV (composés organiques volatils) présents dans le bouquet d'odeur émis par leur feuillage et/ou leurs fleurs ont été identifiés. Les résultats de ces deux études complémentaires sont présentés dans un précédent article publié dans la revue Infos-CTIFL (Picault *et al*., 2024a).

5.1. Tests d'olfactométrie

Pour ce qui concerne *A. gossypii*, les plantes testées sont la courgette (*Cucurbita pepo*, utilisée comme référence attractive), l'œillet d'Inde (*Tagetes patula* var. Nana , *T. patula* var. Caussade), la rose d'Inde (*T. erecta*), la menthe poivrée (*Mentha piperita*), le basilic (*Ocimum basilicum* de type Pistou, Cannelle, Citron et Grand vert), le romarin (*Salvia rosmarinus* var. Spindler, *S. rosmarinus* var. Majorca Pink et *S. rosmarinus* var. Green Ginger), le souci officinal (*C. officinalis*), l'estragon français et l'estragon russe (*Artemisia dracunculus*), le lavandin (*Lavendula* sp. var. Grosso et L. sp. var. Seguret), et la rue officinale (*R. graveolens*).

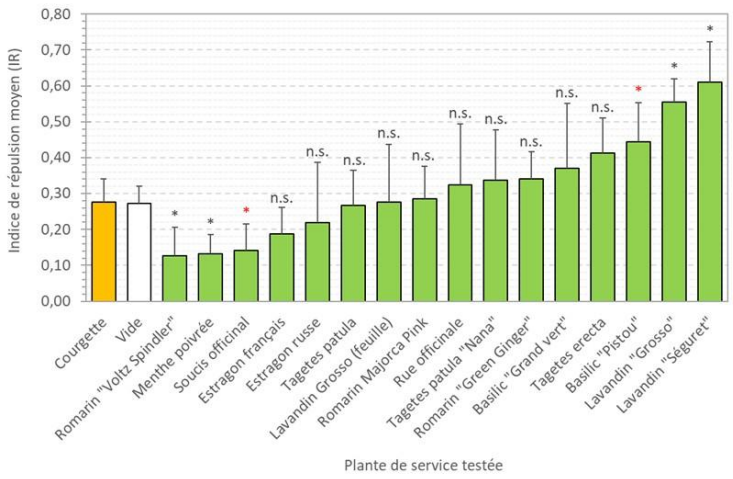


Figure 2 : Indice de répulsion moyen (IR) calculé par l'UR PSH pour le puceron *A. gossypii* avec les plantes testées. * : différence significative avec les témoins « courgette » et « vide » (P<0,05) ; * : différence significative uniquement avec le témoin "vide" (P<0,05) ; n.s. : différence non significative.

Pour *M. euphorbiae*, les plantes testées sont le fraisier (*Fragaria moschata*, utilisé comme référence attractive), la coriandre (*Coriandrum sativa*), la menthe poivrée (*Mentha*

piperita), la menthe verte (*M. spicata*), le céleri (*Apium graveolens*), la citronnelle (*Cymbopogon* sp.), l'anis (*Pimpinella anisum*), l'estragon du Mexique (*Tagetes lucida*), le lavandin (*Lavendula* sp.), l'absinthe (*Artemisia* sp.), le fenouil (*Foeniculum vulgare*), la tanaisie (*Tanacetum vulgare*) et la cataire (*Nepeta cataria*). Les résultats obtenus montrent que le basilic de type Pistou, et le lavandin var. Seguret exercent un effet répulsif significatif sur *A. gossypii*, avec un indice de répulsion moyen de 0,41 ; 0,44 et 0,61 respectivement contre 0,27 pour la courgette comme pour la modalité témoin (i.e. chambres de stimulation vides ; Figure 2). Le lavandin var. Grosso exerce lui aussi un effet répulsif sur *A. gossypii* (indice de répulsion de 0,56), mais uniquement lorsqu'il est en fleurs. La cataire et la tanaisie exercent quant à elle un effet répulsif significatif sur *M. euphorbiae* avec un indice de répulsion moyen de 0,49 et 0,59 respectivement contre 0,23 pour le fraisier et 0,32 pour la modalité témoin (Figure 3). *A contrario*, il est possible que la menthe poivrée exerce un effet attractif sur *M. euphorbiae*. En effet, l'indice de répulsion obtenu pour cette plante est particulièrement faible (0,27) et très proche de celui calculé pour le fraisier. Par ailleurs, une expérimentation menée dans des serres de fraise hors-sol suivies par la société SAVEOL a montré que la présence de pots de menthe poivrée et de basilic suspendus sous les gouttières de fraisiers à une densité de 0,94 plantes/m² (soit une plante tous les mètres et demi) augmentait l'incidence et la sévérité des dégâts occasionnés par *M. euphorbiae* sur le feuillage des plantes.

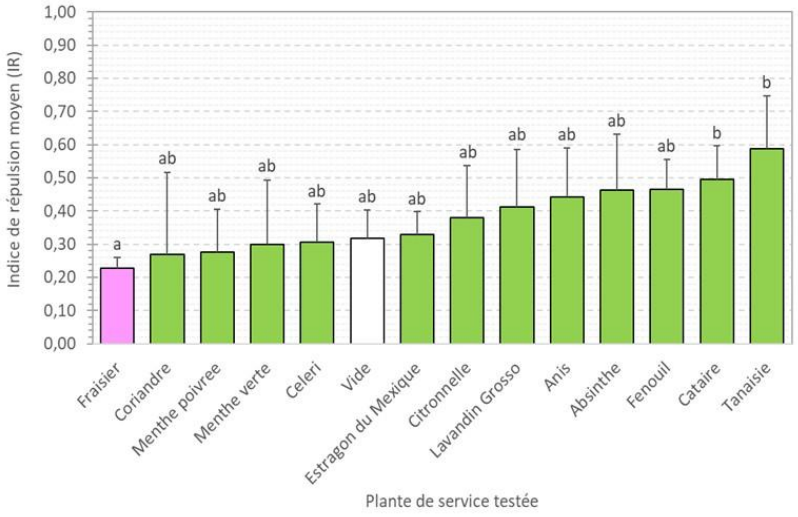


Figure 3 : Indice de répulsion moyen (IR) calculé par l'UR PSH pour *M. euphorbiae* avec les plantes testées.

5.2. Expérimentation en culture de courgette

En parallèle des tests d'olfactométrie réalisés par l'UR PSH, l'effet du romarin (*Rosmarinus officinalis* var. Majorca pink), du lavandin (*Lavandula* x *intermedia* var. Grosso) et du basilic (*O. basilicum* var. demi-nain de type Pistou) sur le niveau d'infestation des cultures de courgette par *A. gossypii* a été évalué par le CTIFL. Dans les expérimentations qui ont été menées, l'effet des plantes de service étudiées sur le paysage chimique de la culture a également été étudié en prélevant les COV émis dans l'air par les plantes l'aide de fibres SPME, en les analysant au laboratoire et en spatialisant leurs concentrations. Les résultats de cette étude complémentaire sont présentés dans le rapport de synthèse du projet REPULSE (Picault, 2024b). Le dispositif expérimental mis en place était constitué de tunnels dans lesquels les courgettes ont été associées à une plante compagne (tunnels aménagés) et de tunnels témoins (aucune protection contre les pucerons). Dans chaque tunnel, le niveau d'infestation des plantes par *A. gossypii* a été suivi une fois par semaine de la plantation à la dernière date de récolte.

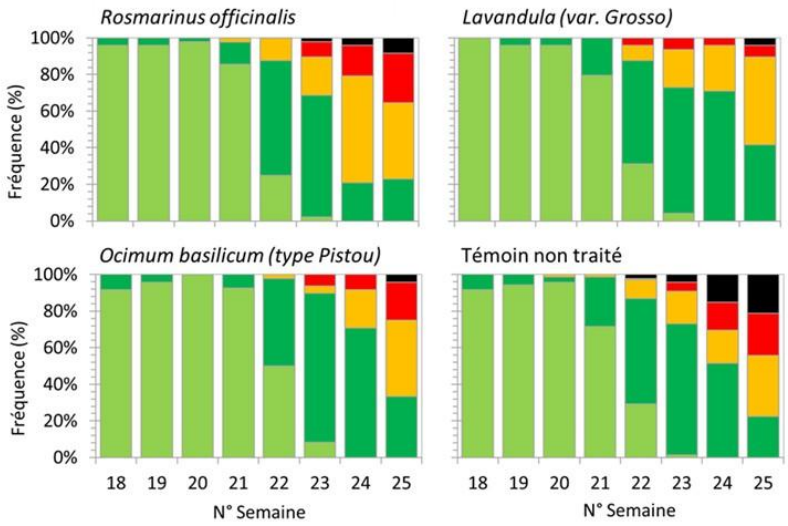


Figure 4 : Niveau d'infestation des courgettes par le puceron *A. gossypii* dans des parcelles aménagées avec du romarin officinal (*R. officinalis*), du lavandin (*Lavandula x intermedia* var. Grosso) ou du basilic (*O. basilicum* var. demi-nain de type Pistou) et des parcelles témoins (aucun traitement contre les pucerons). Echelle de couleur du vert clair = peu infesté, à noir = très infesté.

Les résultats obtenus montrent que le romarin et le basilic de type Pistou n'exercent pas d'effet significatif sur le niveau d'infestation des courgettes par *A. gossypii*, avec un pourcentage de plantes très infestées (plantes classées D ou E) au pic d'infestation de 35 % et 25 % respectivement (Figure 4). A ce moment-là, le niveau d'infestation des courgettes par *A. gossypii* mesuré pour ces deux plantes n'est pas significativement différent de celui mesuré pour la modalité témoin (44 %). Le lavandin exerce quant à lui un effet significatif sur ce niveau d'infestation, avec un pourcentage de plantes très infestées bien plus faible que celui mesuré pour la modalité témoin (10 %). Le fait que le basilic de type Pistou se montre répulsif dans les tests d'olfactométrie mais qu'il n'exerce plus d'effet significatif lorsqu'il est utilisé au champ suggère que son pouvoir de répulsion vis-à-vis d'*A. gossypii* est plus faible que celui du lavandin.

6. Des pistes encore à l'étude pour le thrips *T. tabaci*

6.1. Tests d'olfactométrie

De la même façon que ce qui a été fait pour les pucerons, des tests d'olfactométrie ont été effectués par le CTIFL afin de déterminer l'effet des odeurs de plantes sur le comportement du thrips *T. tabaci*. Ces tests ont été réalisés avec un olfactomètre tubulaire statique constitué d'un tube en verre de 54x20cm raccordé de chaque côté à une cage de stimulation et subdivisé en cinq zones, chaque zone étant caractérisée par sa distance à la stimulation. Le premier facteur étudié dans ces tests est l'espèce de plante répulsive : basilic (*O. basilicum* de type Grand Vert), fenouil (*F. vulgare*), gaultherie odorante (*Gaultheria fagrantissima)*, sarriette des montagnes (*Satureja montana*), thym commun (*Thymus vulgare*), thym à thymol (*T. zygis*), monarde (*Monarda didyma*), reine des prés (*Filipendula ulmaria*), oignon (*Allium cepa*), poireau (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*). Le second facteur étudié est l'état de la plante répulsive : plante entière ou morceau de plante (feuille froissée ou non froissée). Des tests ont également été effectués avec de l'huile essentielle de térébenthine, considérée dans l'étude comme référence répulsive, ainsi qu'avec du salicylate de méthyl, principal COV émis par les feuilles de gaultherie lorsqu'elles sont froissées. Un test consiste à déposer 25 thrips dans la zone centrale de l'olfactomètre puis à caractériser leur dispersion en dénombrant les individus présents dans chaque zone toutes les minutes pendant une durée de 10 minutes. Le pourcentage moyen de thrips par zone

de l'olfactomètre a été déterminé à chaque date d'observation et le niveau de répulsion moyen des odeurs testées a été évalué à l'aide d'un indice de répulsion (plus cet indice est faible, plus le niveau de répulsion est élevé).

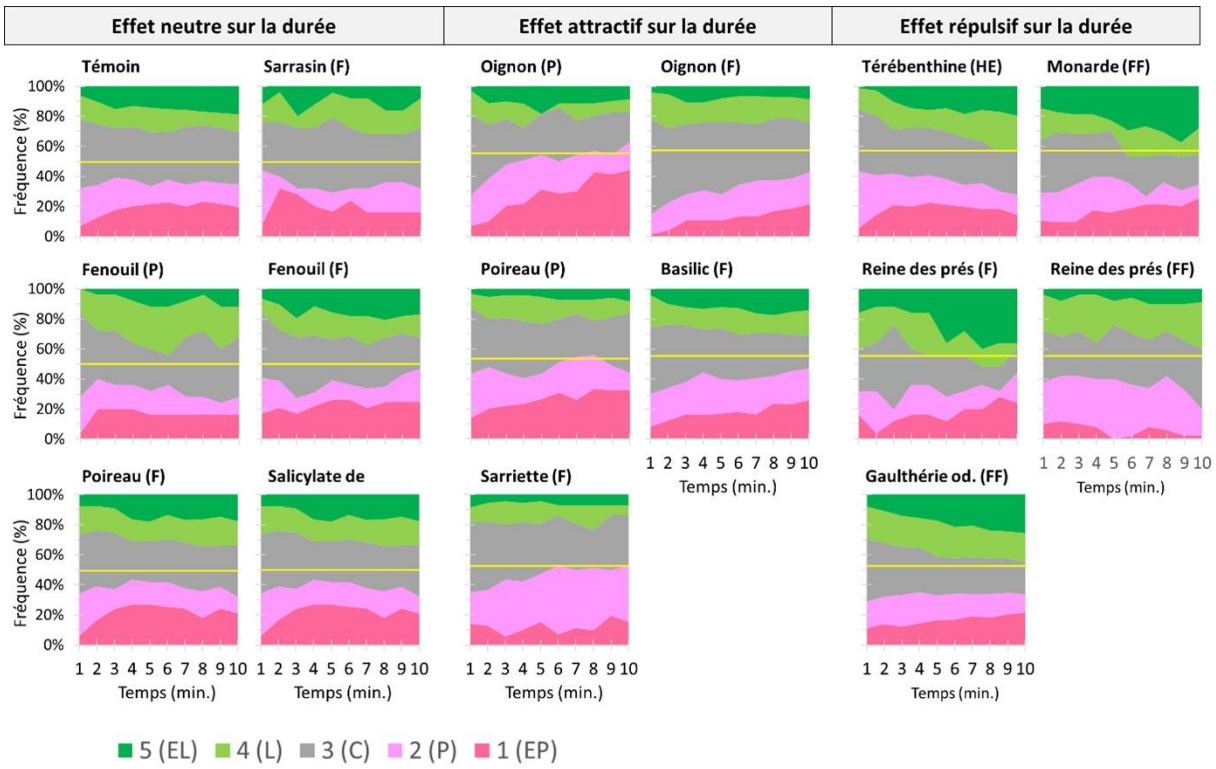


Figure 5 : Pourcentage moyen d'individus *T. tabaci* mesuré par le CTIFL dans chaque zone de l'olfactomètre de la première à la dixième minute d'observation. 1 (EP) : zone très proche de la stimulation ; 2 (P) : zone proche de la stimulation ; 3 (C) : zone centrale ; 4 (L) : zone éloignée de la stimulation ; 5 (EL) : zone très éloignée de la stimulation. P : plante entière ; F : feuille ; FF : feuille froissée ; HE : huile essentielle. La ligne jaune est la ligne médiane (50 %).

Les résultats obtenus montrent que, conformément à ce qui est attendu, le poireau et l'oignon entiers exercent un effet d'attraction significatif vis-à-vis de *T. tabaci*, avec un indice de répulsion moyen de 1,95 et 1,84 respectivement contre 1,28 pour la modalité témoin. Le pourcentage de thrips se rapprochant d'un poireau ou d'un oignon entier augmente ainsi significativement au cours du temps pour atteindre 50 % en moyenne au bout de 10 minutes, alors que la proportion de thrips s'en éloignant reste stable et ne dépasse pas 20 % (Figure 5). Le même phénomène est observé lorsqu'une seule feuille d'oignon est utilisée comme stimulation, mais en bien moindre mesure (le pourcentage de thrips se rapprochant de la stimulation au cours du temps augmente beaucoup moins vite). Le poireau n'exerce quant à lui plus aucun effet attractif lorsqu'une seule feuille est utilisée comme stimulation. La sarriette, et dans une moindre mesure, le basilic, semblent également exercer un effet attractif sur *T. tabaci*, avec un indice de répulsion moyen de 2,44 et 1,79 respectivement et une augmentation constante du pourcentage de thrips se rapprochant de la stimulation au cours du temps alors que le pourcentage de thrips s'en éloignant reste relativement stable. Néanmoins, les thrips se rapprochent moins de la cage de stimulation lorsqu'ils sont confrontés à une odeur de sarriette ou de basilic que lorsqu'ils sont confrontés à une odeur d'oignon ou de poireau. De plus, l'effet de la sarriette et du basilic sur *T. tabaci* est extrêmement variable d'une répétition à l'autre, et l'indice de répulsion calculé pour ces plantes n'est, *in fine*, pas significativement différent de celui calculé pour la modalité témoin. Il est possible que le stade et/ou l'état physiologique de la plante au moment du test expliquent en partie cette variabilité.

A contrario, l'huile essentielle de térébenthine, la monarde (feuilles froissées), la gaulthérie odorante (feuilles froissées) et la reine des prés (feuilles froissées et non froissées) exercent un effet répulsif significatif sur *T. tabaci*, avec un indice de répulsion moyen de 0,82 ; 0,90 ; 0,99 et 1,00 respectivement. Le pourcentage de thrips s'éloignant de ces stimulations augmente ainsi régulièrement au cours du temps pour atteindre 50 % en moyenne au bout de 10 minutes, alors que le pourcentage de thrips s'en rapprochant reste stable (20 à 30 %). Le plus fort effet de répulsion est observé avec la monarde et les feuilles non froissées de reine des prés. Avec ces plantes, le pourcentage de thrips se trouvant dans la zone la plus éloignée de la stimulation au bout de 10 minutes est de 40 %, alors qu'il est de 10 à 20 % avec les autres stimulations. Enfin, le sarrasin, le fenouil et le salicylate de méthyl n'ont aucun effet sur le comportement de *T. tabaci*. Avec ces stimulations, le pourcentage de thrips se rapprochant ou s'éloignant de la cage de stimulation évolue de la même façon que ce qui est observé pour la modalité témoin.

6.2. Expérimentation en culture de poireau

En parallèle des tests d'olfactométrie, des expérimentations au champ ont été menées par le CTIFL et la station Terre d'Essais afin d'évaluer l'effet de la coriandre, du fenouil, du céleri, du basilic, du sarrasin et de la gaulthérie couchée sur le niveau d'infestation des parcelles de poireau par *T. tabaci* et la sévérité des dégâts subséquents. Pour ce qui concerne la coriandre, différentes stratégies d'association au poireau ont été étudiées : coriandre plantée en damier en même temps que les poireaux avec une coriandre pour un, trois, cinq ou dix poireaux (stratégies 1:1, 1:3, 1:5 et 1:10), coriandre plantée en damier 15 jours ou 30 jours après la plantation des poireaux (afin de pouvoir effectuer un désherbage à la plantation avec un herbicide) avec une coriandre pour cinq poireaux (stratégies 1:5/15 et 1:5/30) et coriandre semée à la volée sur une planche entière un mois avant la plantation des poireaux, en alternant les planches de coriandre et les planches de poireau (stratégie AP). La gaulthérie couchée, le fenouil et le sarrasin ont été semées ou plantées en planches alternées avec les planches de poireau (stratégie AP). Le céleri et le basilic ont été plantés entre les rangs de poireaux au moment de la plantation (stratégie AR). L'effet de toutes les stratégies d'association sur l'intensité des vols de *T. tabaci* (suivis à l'aide de pièges bleus englués), le niveau d'infestation des cultures (mesuré à l'aide de la méthode de Berlèse) et la sévérité des dégâts subséquents (estimée à l'aide d'une échelle de classes graduée de A à F : A = pas de dégâts ; F : poireaux très abîmés) a été évalué à l'aune de témoins constitués de cultures de poireau pur.

Les résultats obtenus montrent que l'association de coriandre au poireau permet de réduire significativement la sévérité des dégâts occasionnés par *T. tabaci* lorsque la coriandre est plantée en damier à une densité très forte (stratégie 1:1), forte (stratégie 1:3) ou moyenne (stratégie 1:5). Avec une très forte densité de coriandre, le pourcentage moyen de poireaux abîmés par *T. tabaci* (i.e. poireaux classés D) est de 32 % (contre 38 % dans les cultures de poireau pur) au moment de la récolte, et le pourcentage moyen de poireaux très abîmés (i.e. poireaux classés E et F) est de 14 % (contre 52 % dans les cultures de poireau pur ; Figure 6). Avec densité de coriandre moyenne à forte, le pourcentage moyen de poireaux abîmés à très abîmés par *T. tabaci* se maintient en-deçà de 15 % et 25 % respectivement pendant les trois premiers mois de culture, alors qu'il ne cesse d'augmenter dans les cultures de poireau pur pour atteindre 65 % trois mois après la plantation. En revanche, ces stratégies ne permettent pas de protéger suffisamment les poireaux en toute fin de culture, avec un pourcentage moyen de poireaux abîmés et très abîmés par *T. tabaci* au moment de la récolte compris entre 59 à 62 % dans les cultures de poireau associées à de la coriandre et entre 76 à 81 % dans les cultures de poireau pur. L'effet de la stratégie 1:5 sur la sévérité des dégâts de thrips n'est observé que lorsque la coriandre est plantée en même temps que le poireau et disparaît complètement lorsque la coriandre est plantée 15 ou 30 jours plus tard (stratégies 1:5/15 et 1:5/30). Par ailleurs, lorsqu'elle est plantée en damier à une densité faible (stratégie 1:10), la coriandre n'exerce plus aucun effet significatif sur l'intensité des vols de *T. tabaci*, le niveau d'infestation des plantes et la sévérité des dégâts. Lorsque la

coriandre est associée au poireau en planches alternées (stratégie AP), un effet significatif sur la sévérité des dégâts peut également être observé, avec des situations où le pourcentage de poireaux très abîmés par *T. tabaci* peut se maintenir en-deçà de 30 % au moment de la récolte quand il dépasse 60 % dans les cultures de poireau pur. Cependant, cet effet n'est pas observé de façon systématique.

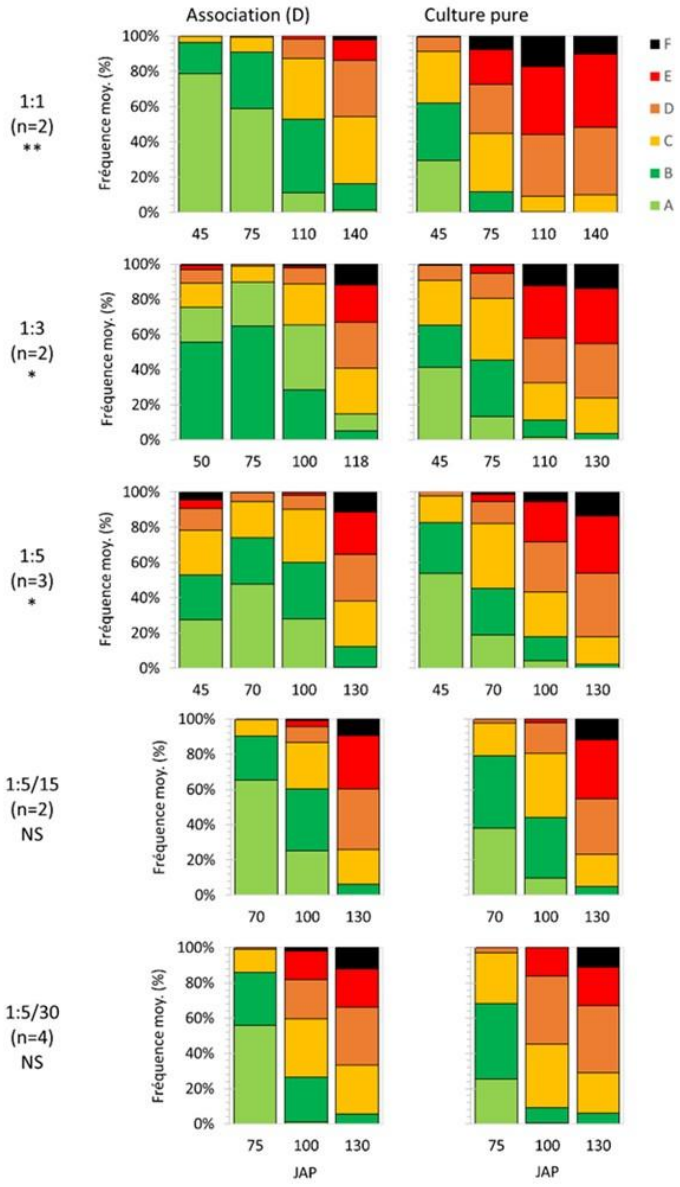


Figure 6 : Fréquence moyenne des classes de sévérité relatives aux dégâts occasionnés par *T. tabaci* (%) mesurée dans des parcelles de poireau associé à de la coriandre plantée en damier aux densités 1:1, 1:3, 1:5 et 1:5/15 et 1:5/30 ainsi que dans des parcelles de poireau pur. JAP : nombre de jours après plantation. A : pas de traces de thrips ; B & C : poireaux peu abîmés par *T. tabaci* ; D : poireau abîmé par *T. tabaci* ; E & F : poireau très abîmé par *T. tabaci*. NS : différence non significative ; * : différence significative (P<0,05) ; ** : différence très significative (P<0,01).

Enfin, aucune des autres plantes testées n'a eu d'effet sur le niveau d'infestation des cultures de poireau par *T. tabaci* et la sévérité des dégâts subséquents, soit parce l'odeur de la plante testée n'a pas influencé le comportement de *T. tabaci* (cas du basilic, du céleri, du sarrasin et du fenouil), soit parce que la plante testée n'a pas pu se développer faute de conditions favorables à son implantation (cas de la gaulthérie couchée). Si la coriandre plantée en damier aux densités forte (stratégie 1:3) et très forte (stratégie 1:1) permet de réduire significativement le niveau d'infestation des plantes par *T. tabaci* et la sévérité des dégâts subséquents, les résultats obtenus montrent que ce n'est pas grâce à un effet répulsif des COV qu'elle émet dans l'air, mais à la compétition très forte qu'elle exerce vis-à-vis du poireau. A cause de cette compétition, le poireau ne peut plus pousser et n'est donc plus appétant pour *T. tabaci* (en plus d'être caché sous l'épais feuillage de la coriandre et donc difficilement repérable). Le même phénomène est observé, mais en bien moindre mesure, dans les parcelles où la coriandre est plantée en damier à une densité moyenne (stratégie 1:5). Cependant, laisser pousser les poireaux un mois de plus et après fanaison de la coriandre permet dans ce dernier cas de figure de compenser en partie leur retard de croissance et d'atteindre des objectifs de rendements acceptables.

6.3. Expérimentation en culture de fraise

L'effet du thym commun, de l'origan et/ou de la sarriette sur le niveau d'infestation des cultures de fraise hors-sol par le thrips *F. occidentalis* a également été évalué dans des parcelles de production suivies

par la Chambre d'agriculture du Loir-et-Cher et une serre de production de la société SAVEOL. Pour cela, des tunnels de fraisier hors-sol ont été aménagés avec des pots de thym, de sarriette et d'origan placés sous les gouttières de fraisier de façon à avoir 0,15 ou 0,94 plantes répulsives / m². Dans les deux types de tunnel, le niveau d'infestation des plantes par *F. occidentalis* a été estimé une fois par semaine à l'aide d'une échelle de classes et comparé à celui estimé dans des tunnels témoins (i.e. sans plantes répulsives). Les résultats obtenus montrent que plus la densité de plantes répulsives dans la parcelle est forte, plus le niveau d'infestation des fraisiers par *F. occidentalis* est faible (Picault, 2024b). Le nombre cumulé moyen de thrips par plante est ainsi de 5,98±4,49 (n=4) dans les tunnels témoins, de 4,00±1,10 (n=4) dans les tunnels où les plantes répulsives ont été installées à une densité de 0,15 plantes / m² et de 1,73±1,30 (n=4) dans les tunnels où les plantes répulsives ont été installées à une densité de 0,94 plantes / m². Cependant, la pression exercée par *F. occidentalis* sur les cultures de fraise suivies dans le projet REPULSE est très faible, et la variabilité d'une répétition expérimentale à l'autre est très forte. Les différences observées d'une modalité à l'autre ne sont donc pas significatives et des travaux supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ou infirmer ce résultat.

7. Des solutions à venir, à conditions de lever certains freins au changement

Le projet REPULSE a permis d'identifier des plantes exerçant un effet répulsif vis-à-vis des principaux ravageurs des cultures légumières (thrips, pucerons, *D. radicum*) et d'évaluer leur effet sur le niveau d'infestation des cultures lorsqu'elles sont cultivées en association avec la culture de rente. Le souci officinal et l'immortelle à grandes bractées sont particulièrement intéressants pour réduire le niveau des pontes de *D. radicum* dans les cultures de choux. L'effet répulsif de ces plantes est par ailleurs plus fort si celles-ci sont semées directement dans la mini-motte que si elle est plantée entre les rangs de choux. Avant de mettre au point des systèmes de culture intégrant l'utilisation de souci officinal ou de l'immortelle à grandes bractées comme moyen de protection, il faudra d'abord améliorer les connaissances sur la phénologie de ces deux plantes pour s'assurer que leur développement soit synchrone de celui des choux et qu'elles exercent leur effet répulsif pendant les périodes de ponte de *D. radicum*. Le développement végétatif du souci officinal, et en moindre mesure celui de l'immortelle à grandes bractées, étant très fort, les phénomènes de compétition entre ces plantes et la culture de choux devront ensuite être évalués afin d'adapter la gestion de l'irrigation et de la fertilisation azotée en fonction des conditions climatiques. De la même façon, la manière dont ces deux espèces interfèrent avec la gestion de l'enherbement devra être étudiée afin d'adapter les pratiques de désherbage. Enfin, la mise en place de souci officinal ou d'immortelle à grandes bractées dans la culture peut être combinée avec la mise en place de plantes-piège en bordure de parcelle (par exemple chou chinois broyé ou bâché lorsqu'une majorité de plantes est infestée de larves et/ou de pupes de *D. radicum*) dans le cadre d'une stratégie « push-pull ».

En culture de courgette, c'est le lavandin en fleurs et, en moindre mesure, le basilic de type Pistou qui constituent les pistes les plus intéressantes pour empêcher l'installation du puceron *A. gossypii* sur le feuillage des plantes. Néanmoins, les résultats obtenus dans le projet REPULSE suggèrent que l'effet d'une plante sur le comportement des pucerons dépend non seulement de l'espèce de pucerons considérée, mais aussi de la proportion de chaque COV dans le bouquet d'odeurs final, aussi infime soit elle. Il est possible que la présence, en plus des COV majoritaires, d'un ou plusieurs COV en très faibles proportions dans ce bouquet soit déterminant dans l'effet que la plante exerce sur le comportement des pucerons. Enfin, l'analyse du paysage chimique des cultures de courgette associées à de l'œillet d'Inde suivies dans le projet REPULSE suggère que les COV émis par une plante répulsive ne se diffuseraient que dans un périmètre relativement restreint. Si cette hypothèse devait être confirmée, l'intégration de plantes répulsives dans une culture de courgette devrait par conséquent être pensée en réduisant au maximum la distance entre les plantes répulsives et les courgettes. Pour ce qui concerne *M. euphorbiae*, qui s'attaque à de nombreuses cultures légumières dont la courgette et le fraisier, deux espèces exercent un effet répulsif significatif sur les individus exposés à leurs odeurs : la

cataire et la tanaisie. A contrario, il est possible que la menthe poivrée, le basilic de type Grand Vert, l'estragon français et/ou l'œillet d'Inde soient attractifs pour cette espèce de puceron, mais cela reste à vérifier. Le céleri semble quant à lui détourner *M. euphorbiae* du fraisier lorsque les deux plantes sont cultivées ensemble. Dans une stratégie de protection des fraisiers contre ce puceron, le céleri pourrait donc être utilisé comme plante-piège.

La gaulthérie odorante et la coriandre pourraient quant à elles éloigner le thrips *T. tabaci* des cultures de poireau. Cependant, la gaulthérie ne pousse pas dans les parcelles maraîchères car les conditions nécessaires à sa croissance (pH acide à très acide, humidité du sol élevée, rayonnement faible) ne sont pas réunies. De plus, il faut que les feuilles de gaulthérie soient froissées pour qu'elles émettent les COV d'intérêt dans l'air, ce qui est très difficile à réaliser techniquement. L'utilisation de gaulthérie odorante pour protéger les cultures de poireau contre *T. tabaci* n'est donc pas envisageable. La coriandre est quant à elle très compétitive vis-à-vis du poireau et peut compromettre sérieusement l'objectif de rendement si elle est associée à la culture à des densités trop fortes. L'équilibre entre poireau et coriandre est difficile à trouver, d'une part parce que la coriandre n'exerce un effet répulsif sur *T. tabaci* que si elle est plantée à proximité directe des plants de poireau (et donc à des densités élevées) et d'autre part parce qu'elle empêche les poireaux de pousser si la densité de semis ou de plantation est trop forte. Les expérimentations menées dans le projet REPULSE suggèrent que planter la coriandre de façon systématique dans une parcelle de poireau de manière à couvrir 17 % de la parcelle (soit environ un plant de coriandre pour cinq poireaux) pourrait être un bon compromis entre le niveau d'efficacité de la stratégie de protection et le rendement. Dans ce cas de figure, la présence de coriandre au milieu des poireaux ralentit la croissance des plantes, mais l'objectif de rendement peut être atteint malgré tout si la date de récolte est retardée d'un mois par rapport à une situation normale (i.e. culture de poireau pur). Afin de limiter l'effet de la coriandre sur la croissance des poireaux tout en préservant l'effet répulsif de ses odeurs sur *T. tabaci*, une modification du système technique pourrait être imaginée, en modifiant par exemple la largeur des inter-rangs pour pouvoir placer des rangs de coriandre entre les rangs de poireau.

Il est possible que la reine des prés et la monarde exercent elles aussi un effet répulsif sur *T. tabaci*, mais cela doit être confirmé en réalisant des tests d'olfactométrie supplémentaires. Toutefois, si l'effet répulsif de ces plantes devait être confirmé, leur association au poireau paraît difficile. En effet, ces plantes n'ont pas les mêmes besoins nutritifs et hydriques que le poireau et mettent beaucoup de temps à s'implanter. Leur présence entre les rangs de poireau gênerait par ailleurs le désherbage chimique et/ou mécanique de la culture. De plus, il est probable que l'effet répulsif de la reine des prés et/ou de la monarde soit plutôt dû aux COV émis par les fleurs qu'aux COV émis par les feuilles. Dès lors, ces plantes n'auraient un effet sur *T. tabaci* qu'en fin de culture, ce qui est nécessaire mais pas suffisant. Afin de bénéficier de l'effet répulsif potentiel de la gaulthérie odorante, de la reine des prés et de la monarde sur *T. tabaci* en s'affranchissant des limites techniques inhérentes aux systèmes de cultures associées, l'utilisation d'huile essentielle pourrait être envisagée. Pour diffuser les huiles essentielles répulsives dans les parcelles de culture facilement et de façon prolongée, le CTIFL a initié, à la suite du projet REPULSE, des travaux sur la mise au point de techniques d'encapsulation et de micro-encapsulation.

En culture de fraise, il est possible que le thrips *F. occidentalis* soit repoussé par le thym, la sarriette et/ou l'origan. Cependant, les résultats obtenus avec ces plantes dans le projet REPULSE sont trop variables pour qu'une conclusion puisse être tirée. Néanmoins, les travaux mis en œuvre dans le projet ont permis de valider la faisabilité d'une stratégie dans laquelle les plantes répulsives sont placées dans des pots suspendus sous les gouttières de fraisier, avec un pot tous les trois mètres. Une fois que des plantes repoussant *F. occidentalis* auront été clairement identifiées, l'effet de ce type de stratégie sur le niveau d'infestation des cultures de fraise par *F. occidentalis* pourra être évalué en appliquant la méthodologie développée dans le projet REPULSE.

Lorsque des stratégies de protection des cultures légumières contre les thrips, les pucerons et les mouches reposant sur l'utilisation de plantes répulsives auront été validées, une évaluation technico-économique pourra être effectuée avant un transfert chez les producteurs. Lorsque cette phase de transfert sera abordée, il sera nécessaire d'accompagner le développement des stratégies au-delà d'une simple démonstration de leur intérêt, de leur utilité ou encore de leur efficacité. Pour cela, il faudra en effet lever les trois grands types de freins identifiés dans le projet REPULSE (Picault, 2024a).

Il y a d'abord des freins de nature symbolique, qui convoquent à la fois la question de la définition de la plante de service et la question du sens et de la valeur sociale attribuée à leur mise en œuvre. Les connaissances scientifiques, techniques et empiriques sont encore globalement lacunaires, d'autant plus que les plantes ne sont pas encore identifiées et/ou sont encore en cours d'évaluation. Seule une minorité de professionnels se sont déjà très concrètement penchés sur l'intérêt des plantes répulsives dans la lutte contre les ravageurs. Les pratiques culturales déjà mises en œuvre induisent, en effet, plus ou moins de familiarité avec l'idée même d'utiliser les plantes comme ressources. L'écart de discours entre (i) les producteurs qui ont déjà expérimenté l'utilisation de plantes de service et qui disposent d'un capital connaissance/compétences et (ii) les producteurs qui n'en ont qu'une vision théorique est révélateur du poids de l'expérience dans la constitution d'une opinion sur les plantes répulsives. Ce constat milite pour une meilleure intégration des producteurs tout au long des processus d'innovation permettant ainsi de repérer les leviers les plus efficaces tout en associant plus étroitement le point de vue professionnel.

Il y a ensuite des freins techniques en rapport avec la mobilisation de compétences spécifiques et la culture professionnelle. La perception de l'innovation est dépendante de l'évaluation du rapport entre investissement nécessaire (en temps, en matériel, en argent), risques encourus (économiques, techniques, agronomiques, sociaux) et bénéfices escomptés sur une échelle de temps plus ou moins importante (à court, moyen et long termes). C'est alors le niveau d'autonomie perçu ou réel qui semble constituer le facteur le plus favorable au changement. *A contrario*, les contraintes économiques (le niveau d'endettement par exemple), la pression sociale peuvent faire obstacle à l'engagement alors même que la réflexion est par ailleurs très présente. Le positionnement se construit également autour de la perception des ressources disponibles, de son propre capital social et de la capacité à maîtriser les enjeux du changement.

Il existe enfin un ensemble de freins contextuels en lien avec la réception de la proposition « plante répulsive » et sa mise en œuvre effective. Le contexte économique, technique et réglementaire peut se révéler plus ou moins favorable au développement de ces stratégies. Elles restent assez étroitement dépendantes de facteurs qui échappent aux concepteurs et promoteurs de solutions à base de plantes répulsives. Il existe donc une dimension politique pour faire émerger la « proposition plante répulsive » et la crédibiliser auprès des producteurs au-delà même de la question de son efficacité.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Sébastien Picault : rédaction du manuscrit ; administration du projet

Anne-Marie Cortesero : contribution à la rédaction du manuscrit

Hélène Gautier : contribution à la rédaction du manuscrit

Laurent Gomez : contribution à la rédaction du manuscrit

Juliette Pellat : contribution à la rédaction du manuscrit

Christele Assegond : contribution à la rédaction du manuscrit

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Le projet REPULSE dont les résultats sont présentés dans ce numéro a été réalisé avec le soutien financier du compte d'affectation spécial pour le développement agricole et rural.

Références bibliographiques

Picault S., Gautier H., Gomez L., Jeandroz L., Souriau J., 2024a. Repousser les pucerons en cultures de fraise et de courgette avec des plantes compagnes. Infos-CTIFL, 401:48-52.

Picault S., 2024b. Projet REPULSE (2020-2023) - Protection des cultures légumières à l'aide de plantes répulsives ou dissuasives. Compte-rendu scientifique & technique, 1-105.

Picault S., Gautier H., Gomez L., Cortesero A.M., 2021. Les composés organiques volatils au secours des plantes. Infos-CTIFL, 370:44-53.

Picault S., Quennesson S., Roy G., Davy M., Torres M., Ginez A., Schoeny A., Lambion J., Bouvard D., 2018. Utilisation de plantes de service et de kaolin pour gérer les populations de pucerons et de thrips en cultures légumières. *Innovations Agronomiques*, 63:385-397.

Pour citer cet article : Sébastien Picault, Anne Marie Cortesero, Hélène Gautier, Laurent Gomez, Juliette Pellat, *et al*.. Repulse : Mise au point et évaluation de stratégies de protection des cultures légumières contre les ravageurs basées sur l'utilisation de plantes répulsives. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.163-176. 10.17180/ciag-2025-vol107-art13

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Ascolup : Ascochytose du pois chiche, de nouveaux outils pour la gestion du risque

Anne MOUSSART[1], Coralie BRIER[1], Sophie PERROT[2], Isabelle SERANDAT[2], Claude-Emmanuel KOUTOUAN[3], Quentin LAMBERT[1], Agathe PENANT[1]

[1] Terres Inovia, 11 rue de Monceau, Paris, France

[2] GEVES, 25 Rue Georges Morel, 49070 Beaucouzé, France

[3] FNAMS, Imp. de Verger, 49800 Loire-Authion, France

Correspondance : a.moussart@terresinovia.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art14

Résumé

L'ascochytose, principale maladie aérienne du pois chiche, constitue un frein majeur au développement de la culture en France. Des travaux ont été menés afin d'améliorer la gestion du risque, en particulier sur la maitrise des sources d'inoculum primaire et la mise à disposition d'outils pour l'amélioration variétale. Une méthode de détection du pathogène est désormais disponible, publiée par l'ISTA (International Seed Testing Association) et permettant de garantir l'état sanitaire des lots de semences. La distance d'isolement d'une parcelle de pois chiche avec une autre parcelle semée l'année précédente et pouvant contenir des débris contaminés a été déterminée à une distance minimale d'1 km, ce qui pourrait aboutir à une recommandation nationale. Enfin, la diversité du pathogène a été étudiée et un test d'évaluation variétale a été mis au point, deux préalables indispensables pour la sélection et l'inscription de variétés améliorées pour la résistance à l'ascochytose.

Mots-clés : maladie aérienne, semences, résistance variétale, tests

Abstract: Ascochyta blight of chickpea: new tools for disease management

Ascochyta blight, the main airborne disease of chickpea, is a major constraint to the development of chickpea crop in France. Research has been conducted to improve risk management, particularly regarding the control of primary inoculum sources and the development of tools for breeders. A pathogen detection method, published by ISTA (International Seed Testing Association), is now available to control health status of seed lots. The minimum distance between a chickpea field and another field sown the previous year, which may contain infected debris, has been determined, potentially leading to a national recommendation. Finally, the diversity of the pathogen has been studied, and a screening test has been developed, two prequisites for the selection and registration of improved varieties resistant to ascochyta blight.

Keywords: aerial disease, seeds, genetic resistance, methodologies

1. L'ascochytose, un facteur limitant pour la filière pois chiche

Le pois chiche est une légumineuse à graines méditerranéenne de diversification des assolements céréaliers qui présente de nombreux intérêts (structure du sol, effet précédent azoté sur la culture suivante, cycle des bioagresseurs…). La production mondiale de pois-chiche est d'environ 18 millions de tonnes sur près de 30 millions d'hectares (FAO 2022). L'Asie produit 90 % de la production mondiale, mais est aussi le plus gros importateur. Actuellement, en Europe, la production concerne majoritairement les graines de type Kabuli (gros grains clairs), l'Espagne étant le plus gros producteur. Les surfaces françaises de pois chiche ont été multipliées par trois depuis dix ans en France (7059 ha

en 2012 et plus de 24 000 ha en 2023, derniers chiffres à disposition, données Agreste) montrant un fort intérêt des producteurs pour cette culture qui produit en moyenne 17 q/ha avec des potentiels atteignant 25 à 30 q/ha sans apport d'eau ni azote, et qui est majoritairement sous contrat de production. Malgré une demande croissante du marché et des prix intéressants, l'évolution des surfaces est notamment freinée par l'ascochytose, principale maladie aérienne du pois chiche. Cette maladie peut en effet occasionner des pertes de rendement parfois conséquentes et affecter la qualité du grain exigée par le débouché alimentation humaine et ainsi entrainer un risque de déclassement important.

L'ascochytose est due à un champignon ascomycète, *Ascochyta rabiei*. Les graines contaminées et les spores produites par le champignon sur les résidus de cultures malades sont à l'origine des premiers foyers d'infection primaire (Pande *et al*., 2005 ; Foresto *et al*., 2023). La maladie apparait le plus souvent sous forme de foyers au sein de la parcelle. Sur les feuilles, de petites lésions translucides évoluent en nécroses au centre desquelles de petits points noirs (les pycnides) sont visibles. Des lésions du même type mais de forme allongée apparaissent également sur les tiges, pouvant les ceinturer et provoquer une cassure. Sur les gousses, on observe également des nécroses à centre clair et pourtour noir, et contenant des pycnides. La contamination des graines se fait par propagation des gousses contaminées vers les graines en formation. Lorsque l'attaque est sévère, les graines touchées sont petites, ratatinées et/ou nécrosées. La principale méthode de lutte contre l'ascochytose est chimique, par des traitements de semences ou en végétation. Les solutions sont toutefois limitées, et cette méthode de lutte est insuffisante en cas de forte pression.

Dans ce contexte et dans un souci de réduction des intrants, il est apparu indispensable de progresser sur les leviers agronomiques et génétiques. Pour cela, différents acteurs de la filière pois chiche se sont mobilisés autour d'un projet commun, AsCoLuP (Ascochyta Colletotrichum Lupin Pois chiche : projet lauréat de l'appel à projet CASDAR innovation et partenariat 2019, coordonné par Terres Inovia et d'une durée de 4 ans 2020-2024) qui avait pour objectifs de mettre à disposition des producteurs des connaissances ainsi qu'un itinéraire technique adapté, afin d'améliorer la gestion des principales maladies du pois chiche et du lupin, en production de semences comme de consommation. Dans le cas du pois chiche, les faits marquants concernent la gestion des sources d'inoculum primaire et la mise à disposition d'outils pour l'amélioration variétale.

2. Une méthode de détection du pathogène dans les semences, publiée par l'ISTA

La semence constitue le principal mode de conservation d' *A. rabiei* et est à l'origine des foyers d'infection primaire. Le champignon pourrait se maintenir plus de 5 ans dans la graine sous forme de mycélium et/ou de pycnides (Kaiser, 1997). La contamination de la plantule à partir de la graine se fait par contact avec les tissus contaminés lors de la germination (Dey et Singh, 1994). Lorsque les conditions sont favorables, le champignon peut se propager rapidement dans toute la parcelle à partir des plantules malades en quelques semaines voire en quelques jours (Kimber *et al*., 2007). Des taux d'infection des semences de 0,01 à 0,1 % suffiraient à occasionner des dégâts très importants. L'utilisation de semences saines est donc essentielle. En France *A. rabiei* fait actuellement l'objet d'une certification volontaire avec un seuil également fixé à 0,3 % (3 ‰) de semences contaminées. Jusqu'à présent, la méthode sur milieu gélosé utilisée manquait de données de validation, il est apparu indispensable de disposer d'une méthode de détection standardisée et validée et de la porter à l'international via l'ISTA (International Seed Testing Association).

2.1. Validation de la méthode de détection

La méthode d'incubation sur milieu gélosé utilisée jusqu'à présent pour détecter le pathogène a été privilégiée. Afin d'être validée par l'ISTA, elle devait répondre à différents critères de performances : spécificité analytique, sensibilité analytique, robustesse, exactitude, répétabilité et reproductibilité intra et inter laboratoires.

2.1.1. Spécificité analytique

La spécificité analytique est la capacité d'un test à détecter le bioagresseur cible (inclusivité) en excluant les bioagresseurs non-cibles (exclusivité). Cette spécificité a été testée sur une collection caractérisée de 20 souches cibles et 20 souches non-cibles par comparaison des critères morphologiques obtenus sur le milieu gélosé utilisé et ceux décrits dans la littérature (aspect et couleur du mycélium, présence de pycnides, taille et morphologie des conidies). Elle a été validée avec un critère de performance de 100 %.

2.1.2. Sensibilité analytique

La sensibilité analytique est la plus petite quantité ou concentration d'un organisme nuisible qui peut être détectée de manière fiable avec une méthode d'analyse donnée. Elle correspond au seuil de détection de la méthode. La taille de l'échantillon pour une méthode de détection en mycologie étant de 400 semences, le seuil de 0,25 %, correspondant à une semence positive détectée dans 400 semences, et inférieur au seuil actuel de certification de 3 ‰ a été choisi. La sensibilité analytique a été testée sur 10 lots de 399 semences saines dans lesquels a été ajoutée une semence contaminée artificiellement. La méthode a permis de détecter 1 semence contaminée sur les 10 échantillons de 400 semences, la sensibilité analytique a donc été validée avec une performance de 100 %.

2.1.3. Robustesse

La robustesse est la capacité de la méthode à ne pas varier en fonction de petites variations des paramètres. Deux milieux ont été testés MA (malt-agar) et PDA (Potatoes dextrose agar) et deux durées d'incubation (7 et 9 jours). Aucune différence statiquement significative n'a été observée.

2.1.4. Exactitude, répétabilité et reproductibilité intra laboratoire

L'exactitude d'une méthode est la combinaison de deux critères : la capacité à ne pas faire de faux négatifs (sensibilité diagnostique) ni de faux positifs (spécificité diagnostique). L'exactitude a été testée en même temps que la répétabilité et la reproductibilité sur 3 lots (1 sain et 2 naturellement contaminés, l'un faiblement et l'autre moyennement), dont l'homogénéité a été préalablement validée. Trois répétitions de chaque niveau de contamination ont été testées pour la répétabilité et reproduites à une date différente, par des opérateurs différents pour la reproductibilité intra laboratoire. Les résultats ont été analysés, selon la norme ISO 5725, et le critère de performance a été validé avec une exactitude de 100 %.

2.1.5. Reproductibilité inter laboratoires

La reproductibilité inter laboratoires a été vérifiée par l'organisation d'un test comparatif entre 6 laboratoires nationaux et internationaux. Trois échantillons de différents niveaux de contamination (1 sain, 1 moyennement contaminé, 1 fortement contaminé) ont été envoyés, soit un total de 9 échantillons codés. Les taux de contamination ont été validés par un test d'homogénéité avant envoi et un test de stabilité en fin de tests, auxquels les résultats des laboratoires ont été comparés. L'analyse des résultats de chaque niveau a été effectuée pour chaque laboratoire au niveau quantitatif (taux d'infection des semences) à l'aide de l'outil ISTA Seed Health Toolbox et l'analyse qualitative par la méthode de Hampel (ISTA, 2025).

Les six laboratoires participants ont obtenu des résultats statistiquement identiques pour les niveaux moyen et élevé. Une analyse globale a confirmé qu'il n'y avait pas de différence significative entre le test d'homogénéité et les résultats des participants. La reproductibilité inter laboratoires a donc été validée.

2.2. Validation du pouvoir pathogène

Un test de pouvoir pathogène sur les isolats issus de l'analyse a été développé et ajouté en option à la méthode de détection.

2.2.1. Choix du test de pouvoir pathogène

Plusieurs méthodes d'inoculation ont été comparées afin de choisir le test de pouvoir pathogène à valider. La méthode retenue consiste en un trempage de 10 min de semences prégermées, dont le germe est coupé à 1 cm, dans un inoculum à 1.10^5 conidies/mL, préparé à partir de multiplication de la souche de référence d'*A. rabiei* sur milieu CSMDA (Chickpea seed meal Dextrose Agar). Les semences inoculées sont semées en terreau et incubées pendant 10 jours à 20°C à 100 % d'hygrométrie avec 12 h de lumière (Figure 1).

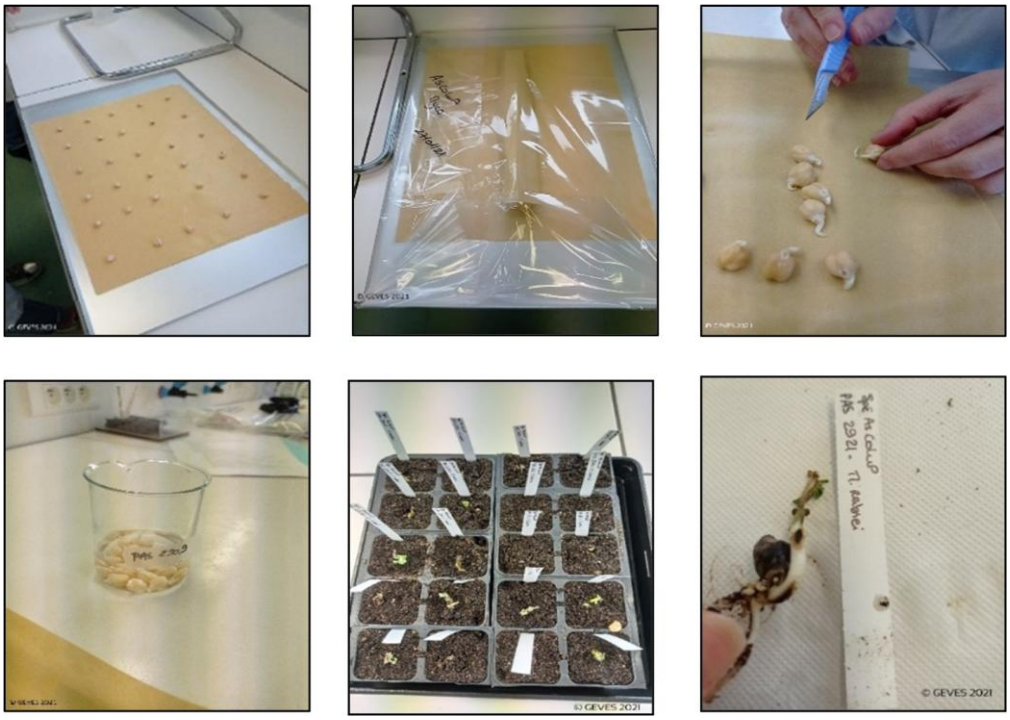


Figure 1 : réalisation du test de pouvoir pathogène© GEVES

2.2.2. Validation du test de pouvoir pathogène

Comme pour la méthode de détection, le test de pouvoir pathogène a dû être validé sur la base des critères de performances suivants : spécificité analytique (par comparaison de symptômes), sensibilité analytique (détermination de la concentration d'usage), robustesse (variation des températures d'incubation, durée et le type de lumière), exactitude, répétabilité et reproductibilité intra et inter laboratoires.

Les résultats de différents critères de performance ont permis de valider l'intégralité de la méthode. Le rapport de validation a été soumis à l'ISTA et une nouvelle règle ISTA a été publiée (ISTA, 2025). La méthode est désormais standardisée et validée à l'international.

3. Une meilleure gestion territoriale de la maladie

Les résidus de culture contaminés constituent une autre source d'inoculum primaire. Le pathogène pourrait en effet se maintenir 8 mois sur des débris et jusqu'à 20 mois sur les tiges contaminées (Nene et Redddy, 1987 ; Shadid *et al*., 2008). Les ascospores d'*A. rabiei* libérés à partir de ces résidus peuvent être transportés par le vent sur plusieurs kilomètres, et présentent donc un risque pour les cultures environnantes (Chilvers *et al*., 2007). Une gestion territoriale efficace pourrait permettre de réduire ces risques. Certains pays producteurs de pois chiche ont déjà mis en place des recommandations territoriales. Au Canada par exemple, une distance d'isolement d'au moins 500 m d'une parcelle de l'année N-1 où la culture a été infectée, avec un entourage de cultures non-hôtes pour

limiter la contamination est préconisée (Gan, 2009). En Australie, une rotation stricte des cultures sur 3 ans avant de réintroduire le pois chiche dans une parcelle, complétée par une distance d'isolement pouvant atteindre 2 km dans les zones à haut risque, est appliquée (Moore *et al*, 2015).

En France, aucune recommandation n'est faite et il est apparu nécessaire d'évaluer l'impact des distances d'isolement sur le risque d'ascochytose afin de proposer des recommandations en fonction des spécificités locales.

3.1. Impact de la distance entre parcelles

Une analyse approfondie a été menée en France sur 227 parcelles de pois chiche, en production de semences et de consommation, considérées comme les parcelles de l'année N, afin d'évaluer l'impact des distances d'isolement sur le risque ascochytose. Le statut de contamination (présence/absence d'ascochytose) des parcelles de l'année N était connu. Sur les 227 parcelles, 108 étaient contaminées. Les données RPG (PAC) des parcelles de pois chiche des années N-1 ont été cartographiées grâce au logiciel QGIS (version 3.20.3) et des zones d'isolement de 500 m, 1 km, et 2 km ont été matérialisées autour des parcelles de l'année N-1. Les distances de 500 m et 2 km ont été sélectionnées car elles correspondaient aux recommandations déjà mises en place au Canada et en Australie. La distance de 1 km a été expérimentée car elle est intermédiaire aux deux précédentes et permet de rajouter un troisième point de comparaison.

Ensuite, les 227 parcelles de l'année N ont été cartographiées en fonction de leur position par rapport à ces zones d'isolement (Figure 2). De ce fait, les parcelles de l'année N, contaminées ou non – à l'intérieur ou l'extérieur d'une zone d'isolement ont été identifiées (Tableau 1). Une régression logistique a été appliquée pour quantifier l'effet des distances sur la réduction du risque ascochytose. Cette méthodologie a permis d'explorer la pertinence de ces distances dans la prévention de la maladie, en mettant en relation les distances d'isolement avec la présence de la maladie.

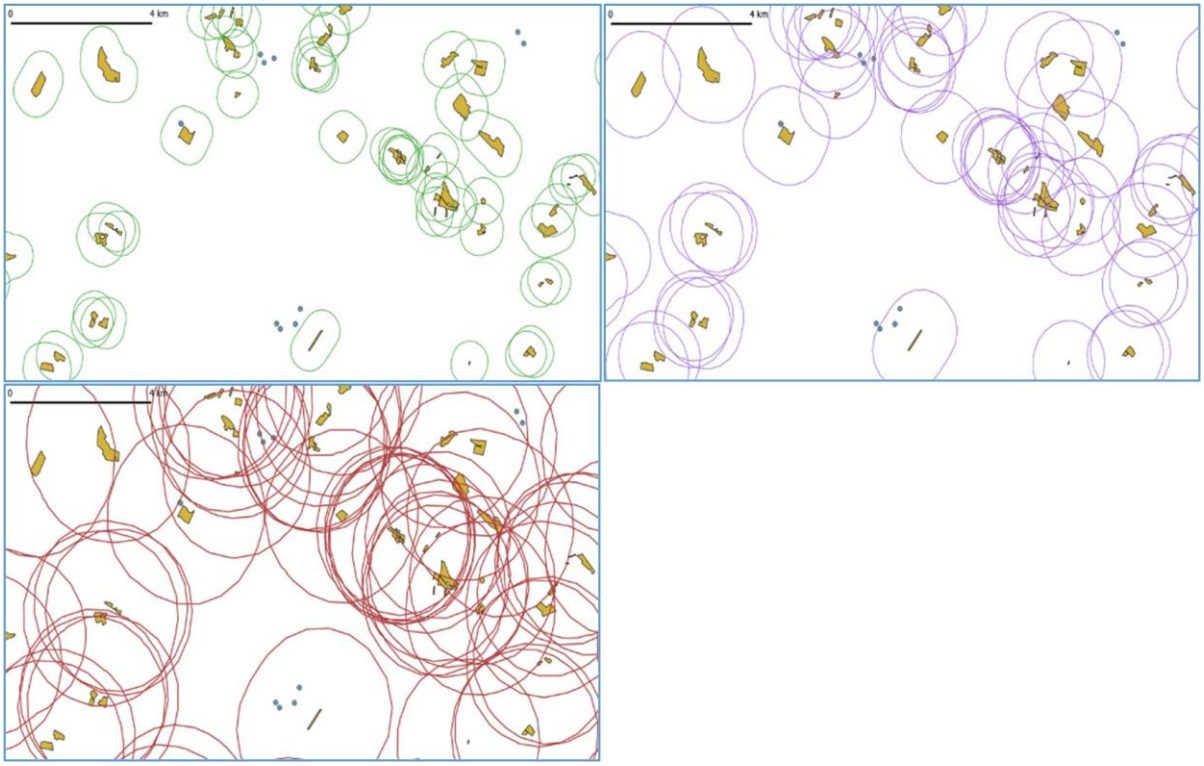


Figure 2 : Exemples de cartographie via le logiciel QGIS (3.20.3). Les parcelles de l'année N-1, issues des données RPG sont en orange. Les parcelles de pois chiche de l'année N sont représentées par les points. La zone d'isolement de 500 m est matérialisée en vert, celle de 1 km en violet et celle de 2 km

en rouge. L'étude a révélé que la distance entre une parcelle de pois chiche de l'année N et celle de l'année N-1 a un impact significatif sur la présence de l'ascochytose (p = 0,005). Elle indique également que le risque ascochytose est significativement réduit lorsque la distance entre une parcelle de pois chiche de l'année N et une parcelle de l'année N-1 est d'au moins 1 km (p = 0,008).

Toutefois, les données sur le statut de contamination des parcelles de l'année N-1 n'étaient pas disponibles, ce qui constitue une limite à l'interprétation des résultats.

Tableau 1 : Dénombrement des parcelles de l'année N, présentes ou non, dans une zone de 500 m, 1 km ou 2 km d'une parcelle pois chiche issue des données RPG de l'année N-1. Parcelles in = parcelles à l'intérieur de la zone ; parcelles out = parcelles à l'extérieur de la zone. Le statut ascochytose des parcelles de l'année N est indiqué

	ZONES D'ISOLEMENT					
	500 m		1 km		2 km	
PARCELLES	Contaminées	Saines	Contaminées	Saines	Contaminées	Saines
PARCELLES IN	23	22	57	38	83	78
PARCELLES OUT	85	97	51	81	25	41

3.2. Vers une recommandation nationale

Ces résultats pourraient aboutir à une recommandation nationale en France, préconisant une distance minimale de 1 km entre une parcelle de pois chiche et toute parcelle de pois chiche cultivée l'année précédente. Cette recommandation serait cohérente avec les pratiques d'autres grands pays producteurs cités précédemment.

4. Des outils pour la sélection variétale

La résistance variétale constitue la méthode de lutte la plus prometteuse. De nombreuses sources de résistance quantitative sont disponibles, plusieurs gènes/QTL de résistance ont été cartographiés et les marqueurs moléculaires associés identifiés (Sharma et Ghosh, 2016). Des programmes de sélection menés par le passé dans de nombreux pays producteurs, en Australie notamment, ont déjà permis la mise sur le marché de variétés de pois chiche améliorées pour la résistance à l'ascochytose. En France, quelques programmes de sélection ont recemment démarré, mais sont confrontés à l'absence de connaissance sur la diversité du pathogène et au manque d'outils d'évaluation, en particulier en conditions contrôlées.

4.1. Caractérisation de la diversité génétique et phénotypique

Plusieurs études ont mis en évidence une importante diversité au sein des populations d'*A. rabiei* et plusieurs pathotypes (ou races physiologiques selon les auteurs) ont été décrits à l'échelle internationale (Farahani *et al*., 2019 ; Turkkan et Dolar, 2009).

4.1.1. Mise au point d'une gamme différentielle

Afin d'étudier la diversité du pathogène, une gamme différentielle a été constituée. Un panel de 28 variétés a été tout d'abord été établi incluant 20 variétés issues de la collection de référence du CTPS (Comité technique permanent de la sélection) avec différents niveaux attendus de résistance, 7 variétés

hôtes différentiels de référence issues de l'ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas) et une variété attendue sensible.

La résistance de ces 28 variétés a été évaluée vis-à-vis de 10 isolats de référence d'*A. rabiei* acquis auprès de l'ICARDA (représentatifs des races R1, R2, R3, R4, R5, R6 et des pathotypes P1, P2, P3 et P4) (Benzohra Ibrahim Elkhalil, 2016) et de 5 isolats de la collection GEVES issus d'analyses sur semences et dont la virulence n'était pas connue. Sur les 28 variétés testées, 15 ont été sélectionnées en tant que candidates hôtes différentiels : 12 variétés observées avec un certain niveau de résistance vis-à-vis d'au moins l'un des isolats (Castor, ILC 482, ILC 3279, Twist, Eldorado, ILC 202, ILC 72, Rondo, ILC 194, Califfo, ILC 5928 et Elmo) et 3 variétés observées sensibles à tous les isolats (ILC 263, Benito et ILC 1929).

4.1.2. Constitution et caractérisation d'une core collection d'isolats français

Des isolements ont été effectués à partir de prélèvements réalisés sur des parcelles symptomatiques en 2020 et 2021 afin de constituer une collection de souches françaises. Au total, 37 isolats ont été mis en collection puis caractérisés au laboratoire sur critères morphologiques et sur gamme d'hôtes différentiels. Une core collection de souches françaises d'*Ascochyta rabiei* a ensuite été constituée sur la base des critères suivants : caractérisation morphologique sur Malt Agar (vitesse de croissance, taille des spores), origine géographique, pathogénicité/agressivité et organe de prélèvement (semence, tige, feuille ou gousse). La caractérisation morphologique n'ayant montré aucune différence significative entre isolats, 18 d'entre eux ont été sélectionnés répondant au critère d'un pouvoir pathogène positif et représentant les différentes origines géographiques et les différents organes de prélèvement (semence, tige, feuille ou gousse).

Les 18 isolats ainsi sélectionnés ont été testés sur le panel des 15 variétés candidates hôtes différentiels. Les résultats ont montré que le pathotype P4 (le plus virulent) était largement prédominant sur le territoire français avec 89 % des isolats caractérisés. Le second pathotype présent était le pathotype P1 race 3 avec 11 % des isolats caractérisés.

4.2. Méthodologie d'évaluation variétale

4.2.1. Mise au point d'un test en conditions contrôlées

Différentes modalités ont été comparées pour mettre au point le test d'évaluation de la résistance. Ces comparaisons ont été effectuées sur un panel de 15 variétés et de 8 isolats afin de sélectionner les conditions permettant de mettre en évidence des différences entre variétés et entre isolats. Un protocole spécifique a ainsi été défini, en particulier la méthode d'inoculation (pulvérisation), le stade d'inoculation (2-3 nœuds), la concentration d'inoculation (5.10^4 sp/mL), les conditions d'hygrométrie (100 % après inoculation), et le délai de lecture (environ 10 jours après l'inoculation). Une échelle de notation de 5 classes a également été établie (Figure 3).

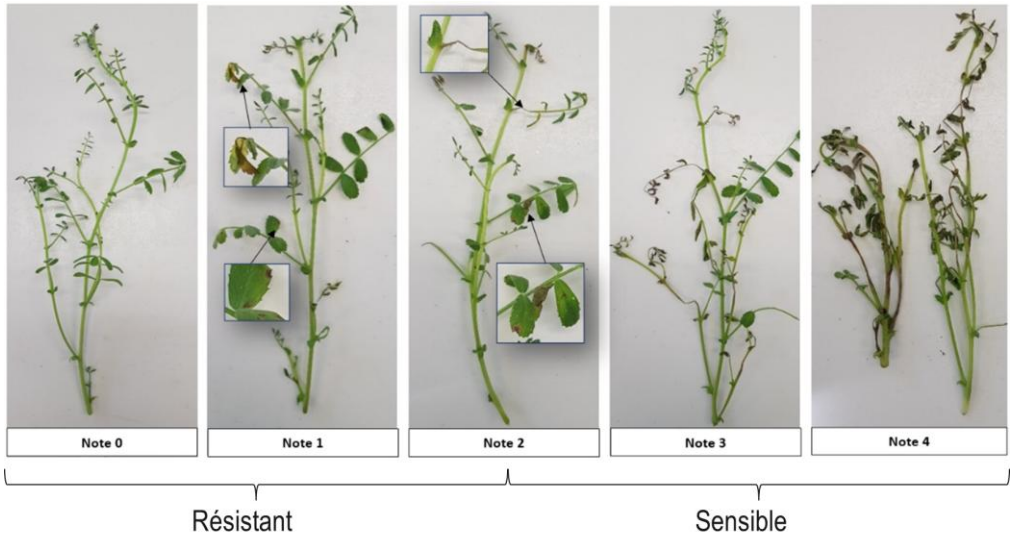


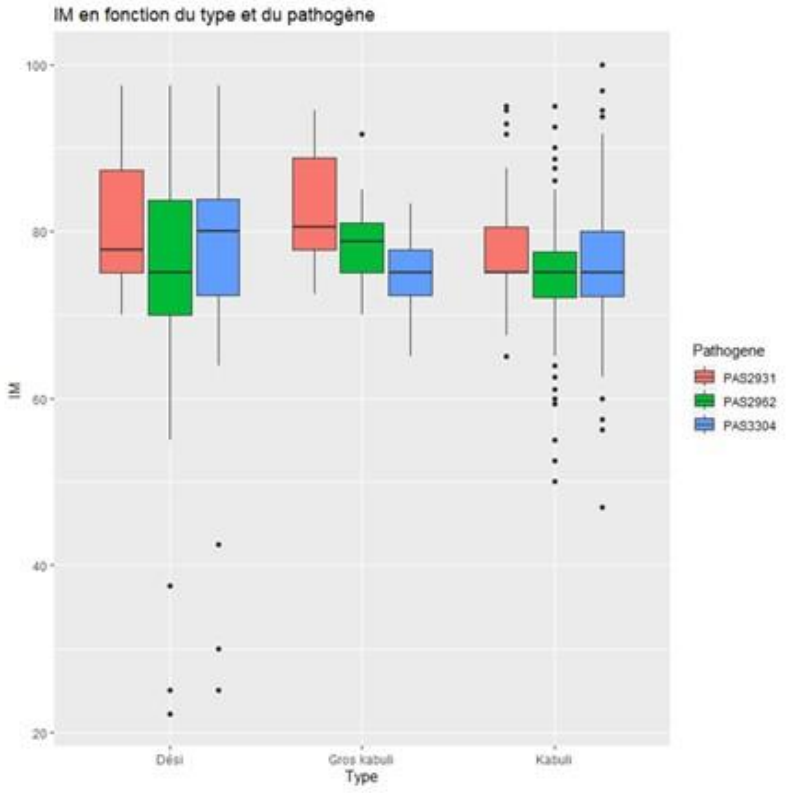
Figure 3 : échelle de notation du test de résistance du pois chiche à *Ascochyta rabiei*. Classe 0 : Absences de symptômes ou équivalent au non-inoculé Classe 1 : Présences de quelques nécroses sur tiges secondaires et feuilles (entre 0 et 5). Classe 2 : Présences de nécroses (supérieur 5) sur les tiges secondaires et feuilles. Classe 3 : Présences de nombreuses nécroses sur l'ensemble des feuilles et sur la tige principale. Classe 4 : Nécroses généralisées et ou mort de la plante.

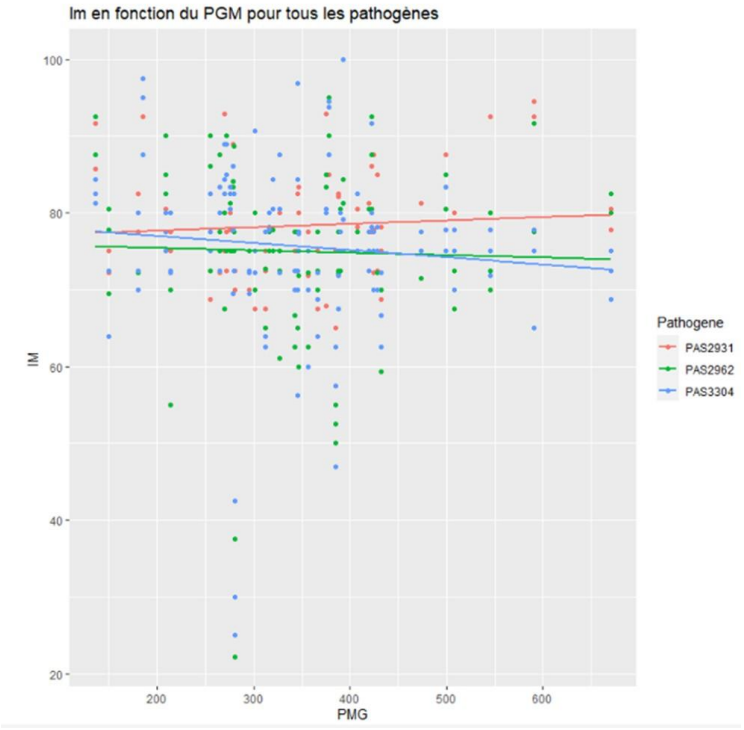
Deux variétés ont été retenues comme témoins candidats : Elmo candidat témoin résistant et Benito candidat témoin sensible.4.2.2 Caractérisation de la core collection de variétés de la collection de référence

Un panel de 45 variétés a été établi, représentatif des variétés commerciales (types Desi et Kabuli) et des différents PMG (poids des mille grains) de petit (<280 g) à très gros (<430 g). Ce panel a été testé en conditions contrôlées avec 3 isolats issus de la caractérisation : 2931 (P4), 3304 (P1 race 3) et 2962 (P1).

Les tests ont mis en évidence que ni le type (Desi, gros Kabuli ou Kabuli), ni le PMG n'avaient d'impact en conditions contrôlées sur l'indice de maladie (IM) quel que soit l'isolat testé (Figures 4 et 5). Ces résultats ne viennent pas corroborer les observations faites au champ où les variétés à grosses graines sont plus touchées par l'ascochytose. L'hypothèse est que cette différence n'est pas due à une résistance génétique mais plutôt à une différence de précocité de germination et de port de la plante au champ.

Les tests ont montré que deux variétés CDC Consul (Desi) et CDC Orion (Kabuli) étaient plus résistantes que le témoin candidat Elmo, et que deux variétés Boglarrka (Kabuli) et Barwon (Desi) étaient plus sensibles que le témoin candidat Benito. Elles ont donc été sélectionnées respectivement comme témoins résistants et témoins sensibles pour le test de résistance.





Figures 4 et 5 : Indice de Maladie (IM) des 45 variétés de pois chiche en fonction du type (à gauche) et en fonction du PMG (à droite) pour les 3 isolats d'*Ascochyta rabiei.*

4.2.2. Correlation avec le champ

Huit des variétés évaluées en conditions contrôlées l'ont aussi été au champ sur un site (Estrées-Mons, 80) en 2023 et 2024. Les incidences (% de plantes touchées) et sévérités de maladie (% de surface nécrosée) sur feuilles, tiges et gousses ont été comparées d'une part entre années et d'autre part avec

les indices de maladies obtenus en conditions contrôlées pour chacun des 3 isolats. Une corrélation significative a été mis en évidence entre années pour les notations sur gousses (R=0,77) (Figure 6). Des corrélations significatives ont également été mises en évidence avec les résultats en conditions contrôlées uniquement pour l'isolat 2962, avec les sévérités de maladie sur tiges et feuilles en 2023 (R=0,69 et R=0,66 respectivement) et avec la sévérité sur gousses en 2024 (R=0,83).

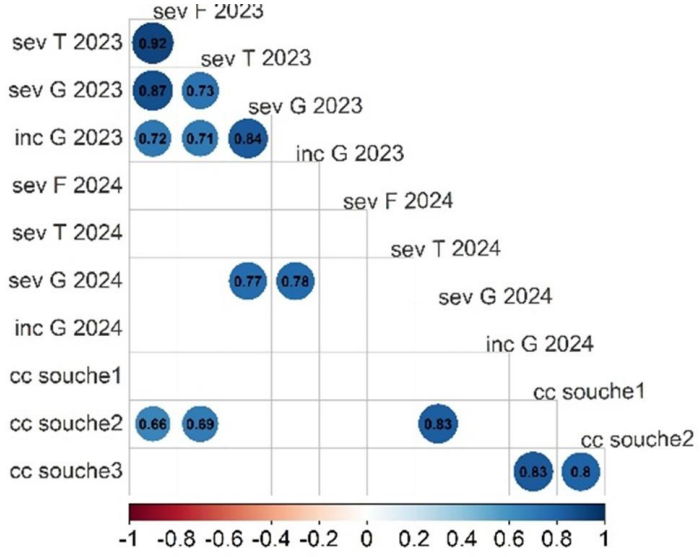


Figure 6 : Corrélations (seuil à 5 %) entre les notes d'incidences (inc) et sévérité (sev) de maladie obtenues au champ en 2023 et 2024 et les notes d'indice de maladie obtenues en conditions contrôlées (cc) vis-à-vis de 3 souches (souche 1 : 3304 ; souche 2 : 2962 ; souche 3 : 2931)

Ces essais de comparaison entre résultats au champ et en conditions contrôlées seront à reproduire afin de confirmer la corrélation entre les deux méthodes d'évaluation.

4.2.3. Test d'inscription au CTPS

Suite à ces travaux, le caractère de résistance du pois chiche à *Ascochyta rabiei* a été retenu par la Section CTPS Plantes protéagineuses pour les études de VATE (Valeur Agronomiques Technologique et Environnementale) à partir de 2025. Les variétés seront évaluées pour leur résistance en condition contrôlée vis-à-vis d'un isolat du pathotype P4, le plus fréquent en France.

5. Conclusion

Les travaux menés dans le cadre du projet Ascolup ont permis des avancées majeures pour lutter contre l'ascochytose du pois chiche. Il est désormais possible de prévenir le risque, d'une part en contrôlant la qualité sanitaire des lots de semences, et d'autre part en veillant à respecter une distance d'isolement minimale avec les parcelles de production de l'année précédente. Par ailleurs, les connaissances acquises sur la diversité du pathogène, le test d'évaluation variétale mis au point ainsi que la prise en compte du caractère de résistance à l'ascochytose par la section CTPS VATE, vont permettre d'accélérer la mise sur le marché de variétés de pois chiche améliorées pour la résistance à *Ascochyta rabiei*.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Obtention du financement : AP, QL

Gestion de projet : AP, QL, AM

Conceptualisation : AP, QL, SP, IS, CEK, AM

Investigation, méthodologie : SP, IS, CEK

Gestion de données, analyse formelle : CB, SP, IS, CEK

Rédaction – brouillon initial : AM, SP, IS, CEK, QL

Rédaction – révision et édition : AM

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a bénéficié du soutien financier du CASDAR.

Références bibliographiques

Benzohra I.E., 2016. Thèse de doctorat en sciences : Etude de *Ascochyta rabiei* agent de l'anthracnose du pois chiche variabilité pathogénique, antagoniste et sources de résistances pages : 24, 47-81

Chilvers M.I., Peever T.L., Akamatsu H., Chen W and Muehlbauer F.J., 2007. *Didymella rabiei* primary inoculum release from chickpea debris in relation to weather variables in the Pacific northwest of the United States. Canadian Journal of Plant Pathology, 29, 365-371.

Dey S.K. and Singh (1994) Seedborne infection of Ascochyta rabiei in chickpea and its transmission to aerial plant parts. Phytoparasitica 22(1):31-37

Farahani S., Talebi R., Maleki M., Mehrabi R., and Kanouni H., 2019. Pathogenic Diversity of Ascochyta rabiei Isolates and Identification of Resistance Sources in Core Collection of Chickpea Germplasm. The Plant Pathology Journal. 35(4): 321-329. https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.12.2018.0299

Foresto, E., Carezzano,M.E., Giordano,W, Bogino, P., 2023. Ascochyta Blight in Chickpea: An Update. J. Fungi 2023, 9, 203. https://doi.org/10.3390/jof9020203

Gan Y., 2009. Approche intégrée pour la lutte contre l'ascochytose du pois chiche. Fiche éditée par le Ministère de l'agriculture et de l'agroalimentaire. https://publications.gc.ca/collections/collection_2009/agr/A118-29-2009F.pdf

ISTA (2025) Rule 7-033: Detection of Ascochyta rabiei in Cicer arietinum (chickpea) seed. In : International Rules for Seed Testing. Seed Health Methods - International Rules for Seed Testing - International Seed Testing Association

Kaiser, W.J. (1997) Inter-and intranational spread of ascochyta pathogens of chickpea, faba bean, and lentil. Canadian Journal of Plant Pathology, 19, 215–224.

Kimber R.B.E., Shtienberg D., Ramsey M.D., Scott E.S., 2007 The role of seedling infection in epiphytotics of ascochyta blight on chickpea. Eur J Plant Pathol, 117:141–152

Langton, S.D., Chevennement, R., Nagelkerke, N., Lombard, B., (2002), Analysing collaborative trials for qualitative microbiological methods; accordance and concordance: International Journal of Food Microbiology, 79(3), 175–181

Moore K., Ryley K., Cumming G., Jenkins L., 2015. Chickpea : Ascochyta blight management. Australian Pulse Bulletin. http://www.pulseaus.com.au/growing-pulses/bmp/chickpea/ascochyta-blight

Nene Y.L. and Reddy M.V., 1987. Chickpea diseases and their control. In: Saxena MC. And Singh KB. (Eds) The Chickpea. Wallingford (UK): Commonwealth Agricultural Bureaux International, pp 233-270.

Pande, S., Siddique, K. H. M., Kishore, G. K., Baaya, B., Gaur, P. M., Gowda, C. L. L., Bretag, T. W. and Crouch, J. H. 2005. Ascochyta blight of chickpea (Cicer arietinum L.): A review of biology, pathogenicity, and disease management. Aust. J.Agric. Res. 56:317-332.

Shahid A.A, Husnain T. and Riazuddin S., 2008. Ascochyta blight of ckickpea: production of phytotoxins and disease management. Biotechnology Advances, 26, 511-515

Sharma, M. and Ghosh, R., 2016. An update on genetic resistance of chickpea to ascochyta blight. Agronomy 6:18.

Turkkan, M. and Dolar, F. S., 2009. Determination of pathogenic variability of Didymella rabiei, the agent of ascochyta blight of chickpea in Turkey. Turk. J. Agric. For. 33:585-591.

Pour citer cet article : Anne Moussart, Coralie Brier, Sophie Perrot, Isabelle Serandat, Claude-Emmanuel Koutouan, *et al*.. Ascolup : Ascochytose du pois chiche, de nouveaux outils pour la gestion du risque. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.177-188. 10.17180/ciag-2025-vol107-art14

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Biostim Colza : Mettre au point une méthode d'évaluation de la réponse du colza aux biostimulants en conditions de stress, du labo au champ

Cécile LE GALL[1], Françoise LE CAHEREC[2], Mohammed BENBRAHIM[3], Laurent KREMMER[3], Marie Françoise NIOGRET[2], Cécile BARON[2], Vanessa CLOUET[2], Philippe ETIENNE[4], Jean-Christophe AVICE[4], Jacques TROUVERIE[4]

[1] Terres Inovia, Avenue Lucien Brétignières – 78850 Thiverval Grignon, France

[2] UMR 1349 IGEPP, INRAE-Institut Agro Rennes Angers-Université de Rennes - 35650 Le Rheu, France

[3] Rittmo AgroEnvironnement, 37 Rue Herrlisheim - 68000 Colmar, France

[4] UMR INRAe/UCN 950 Ecophysiologie Végétale et Agronomie, Université de Caen Normandie, Campus 1, Esplanade de la Paix, CS 14032 - 14032 Caen cedex 05, France

Correspondance : c.legall@terresinovia.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art15

Résumé

L'objectif du projet était de développer une méthode d'évaluation des biostimulants sur une plante pilote : le colza d'hiver. Plusieurs approches ont été déployées. En premier lieu, un groupe d'experts a été constitué pour partager puis établir un consensus sur les indicateurs jugés les plus pertinents pour évaluer les biostimulants. En deuxième lieu, les partenaires du projet ont travaillé à la mise au point d'une méthode en conditions contrôlées visant spécifiquement à évaluer la réponse aux biostimulants en conditions de stress. Cette démarche a ensuite été déclinée pour la mise au point d'un protocole en conditions de plein champ. Enfin, le projet s'est penché sur la mise au point d'un outil permettant d'évaluer l'efficacité de stimulation des biostimulants, basé sur l'identification de gènes candidats associés à l'activité biostimulante des produits testés. Sur la base des expérimentations menés, un pool de 13 gènes a finalement été présélectionné.

Mots-clés : biostimulant, stress abiotique, déficit hydrique et nutritionnel, suivi physiologique, profilage transcriptomique

Abstract: Biostim Colza: Developing a method for evaluating the response of rapeseed to biostimulants under stress conditions, from the lab to the field

The projects'goal was to develop a method for evaluating biostimulants on winter rapeseed. Several approaches were deployed. First, a group of experts was formed. The objective was above all to share expertise and then propose a list of the most relevant indicators. Secondly, the project partners worked on developing a method under controlled conditions specifically aimed at evaluating the response to biostimulants under stress conditions. This approach was then applied to the development of a protocol under field conditions. Finally, in addition to existing methods, the project focused on the development of a tool to evaluate the stimulation efficiency of biostimulants, based on the identification of candidate genes associated with the biostimulant activity of the products tested. The experimentations set up made it possible to select a pool of 13 candidate genes.

Keywords: biostimulant, abiotic stress, water stress, nutrient stress

1. De fortes attentes du monde agricole vis-à-vis de l'évaluation des produits biostimulants

1.1. Les biostimulants : de « nouveaux » intrants agricoles

Les biostimulants sont connus dans la littérature scientifique depuis les années 1970, même si la majeure partie des publications sur le sujet date d'après les années 2000 (Du Jardin *et al*, 2012) lorsque leur utilisation a commencé à croitre exponentiellement. En 2023, au niveau mondial, les biostimulants représentaient ainsi un marché de 3,64 milliards de dollars avec une croissance prévue de +10,5 %/an *a minima* jusqu'en 2032[5].

Cependant, au niveau européen, les biostimulants ne bénéficient d'une définition officielle que depuis 2019 dans le nouveau règlement 2019/1009 sur les MFSC (Matières Fertilisantes et Supports de culture) auquel ce type de produits est rattaché. Les biostimulants sont désormais définis comme des produits « qui stimulent les processus de nutrition des végétaux indépendamment des éléments nutritifs qu'ils contiennent, dans le seul but d'améliorer une ou plusieurs des caractéristiques […] des végétaux ou de leur rhizosphère ». Par cette définition, ils sont ainsi clairement séparés des produits de biocontrôle (qui visent une action directe sur les bioagresseurs ou une stimulation des processus de défense des plantes) et des engrais. Ce règlement vient aussi répondre au besoin identifié par Du Jardin *et al* (2012), qui mentionnait que « l'utilité du concept de biostimulant pourrait résider dans sa capacité de décrire une diversité d'effets induits par une diversité de substances ». Le présent règlement sur les MFSC s'est attaqué à la difficulté de la catégorisation de cette « diversité », autant dans les effets que dans les principes actifs. Il propose de les répartir en 6 catégories « fonctionnelles » et de distinguer 4 classes d'effets :

- l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs ;
- l'amélioration de la tolérance aux stress abiotiques ;
- l'amélioration des caractéristiques qualitatives ;
- l'amélioration de la disponibilité des éléments nutritifs confinés dans le sol ou la rhizosphère.

On peut noter que la deuxième catégorie portant sur la tolérance aux stress abiotiques reste très vaste. Le point commun est que la réponse de la plante à ces différents stress passe, entre autres, par des mécanismes très génériques comme ceux impliquant la régulation détoxification des ROS (reactive oxygen species).

1.2. Une utilisation croissante en grandes cultures et notamment en colza d'hiver

Le taux de croissance annuel moyen de l'utilisation des biostimulants entre 2014 à 2023, mesuré en gain de surfaces recevant au moins un biostimulant sur l'année, est de 12,5 %. L'effet principal recherché est l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs mais, l'étude note une progression de la revendication liée à une meilleure tolérance aux stress abiotiques. Historiquement présents en cultures spécialisées, les biostimulants sont désormais beaucoup utilisés en grandes cultures. Elles représentaient 64 % des surfaces ayant reçu au moins un biostimulant en 2023[6] (avec une dominance des céréales). Le marché du colza progresse lui aussi avec une augmentation de 14 %

[5] Chiffres issus de l'étude menée par Fortune Business Insight : https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biostimulants-market-100414

[6] Chiffres issus de l'étude menée par le cabinet Kynetec en 2023 - https://www.agromatin.com/agrotendances/nutrition-fertilisation/pratiques/le-marche-des-biostimulants-toujours-tire-par-les-grandes-cultures.html

entre 2022 et 2023 du nombre d'hectares ayant reçu au moins un biostimulant. Les mêmes tendances se retrouvent dans l'enquête sur les pratiques culturales en colza menée en 2024 par Terres Inovia où 10,7 % des surfaces enquêtées ont reçu au moins une application de biostimulants contre seulement 5,2 % en 2020.

Les raisons de cet engouement sont multiples et variables selon les contextes de production :

- **une tendance générale à se tourner vers des intrants biosourcés** et à faible impact (connu) sur l'environnement. De par leurs principes actifs naturels (extraits d'algues, de végétaux, etc.), les biostimulants rentrent pleinement dans cette catégorie ;
- **une volonté de s'engager dans une transition vers l'agroécologie**. De par leur mode d'action, qui vise à stimuler les processus intrinsèques des plantes, les biostimulants constituent un intrant très adapté à ce souhait de s'appuyer davantage sur les processus naturels ;
- **une suppression (ou un non-renouvellement) de plusieurs insecticides et/ou bien un choix de l'agriculteur de moins y recourir**, qui rend la gestion des bioagresseurs sur colza plus délicate et plus aléatoire et en particulier vis-à-vis des insectes ravageurs d'automne (altises et charançon du bourgeon terminal). L'intensité des dégâts est intimement liée à l'état de croissance du colza sur cette période. Ainsi, un colza avec une croissance forte et continue présente moins de dégâts à montaison, à pression en insectes identique[7]. En boostant la croissance, les biostimulants pourraient espérer réduire la nuisibilité de ces insectes de manière indirecte ;
- face à l'augmentation de l'occurrence d'épisodes climatiques délétères, les agriculteurs sont en recherche **de solutions leur permettant de « tamponner » les effets négatifs de ces aléas**. Dans ce contexte, le recours à des biostimulants revendiquant des effets positifs sur la tolérance aux stress abiotiques ou sur l'amélioration de l'utilisation des nutriments (et la croissance) pourrait faire partie des solutions envisageables.

1.3. Une validation des effets qui pose encore question

Cependant, leur efficacité est souvent remise en question car il est reconnu que la réponse de la plante à la stimulation varie en fonction de l'état de la plante (au moment et après l'application) et de son environnement. Les facteurs précis affectant cette réponse restent cependant peu connus ce qui complique leur mise à l'épreuve en expérimentations car il est difficile de cibler les conditions de production à privilégier. Pour les expérimentations conduites en conditions contrôlées, les conditions d'ambiance et de nutrition étant contrôlées, cette variabilité de réponse est plus réduite que pour les expérimentations conduites au champ. Les résultats obtenus sont donc plus constants et permettent de mieux comprendre les facteurs qui affectent la réponse aux biostimulants et donc l'efficacité des produits. Cependant, les données sont difficilement extrapolables au champ car elles ne reflètent généralement pas la variabilité possible des conditions de croissance rencontrées en parcelle agricole. Ainsi, la réalisation couplée d'expérimentations en conditions contrôlées et au champ apparaît donc incontournable, tout en cherchant à mieux optimiser ce couplage. Il s'agirait par exemple de cribler les biostimulants en conditions contrôlées sur une plus large gamme de conditions de croissance afin de pouvoir mieux cibler les contextes de production pour les expérimentations conduites au champ par la suite.

[7] Sur le sujet, cf résultats présentés sur : https://www.terresinovia.fr/-/optimiser-l-implantation-pour-lutter-contre-les-ravageurs

Outre le choix des conditions de culture se pose aussi la question des indicateurs à étudier pour évaluer l'efficacité des biostimulants. Ces indicateurs vont varier en fonction des revendications mais aussi en fonction des objectifs poursuivis : cherche-t-on à mettre en évidence l'effet du produit sur la plante en lien avec la revendication « *stricto sensu* » ou bien souhaite-t-on mieux comprendre les processus à l'œuvre pour y aboutir, et donc le mode d'action du produit ? Même si la deuxième question présente un fort intérêt scientifique, il n'est pas obligatoire d'y répondre pour évaluer l'efficacité d'un produit. Dans les deux cas, les indicateurs mobilisés visent à suivre l'effet des produits sur différents paramètres physiologiques. Les méthodes utilisées sont souvent destructives et invasives. Avec la démocratisation des nouvelles technologies de capteurs et d'imagerie non destructives, il est possible de suivre certains indicateurs en cinétique sur les mêmes plantes. Les principaux freins à l'utilisation de ces outils restent leur coût et la nécessité d'avoir du personnel formé à leur utilisation. Néanmoins, c'est un levier largement évoqué par Rouphael *et al* (2018) pour améliorer la caractérisation des effets des biostimulants, en conditions contrôlées mais aussi au champ.

En sus de l'impact physiologique des biostimulants, l'effet sur le rendement est une information demandée par les agriculteurs. En effet, l'objectif « final » de ces produits est de limiter les pertes de rendement en cas de stress ou de l'augmenter en conditions favorables. Dans les deux cas, l'agriculteur cherche à rentabiliser son investissement. Cependant, le rendement n'est pas un indicateur qui fait l'unanimité pour l'ensemble des acteurs. D'abord, parce que l'effet sur le rendement n'est pas une revendication en tant que tel. Ensuite, parce que pour d'autres intrants tels que les pesticides, l'évaluation de l'efficacité des produits n'inclut pas une évaluation de leur effet sur le rendement car celui-ci est implicitement admis au vu du lien direct entre la réduction de la nuisibilité et le rendement. Le lien de cause à effet pour les biostimulants est cependant beaucoup plus complexe et nécessiterait de reconsidérer la question.

Enfin, au-delà de l'évaluation des effets sur les plantes, des interrogations demeurent quant à l'effectivité de la stimulation en elle-même. En effet, il est possible qu'un produit entraine bien une modification physiologique de la plante mais que d'autres facteurs limitants viennent en contrecarrer les effets. Dans ce cas, le biostimulant a bien joué son rôle mais sans que cela aboutisse à des effets phénotypiques bénéfiques sur la plante. Il apparaitrait donc intéressant de disposer d'outils permettant d'évaluer l'action de stimulation *sensu stricto* par un suivi du métabolome, protéome ou transcriptome de la plante. Un tel suivi permettrait de réaliser un large screening de biostimulants avec des mesures réalisables rapidement et à coût raisonnable. Cependant, l'interprétation des données en lien avec les effets attendus du biostimulant reste complexe (Franzoni *et al*, 2022).

2. Les approches mobilisées pour faire évoluer les méthodes existantes d'évaluation

2.1. Sollicitation d'un groupe d'experts afin de valoriser les connaissances et expériences

Au démarrage du projet, il n'existait pas de référentiel au niveau français pour évaluer l'efficacité d'un biostimulant vis-à-vis de la (ou des) revendication(s) portée(s) par le fournisseur. Depuis 5 à 10 ans, différents acteurs du monde agricole se sont néanmoins engagés dans l'évaluation de ces produits, en mobilisant leur champ de compétences et de connaissances respectifs. Une expertise « grise » a ainsi émergé mais sans qu'elle soit partagée. **Le premier des objectifs du projet Biostim Colza était donc de mobiliser et valoriser cette expertise afin d'aller vers une méthode d'évaluation structurée et consensuelle**. Des questions émergeaient sur les méthodes de suivi et les modes opératoires de mesure qui, en l'absence de référentiel officiel, n'étaient pas homogènes parmi les acteurs mobilisés. En outre, il apparaissait intéressant d'intégrer dans ces analyses les nouvelles technologies d'imagerie afin de compléter (voire substituer) des méthodes de suivi plus « classiques ».

Dans le cadre du projet, un groupe de 14 experts a été constitué, composé de représentants du monde de la recherche (6), du développement (4) et des firmes productrices de biostimulants (4). Ces acteurs n'étaient pas forcément spécialistes de la culture du colza car pour l'identification des revendications et la réflexion à mener sur le choix des indicateurs, cela n'était pas indispensable. Les objectifs de ce groupe étaient de :

- identifier le périmètre des revendications couvertes dans le cadre du projet (en faisant au maximum en lien avec le nouveau règlement européen 1009/2019 mais qui était encours en cours d'élaboration) ;
- lister, pour chaque revendication, les indicateurs pertinents à retenir et définir les modes opératoires à mettre en œuvre. Pour cette dernière étape, le rôle du groupe d'experts a été plus limité car le mode opératoire est assez spécifique de l'espèce considérée et l'expertise conjointe des 4 partenaires du projet a été d'avantage mise en avant. L'ambition était *in fine*, pour chaque indicateur retenu, de rédiger une fiche présentant l'indicateur et la (ou les) méthode(s) de mesure associée(s) (spécifiquement sur colza).

2.1.1. Liste des revendications ciblées

Le premier travail dans le cadre du projet a été de recenser l'ensemble des revendications, et d'en proposer une liste restreinte sur laquelle le groupe d'expert pourrait se focaliser. Au final, il a été choisi de faire un focus sur 4 revendications :

- amélioration de la nutrition ;
- amélioration de la tolérance aux stress abiotiques ;
- amélioration de la croissance et du développement ;
- amélioration de la qualité

Si l'on compare ces revendications à celles finalement retenues dans le règlement européen 1009/2019 entré en application en 2022, les revendications « amélioration de la nutrition », « amélioration de la qualité » et « amélioration de la tolérance aux stress abiotiques » sont communes, ce qui montre que le travail réalisé est cohérent avec ledit règlement. La revendication « amélioration de la croissance et du développement » n'apparaît pas en tant que tel, mais elle est intégrée dans la revendication « amélioration de la nutrition ». Dans le cadre du projet, pour la revendication « tolérance aux stress abiotiques », il a été décidé conjointement avec les experts de restreindre les discussions à deux stress uniquement (stress hydrique et stress nutritionnel, qui étaient par ailleurs ciblés dans les autres actions du projet).

2.1.2. Choix des indicateurs

Pour chaque revendication, il a été choisi un ou plusieurs indicateurs permettant de pouvoir vérifier la revendication au cours d'essais menés au champ ou en conditions contrôlées. L'un des faits marquants des échanges a été la nécessité de distinguer des **indicateurs d'effet et des indicateurs de mode d'action.** Le premier groupe comprend des indicateurs qui attestent et valident l'effet du produit sur la plante, en rapport avec la revendication visée ; le second rassemble des indicateurs qui caractérisent le mode d'action du produit. A titre d'exemple, une augmentation de la biomasse permet de valider l'effet du produit en rapport avec la revendication « amélioration de la croissance ». En revanche, une augmentation de la teneur en chlorophylle permet d'avancer l'hypothèse que le produit améliore le statut azoté des plantes, ce qui aboutit ou pas à une augmentation de la biomasse. Les indicateurs du 1er groupe sont indispensables pour valider l'efficacité du produit, ceux du 2ème groupe permettent une meilleure compréhension du mécanisme physiologique. Il est à noter que pour certaines revendications comme l'amélioration de l'assimilation des nutriments, aucun indicateur d'effet n'a été proposé car aucun mode opératoire n'est aujourd'hui facilement accessible et mesurable en routine. Par ailleurs, la question de considérer le rendement comme un indicateur d'effet, quelle que soit la revendication visée,

a été longuement discutée. En effet, hormis pour la revendication « amélioration du rendement », le rendement n'est pas un indicateur direct de l'efficacité du produit. En revanche, c'est bien cet indicateur qui est regardé en priorité par l'agriculteur. Après discussions, il est proposé de ne pas le mettre en indicateur d'effet car de nombreux facteurs peuvent affecter les performances finales d'une culture, même si le biostimulant aura eu un effet visible à des stades antérieurs. La liste des indicateurs retenus pour chaque revendication est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Liste des indicateurs retenus avec le groupe d'experts

Catégorie	Revendication	Indicateur d'effet	Indicateur de mode d'action
Amélioration de la nutrition	Amélioration de l'absorption des nutriments	- Quantité de nutriment absorbé dans les tissus aériens et racinaires : biomasse x teneur - Quantité de nutriment exporté via les organes récoltés : biomasse aérienne x teneur	- Activité photosynthétique - Indice de teneurs en chlorophylles (SPAD) -Indice de teneur en azote (NBI-Multiplex) -Indice de teneur en pigments foliaires - Modification du transcriptome - Modification du métabolome
	Amélioration de l'assimilation des nutriments		
	Amélioration de l'efficience d'utilisation des nutriments	- Efficience d'utilisation : biomasse / (biomasse x teneur) - Efficience apparente de l'utilisation de l'engrais[8] - Efficience physiologique[4] - Efficience agronomique[4]	
	Amélioration de la disponibilité en éléments minéraux dans le sol	Teneurs en éléments minéraux dans le sol à l'instant t	
Amélioration de la croissance et du développement	Amélioration de la croissance des tissus aériens	Biomasse aérienne	
	Amélioration de la croissance des tissus racinaires	- Biomasse racinaire - Longueur du chevelu racinaire	
Amélioration de la productivité et de la qualité des récoltes	Augmentation du rendement	- Mesure du rendement de la culture	
	Amélioration des critères de qualité : teneur en protéines et en huile pour le colza	- Mesure des teneurs en protéines et en huile chez le colza	
Amélioration de la tolérance aux stress	Amélioration de la tolérance au stress hydrique	- Potentiel hydrique - Potentiel de turgescence foliaire - Potentiel osmotique / ajustement	
	Amélioration de l'efficience		

[8] Ces indicateurs sont définis dans la publication de Dobermann *et al*, 2007 - Dobermann, A., 2007. Nutrient use efficiency—measurement and management. In: Krauss, A., Isherwood, K., Heffer, P. (Eds.), Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for Their Adoption and Voluntary Initiatives Versus Regulations. International Fertilizer Industry Association, Paris, France, pp. 1–28. Online @ https://www.fertilizer.org//images/Library_Downloads/2007_IFA_FBMP%20Workshop_Brussels.pdf

abiotiques	d'utilisation de l'eau	osmotique - Conductance stomatique	

2.2. Elaboration de protocoles expérimentaux pour évaluer l'effet des biostimulants en conditions de stress en conditions contrôlées

Comme mentionné précédemment, il est reconnu que la réponse d'une plante à l'application d'un biostimulant est variable selon son état et les conditions environnementales mais sans que les facteurs de cette variabilité soient finement caractérisés. Pour ce faire, il faudrait disposer de données permettant d'étudier l'effet d'un produit dans différentes conditions de croissance, et notamment en réponse à différentes conditions de stress, mais il n'existe pas aujourd'hui de protocole standardisé. Cependant, l'acclimatation des plantes aux stress abiotiques est une thématique travaillée en France par différentes équipes de recherche, dont certaines incluent les biostimulants dans leurs expérimentations. **Le deuxième objectif du projet Biostim Colza était donc de mobiliser l'expertise des quatre partenaires pour élaborer un protocole expérimental d'évaluation de l'effet des biostimulants en conditions de stress**. Il a été choisi de faire un focus sur deux stress auxquels le colza est fréquemment soumis à différents moments de son cycle : le stress nutritionnel et le stress hydrique.

2.2.1. Elaboration des protocoles

Le projet s'est d'abord concentré sur l'élaboration et l'harmonisation des protocoles : choix des indicateurs et méthodes de mesure et pilotage des stress. Ils ont ensuite été testés au sein de 4 expérimentations (entre mars 2021 et juin 2022) sur un set de 4 à 9 biostimulants sélectionnés en amont par les partenaires. Deux expérimentations se sont focalisées sur le stress hydrique et deux autres sur le stress nutritionnel. Pour chaque stress, la première expérimentation dite « de référence » visait à (i) tester le protocole sur un nombre exhaustif de biostimulants et (ii) valider le schéma de pilotage du stress appliqué. La deuxième expérimentation dite « miroir » visait dans un second temps à vérifier la robustesse des résultats sur un jeu plus restreint d'indicateurs et de biostimulants. La version finale du protocole proposée à l'issue du projet a fait la synthèse des retours d'expérience des deux expérimentations.

Les réflexions engagées autour des protocoles visaient à répondre aux questions suivantes :

A quelle période du cycle du colza étudier l'effet des stress ? Les stress hydrique ou nutritionnel peuvent survenir au début du cycle du colza (de A1 à rosette), à la montaison et à la floraison. Le stade montaison - floraison est très versatile, difficile à harmoniser entre plantes cultivées en conditions non limitantes et ce d'autant plus en conditions de stress hydrique ou minéral. Il a donc été choisi dans le cadre du projet de se concentrer sur la croissance végétative du colza en sachant que la production de biomasse automnale est un bon indicateur du potentiel de rendement en fin de culture (Nelson *et al*, 2022).

Quel matériel génétique ? Bien que l'interaction entre génotype et biostimulant reste peu étudiée, il est possible que si la réponse au stress est différente en fonction du génotype, cela influence la réponse des plantes (conduites en conditions de stress) au biostimulant. Pour éviter tout biais, il a été choisi d'utiliser le même génotype, issu du même lot de semences pour toutes les expérimentations. Le choix s'est porté sur une variété pivot de nombreuses populations au sein de l'IGEPP (Institut de Génétique, Environnement et Protection des Plantes), ayant fait l'objet d'étude préalable au sein des partenaires et dont le génome est connu, ce qui facilitait les travaux d'analyses transcriptomiques prévus également dans le projet.

Quelles conditions de culture ? Pour les expérimentations focalisées sur le stress hydrique, conduites en conditions semi-contrôlées conduites sous tunnel ou en serre, les plantes ont été cultivées sur pot de volumes différents selon les expérimentations (10 L, 3-4 L), sur substrats de type terreau ; pour les

expérimentations focalisées sur le stress nutritionnel, conduites en serre, c'est un substrat inerte à base de perlite-vermiculite qui a été utilisé (pour éviter l'apport d'éléments issus de la minéralisation des matières organiques). Les solutions nutritives utilisées consistaient en du Liquoplant ou du Hoagland. Les conditions d'ambiance (éclairage, température) ont été maintenues tout au long de l'expérimentation.

Comment piloter le stress ? Les conditions d'application d'un stress (intensité ou durée) doivent permettre une réponse physiologique de la plante tout en limitant les dégâts irrémédiables. En effet, même si des biostimulants ont des revendications sur une amélioration de la tolérance aux stress abiotiques, ils ne peuvent agir que si les plantes conservent des ressources suffisantes pour pouvoir assurer une reprise lors du retour à des conditions non limitantes. Pour le stress hydrique, il a été choisi d'appliquer un arrêt d'arrosage pour atteindre progressivement une humidité du substrat de 35 % de la capacité au champ (CC), maintenue ensuite pendant une semaine avant une réhydratation à 65-70 % CC. Pour le stress nutritionnel, un arrêt d'alimentation en minéraux a été appliqué par lessivage du substrat puis via une alimentation nutritive carencée en azote (N) et en soufre (S). La carence en ces deux éléments, rencontrée régulièrement dans les conditions de production françaises, est particulièrement préjudiciable pour le colza. Cette double carence N-S a été maintenue jusqu'à observer une baisse de 30 % de la valeur d'indice de teneur en chlorophylle (évaluée par mesure SPAD) puis une reprise de la nutrition N-S a été réalisée. Dans les deux cas, une récupération post stress a bien été observée. La durée totale des expérimentations a été différente car le temps nécessaire pour atteindre les seuils de stress choisis a été variable ; mais globalement, les expérimentations portant sur le stress hydrique ont été plus longues car la déshydratation du substrat, requise pour induire le stress, a nécessité a minima une semaine alors que l'arrêt d'alimentation en minéraux a été plus rapide (seulement quelques jours).

Quels biostimulants et à quel moment les appliquer ? Le choix des biostimulants s'est fait sur la base de leurs revendications et de tests antérieurs réalisés par les partenaires du projet. Les biostimulants retenus bénéficiaient d'une homologation sur colza par action foliaire, avec des principes actifs constitués d'extraits d'algues et acides aminés. Ces biostimulants représentaient les familles les plus présentes sur le marché français lors du lancement du projet. Sur les 9 biostimulants, 3 affichaient une revendication générale sur l'amélioration de la tolérance aux stress (B1 à B3), 6 ciblaient plus spécifiquement soit la tolérance aux stress hydrique (B4 à B6) soit l'amélioration de la nutrition (B4 à B9). Selon les expérimentations, 4 à 9 biostimulants ont été appliqués au stade B6 (6-7 feuilles) sur des plantes alors en conditions de stress modéré (humidité du substrat à 45 % CC ou 6 h après lessivage).

Quels paramètres suivre selon les revendications ciblées ? Le choix des paramètres s'est basé en grande partie sur le retour du groupe d'expert et a été complété par l'expertise des 4 partenaires du projet. La volonté des partenaires était de pouvoir suivre ces différents indicateurs en cinétique, afin de pouvoir évaluer comment l'action combiné du stress et des biostimulants évoluait dans le temps. Cinq points de mesure ont ainsi été définis. Il a été choisi de suivre l'effet du stress (et des biostimulants) via des indicateurs de référence, impliquant des méthodes de mesure destructives, et de nouveaux indicateurs utilisant des technologies d'imagerie non destructives. Les deux indicateurs choisis étaient le NBI (Nitrogen Balance Index – outil de mesure : Multiplex) et l'indice de teneurs en chlorophylle (outil de mesure : SPAD). La mesure des indices de teneur en chlorophylle s'est beaucoup développée en agriculture ces dernières années pour le diagnostic de stress nutritionnel mais paradoxalement il reste peu utilisé dans l'évaluation des produits biostimulants. L'indice NBI, basé sur l'estimation des teneurs en chlorophylles mais aussi en flavonol est plus récent et donc reste aujourd'hui encore moins utilisé en dehors des acteurs de la R&D. Les mesures ont été faites sur des tissus comparables (même feuille suivie au cours du temps pour les mesures non destructives ou bien feuilles à des stades de développement comparable au moment des prélèvements pour les mesures destructives).

2.2.2. Les expérimentations mises en place et les indicateurs choisis

- Expérimentations en conditions de stress hydrique

Les expérimentations (Tableau 2) ont été conduites sous tunnel (site UMR IGEPP – expérimentation « de référence ») avec 6 biostimulants ou en serre (site RITTMO-expérimentation « miroir ») avec 4 biostimulants (les 4 plus performants identifiés à l'issue de l'expérimentation dite « de référence ») à raison de 4 ou 6 répétitions par modalité. L'obtention du stress hydrique à 35 % CC pour l'expérimentation « de référence » (25 % pour l'expérimentation miroir) a été progressif (17 jours d'arrêt d'arrosage nécessaire pour l'expérimentation de référence et 15 jours pour l'expérience miroir). Chaque expérimentation comportait également des plantes cultivées en condition non limitante avec ou non application des biostimulants.

Tableau 2 : Description des expérimentations focalisées sur le stress hydrique

	Expérimentation de référence	Expérimentation miroir
Date de début	23/09/21	22/02/2022
Date de fin	24/11/21	10/05/2022
Biostimulants inclus	B1, B2, B3, B4, B5, B6	B1, B3, B4, B5

Le design des deux expérimentations est présenté en Figure 1. Comme évoqué précédemment, il a été choisi de suivre l'évolution de la réponse aux biostimulants en fonction de la modulation des conditions de stress réalisée au sein des expérimentations :

- lorsque les plantes étaient encore en état de stress modéré, à J+2 après l'application des biostimulants (P1) ; à ce stade, on n'observe pas encore d'effets physiologiques mais les biostimulants ont déjà commencé à affecter le métabolisme des plantes ;
- lorsque les plantes commencent à être en état de stress marqué (P2) ;
- lorsque les plantes sont en état de stress marqué prolongé (P3) ;
- lorsque les plantes entrent en phase de récupération, quelques heures après l'arrêt du stress (P4) ;
- à la fin de l'expérimentation, lorsque les plantes sont revenues à un état de croissance optimale (P5).

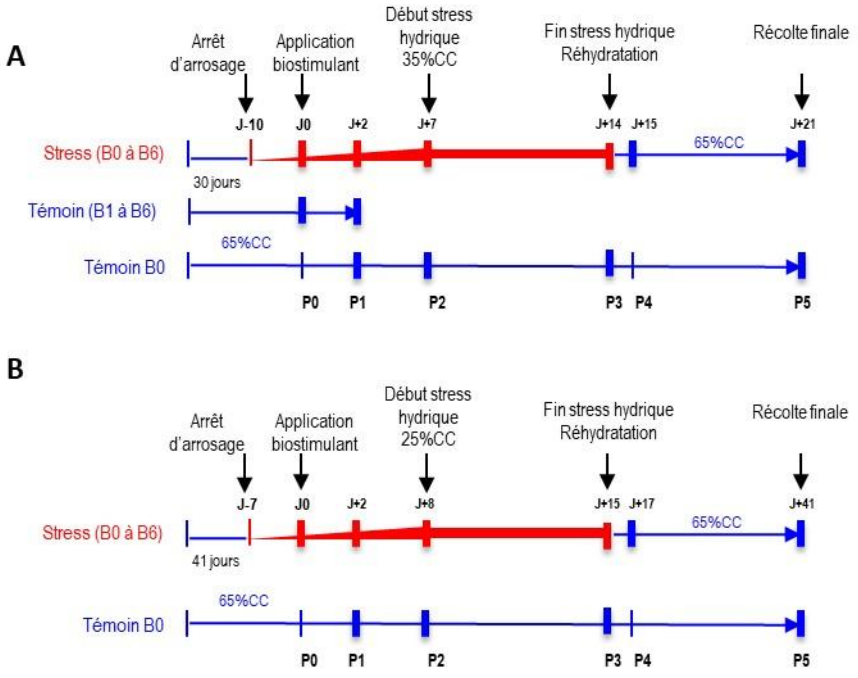


Figure 1 : Design expérimental des expérimentations « stress hydrique »

A. Expérimentation de référence

L'expérimentation a été conduite en tunnel (semis au 09/11/2021). 2 plantes cultivées sur terreau sont positionnées par airpots de 10 L. L'alimentation nutritive est assurée par arrosage automatique avec du liquoplant jusqu'à P0 et à partir de P3. 6 biostimulants (B1-B6 ; B0 = absence de biostimulant) ont été appliqués au stade 6-7 feuilles (P0). Le stress hydrique a été appliqué par arrêt d'arrosage anticipé 10 jours avant P0 pour atteindre une humidité du substrat de 35 % de la capacité au champ (P2 = début du stress). La contrainte a été maintenue pendant 1 semaine (P3 = fin de stress) puis une réhydratation a été réalisée à P3 pendant une semaine (P5). Les plantes témoin ont été maintenues à 65 % CC durant toute l'expérimentation. Des prélèvements ont été réalisés de P0 à P5 (P1, 2 jours après application des biostimulants ; P4 correspond à 10h de réhydratation). Les mesures des indicateurs physiologiques ont été effectuées sur le rang foliaire positionné sous la plus jeune feuille à P0. Les mesures de paramètre hydrique ont été effectuées sur le rang foliaire positionné sous celui utilisé pour le suivi des indicateurs physiologiques. CC = capacité au champ.

B. Expérimentation miroir

L'expérimentation a été conduite sous serre (semis au 20/03/2022). 2 plantes cultivées sur terreau sont positionnées par pot de 10 L. L'alimentation nutritive est assurée par arrosage automatique avec une solution nutritive jusqu'à P0 et à partir de P3. 4 biostimulants (B1, B3, B4, B5 ; B0 = absence de biostimulant) ont été appliqués au stade 6-7 feuilles (P0). Le stress hydrique a été appliqué par arrêt d'arrosage anticipé 7 jours avant P0 pour atteindre une humidité du substrat de 25 % de la capacité au champ (P2 = début du stress). La contrainte a été maintenue pendant 1 semaine (P3 = fin de stress). Une réhydratation a été réalisée à P3 pendant une semaine (P5). Les plantes témoin, maintenue à 65 % CC, ont maintenues avec une alimentation optimale en eau. Des prélèvements ont été réalisés de P0 à P5 (P1, 2 jours après application des biostimulants ; P4 correspond à 48h de réhydratation). Les mesures des indicateurs physiologiques ont été effectuées sur le rang foliaire positionné sous la plus jeune feuille à P0. Les mesures de paramètre hydrique ont été effectuées sur le rang foliaire positionné sous celui utilisé pour le suivi des indicateurs physiologiques. CC = capacité au champ.

Les indicateurs suivis sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Indicateurs retenus pour les expérimentations « stress hydrique »

Objectif		Indicateur	Méthode de suivi	Suivi au sein des expérimentations	
				Référence	Miroir
Caractérisation de la contrainte hydrique		Humidité du substrat	Sonde	X	X
		Détermination de la CC	Pesée automatique des pots	X	X
Suivi des effets des biostimulants	Développement	Chronophénologie	Suivi hebdomadaire de l'apparition et de la chute des feuilles	X	
	Croissance	Biomasse	Pesée (balance de précision) Compartimentation : feuilles jeunes, feuilles matures, tiges Biomasse fraiche et	X	X

			sèche (après passage en étuve – 72h – 50°C)		
	Captation lumineuse	Surface foliaire	Planimètre Compartimentation : feuilles jeunes, feuilles matures	X	X
		Indice de teneurs en chlorophylles	SPAD Compartimentation : feuilles jeunes, feuilles matures	X	X
		Indices NBI	Multiplex Compartimentation : feuilles jeunes, feuilles matures	X	
	Echanges gazeux	Conductance stomatique		X	
	Nutrition minérale	Quantités de N, C, S présentes dans les plantes	IRMS	X	
	Nutrition hydrique => tolérance au stress	Potentiel hydrique		X	
		Teneur en eau		X	X
		Contenu relatif en eau		X	X
		Potentiel osmotique		X	
		Ajustement osmotique		X	

- Expérimentations en conditions de stress nutritionnel

Les expérimentations (Tableau 4) ont été conduites en serre avec 9 biostimulants (site UMR EVA – expérimentation « de référence ») ou 5 biostimulants (site Terres Inovia- expérimentation « miroir » ; les 5 plus performants identifiés à l'issue de l'expérimentation dite « de référence ») à raison de 4 répétitions par modalité. L'obtention du stress nutritionnel a été plus ou moins rapide que pour les expérimentations conduites en conditions de stress hydrique mais a néanmoins nécessité 12 jours pour l'expérimentation dite « de référence » et 19 jours pour l'expérimentation « miroir » pour atteindre le seuil fixé à -30 % de valeur d'indice SPAD sur les jeunes feuilles (respectivement -40 % pour l'expérimentation « miroir »). Chaque expérimentation comportait également des plantes cultivées en condition non limitante avec ou non application des biostimulants. Le design des deux expérimentations est présenté en Figure 2.

Tableau 4 : Description des expérimentations

	Expérimentation de référence	Expérimentation miroir
Date de début	06/12/2021	27/01/2022
Date de fin	01/02/2022	05/04/2022
Biostimulants inclus	B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9	B1, B5, B6, B8, B9

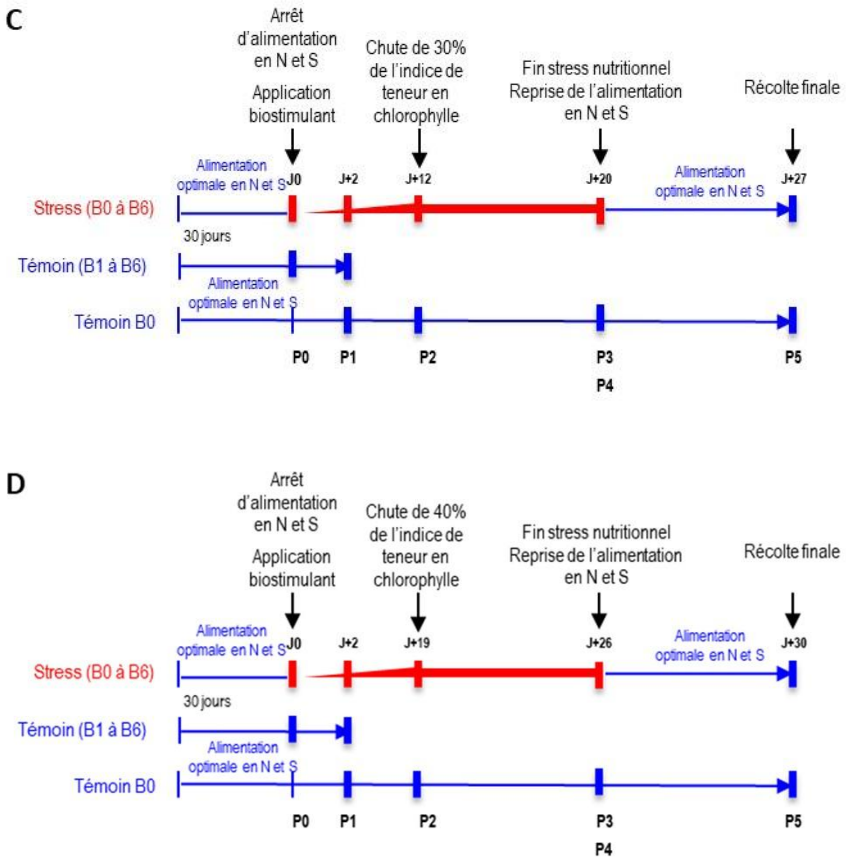


Figure 2 : Design expérimental des expérimentations « stress nutritionnel »

C. Expérimentation de référence

L'expérimentation a été conduite en serre (semis au 06/12/2021). 2 plantes cultivées sur un mélange de perlite-vermiculite. L'alimentation nutritive est assurée par arrosage automatique avec une solution de Hoagland jusqu'à P0 et à partir de P3. 9 biostimulants (B1-B9 ; B0 = absence de biostimulant) ont été appliqués au stade 6-7 feuilles (P0). Le stress nutritionnel (i.e. arrêt conjoint d'alimentation en soufre et en azote) a été appliqué par changement de solution nutritive le jour même de l'application des biostimulants, 6 heures avant, et a été maintenue jusqu'à constater une baisse de 30 % de l'indice de teneur en chlorophylle (P2 = début du stress). La contrainte a été maintenue pendant 1 semaine (P3 = fin de stress). Une reprise de l'alimentation en azote et en soufre a été réalisée à P3 pendant une semaine (P5). Les plantes témoin ont été maintenues avec une alimentation optimale en azote et en soufre pendant toute la durée de l'alimentation. Des prélèvements ont été réalisés de P0 à P5 (P1, 2 jours après application des biostimulants ; P4 correspond à 6h après la reprise d'alimentation optimale en azote et en soufre). Les mesures des indicateurs physiologiques ont été effectuées sur le rang foliaire positionné sous la plus jeune feuille à P0.

D. Expérimentation miroir

L'expérimentation a été conduite en serre (semis au 27/01/2022). 2 plantes cultivées sur un mélange de perlite-vermiculite. L'alimentation nutritive est assurée par arrosage automatique avec du solution modifiée de Hoagland jusqu'à P0 et à partir de P3. 4 biostimulants (B1 ; B0 = absence de biostimulant) ont été appliqués au stade 6-7 feuilles (P0). Le stress nutritionnel (i.e. arrêt conjoint d'alimentation en soufre et en azote) a été appliqué par changement de solution nutritive le jour même de l'application des biostimulants, 6 heures avant, et a été maintenue jusqu'à constater une baisse de 40 % de l'indice de teneur en chlorophylle (P2 = début du stress). La contrainte a été maintenue pendant 1 semaine (P3

= fin de stress). Une reprise de l'alimentation en azote et en soufre a été réalisée à P3 pendant une semaine (P5). Les plantes témoin ont été maintenues avec une alimentation optimale en azote et en soufre pendant toute la durée de l'alimentation. Des prélèvements ont été réalisés de P0 à P5 (P1, 2 jours après application des biostimulants ; P4 correspond à 6h après la reprise d'alimentation optimale en azote et en soufre). Les mesures des indicateurs physiologiques ont été effectuées sur le rang foliaire positionné sous la plus jeune feuille à P0.

Les indicateurs suivis sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Indicateurs retenus pour les expérimentations « stress nutritionnel »

Objectif		Indicateur	Méthode de suivi	Suivi au sein des expérimentations	
				Référence	Miroir
Suivi des effets des biostimulants	Développement	Chronophénologie	Suivi hebdomadaire de l'apparition et de la chute des feuilles	X	X
	Croissance	Biomasse	Pesée (balance de précision) Compartimentation : feuilles jeunes, feuilles matures, tiges Biomasse fraiche et sèche (après passage en étuve – 72h – 50°C)	X	X
	Captation lumineuse	Surface foliaire	Planimètre Compartimentation : feuilles jeunes, feuilles matures	X	
		Indice de teneurs en chlorophylles	SPAD Compartimentation : feuilles jeunes, feuilles matures	X	X
		Indices NBI	Multiplex Compartimentation : feuilles jeunes, feuilles matures	X	
	Nutrition minérale	Quantités de N, C, S présentes dans les plantes	IRMS	X	X

2.3. Exploration du continuum conditions contrôlées-champ.

Les expérimentations en conditions contrôlées ne couvrant pas la variabilité des situations rencontrées au champs, il est donc nécessaire d'étudier dans quelle mesure leurs résultats sont transposables en conditions de plein champ. Afin d'étudier cette extrapolabilité, des expérimentations ont été mises en place au champ dans la suite des expérimentations conduites en conditions contrôlées décrites précédemment. Elles ont été conduites en cherchant à se rapprocher au maximum des conditions et contraintes étudiées dans ces dernières.

Le même set de 9 biostimulants a été étudié, avec une application de produits réalisé au stade 6-7 feuilles. La réponse à ces biostimulants a été évaluée dans différentes conditions de croissance. A cette fin, un différentiel d'alimentation en eau ou en minéraux (azote et soufre) a ainsi été créé. A noter que ces conditions ne garantissent pas forcément l'apparition de contraintes car des apports d'eau *via* les précipitations ou d'éléments minéraux par la minéralisation du sol peuvent survenir. Les expérimentations ont été conduites sur les mêmes stations expérimentales chaque année afin que les conditions de sol soient similaires. L'itinéraire technique global de la culture a été calqué sur les pratiques classiques observées sur la zone de production de la station expérimentale (sauf pour l'irrigation et la fertilisation azotée et soufrée). En particulier, il n'a pas été possible d'utiliser un même génotype (au contraire des expérimentations en conditions contrôlées).

Sept expérimentations ont été conduites sur 3 campagnes :

- 4 essais sur 2021-22 : 2 essais à Montesquieu Lauragais (31) sur des limons profonds et 2 autres à Bretenière (21) en sol moyennement profond. Sur chaque site, 1 essai a été réalisé avec un différentiel d'alimentation en eau et 1 autre essai avec un différentiel d'alimentation en azote et en soufre ; cependant, sur le site de Bretenière, à l'hiver 2022, l'essai conduit avec un différentiel d'alimentation en azote et soufre a subi de forts dégâts de ravageurs et a dû être abandonné en sortie d'hiver ;
- 2 essais sur 2022-23 à Montesquieu Lauragais (31), avec 1 essai mené avec un différentiel d'alimentation en eau et l'autre avec un différentiel d'alimentation en azote et en soufre ;
- 1 essai sur 2023-24 à Montesquieu Lauragais (31) avec un différentiel d'alimentation en azote et en soufre.

Malheureusement, sur l'automne 2021 et l'automne 2022, le début de cycle a été relativement pluvieux et le différentiel d'alimentation en eau n'a pas pu être obtenu sur aucun site. **L'extrapolabilité des résultats menés en conditions de stress hydrique n'a donc pas pu être étudiée dans le cadre du projet.**

Le Tableau 6 résume les conditions expérimentales mises en œuvre sur les différents essais. Il est à noter que malgré l'absence d'irrigation en début de cycle, les essais n'ont pas subi de contrainte hydrique du fait des conditions pluvieuses mentionnées précédemment.

Tableau 6 : Descriptif des modalités des essais menés au champ

Modalités	Conditions de culture	Itinéraire technique
Témoin sans biostimulant Biostimulants : B1 à B9	En conditions pluviales – pas d'apport d'azote et de soufre au semis	Itinéraire technique « classique » de la zone de production. Même itinéraire technique pour l'ensemble des modalités sauf : - Irrigation en début de cycle - Fertilisation en début de cycle - Fertilisation au printemps : adaptation de la fertilisation en fonction des différences de croissance obtenues en entrée et sortie d'hiver (*calcul effectué avec la Réglette azote cola* ®)
Témoin sans biostimulant – NS+ Biostimulants : B1 à B9 – NS+	En conditions pluviales – apport de 60 kg de N/ha et de 30 kg de S/ha au semis	

La liste des indicateurs suivis est présentée dans le Tableau 7. Le nombre d'indicateurs est plus limité qu'en conditions contrôlées en raison de l'indisponibilité de certains matériels nécessaire à la réalisation de certaines mesures. Les cultures ayant été conduites jusqu'en fin de cycle, deux indicateurs supplémentaires ont donc été suivis : le rendement et la qualité des graines.

Tableau 7 : Liste des indicateurs retenus pour les protocoles d'expérimentations conduites au champ

Objectif		Indicateur	Méthode de suivi
Suivi des effets des biostimulants	Développement	Suivi des stades	-
	Croissance	Peuplement	Comptage sur 2 x 1m linéaire
		Biomasse	Pesée (balance de précision) Biomasse fraiche et sèche (après passage en étuve – 48h – 80°C)
		Rendement	Pesée Passage en étuve pour déterminer le % d'humidité et passage au tamis pour déterminer le % d'impuretés
	Nutrition minérale	Quantités de N présentes dans les plantes	Dosage méthode Dumas
	Qualité des graines	Teneur en huile et en protéines	Méthode interne TI

2.4. Pour aller plus loin : mise au point d'un outil bio-moléculaire

Outre le suivi de l'effet des biostimulants sur la physiologie des plantes, de nouveaux indicateurs sont de plus en plus présents dans la littérature : les indicateurs moléculaires faisant notamment appel aux méthodes d'analyse du transcriptome (ensemble des ARNm issus de l'expression des gènes), du protéome (ensemble des protéines) ou du métabolome (ensemble des métabolites). Ces indicateurs permettraient de donner accès, au moins partiellement, aux modes d'action des biostimulants, à l'échelle des processus et mécanismes biochimiques. Dans le cadre du projet, le choix s'est porté sur une approche transcriptomique accessible désormais à des prix raisonnables par RNA seq (séquençage des ARN). L'avantage de cette approche est qu'elle est sans *a priori* : tous les transcrits sont séquencés. Or, comme les modes d'actions des biostimulants (notamment sous l'effet de l'environnement) restent mal connus, il apparaissait intéressant d'avoir accès à l'ensemble des gènes dont l'expression était modulée par ces produits.

Le troisième objectif du projet était donc de mettre au point un biotest basé sur l'identification de gènes candidats associés à l'activité biostimulante des produits testés**.** Ce biotest permettrait d'utiliser des différentiels d'expression génique comme indicateurs des modes d'action aboutissant à des effets phénotypiques positifs sur la plante, en particulier en conditions de stress nutritionnel et hydrique.

Pour sélectionner ces gènes, les expérimentations mises en œuvre pour valider le protocole de test en conditions contrôlées ont été mises à profit. La première étape a été d'identifier au sein des 4 expérimentations les modalités pour lesquelles les biostimulants avaient eu un impact visible et positif en conditions de stress. En effet, en l'absence d'effet physiologique avéré, et même si par ailleurs l'application du biostimulant a conduit à une modification de l'expression de différents gènes, cette modification d'expression ne peut être considérée comme « révélatrice » de l'efficacité des biostimulants.

Les profils transcriptomiques foliaires ont été réalisés pour les plantes traitées avec lesdits biostimulants ainsi que les plantes témoins non traitées, cultivées en condition de carence minérale ou déficit hydrique, mais également en conditions optimales de croissance (afin de pouvoir isoler les gènes potentiellement spécifiques de la réponse au biostimulant en conditions de stress, en comparant les profils d'expression avec les modalités conduites en conditions non limitantes). L'analyse du transcriptome a été réalisée par différentiel d'expression entre modalités avec et sans biostimulant.

Les prélèvements de feuilles ont été réalisées à P1 (début de stress / J+2 après l'application des biostimulants) et P2 (état de stress marqué). L'analyse réalisée à P1 a permis d'identifier les gènes nouvellement induits dans les feuilles soumises à un stress modéré. L'analyse à P2 a permis de suivre l'évolution de l'expression de ces gènes et d'identifier des gènes exprimés dans les feuilles soumises à un stress intense. Les gènes dont l'expression était maintenue dans le temps ont été privilégiés (avec l'hypothèse qu'un différentiel d'expression qui se maintient dans la durée serait révélateur d'un effet durable dans le temps).

La combinaison des données issues des deux points de cinétique a conduit à la sélection d'un premier pool de gènes candidats. Une seconde phase de sélection a ensuite été engagée, *via* une analyse par RT-qPCR afin i) de confirmer les résultats d'expression RNA-Seq pour les gènes sélectionnés et ii) élargir et enrichir le set d'échantillons avec d'autres modalités (biostimulants ayant eu ou non des effets significatifs et autres points de cinétique). Le set final de gènes retenus a par ailleurs été testé sur des échantillons issus des expérimentations au champ.

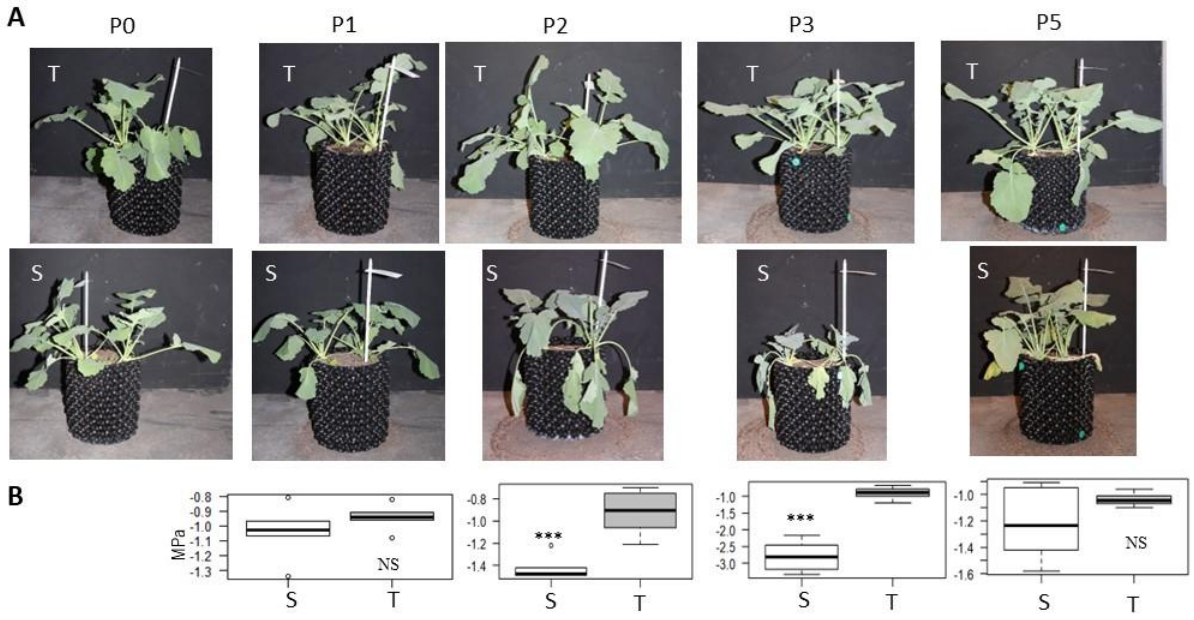
3. Résultats et mise en perspective : quelle contribution effective du projet à l'élaboration de nouvelles méthodes d'évaluation des biostimulants sur colza ?

3.1. Validation d'un protocole d'expérimentation en conditions contrôlées pour évaluer l'effet de produits biostimulants en conditions de stress

3.1.1. Expérimentations en stress hydrique

- Validation du pilotage du stress

Expérience de référence



C

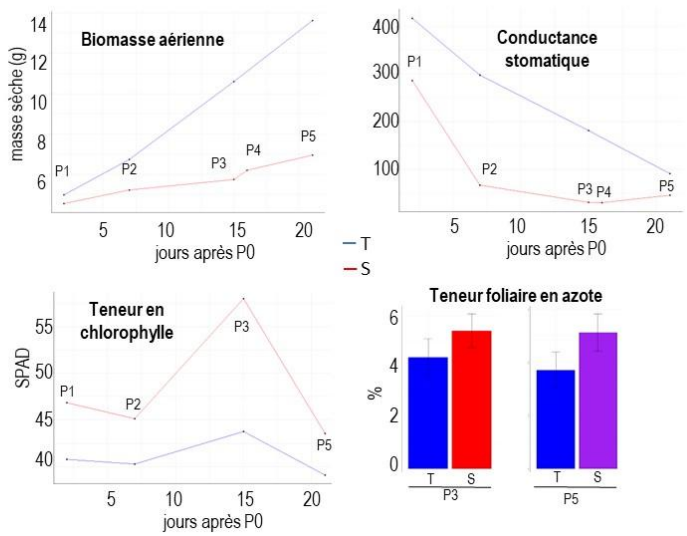


Figure 3 : Expérimentation « stress hydrique » de référence

A. Photographies des plantes cultivées en conditions optimales (T= témoin) ou sous stress hydrique (S = stress) – crédits photos : UMR IGEPP

B. Statut hydrique des plantes par mesure du potentiel hydrique.

C. Suivi cinétique de quelques indicateurs physiologiques. Effet du stress hydrique : NS = non significatif, *** p-value < 0,0001.

Le stress hydrique a été appliqué progressivement par arrêt d'arrosage. Malgré un arrêt d'arrosage de 10 jours, l'état hydrique des plantes (mesuré au travers du potentiel hydrique) au moment de l'application des biostimulants (P1) ne montrait pas de différence significative par rapport à celui des plantes témoin (Figure 3B). En revanche, sur la suite de l'expérimentation, la baisse de potentiel hydrique des plantes témoigne d'une réponse physiologique face au manque d'eau (-1.5 Mpa en début de stress à P2 puis – 2,7 MPa en fin de stress à P3 – cf Figure 3A). La phase de réhydratation a permis aux plantes ayant subi la contrainte de revenir à un statut hydrique similaire aux plantes témoin (potentiels hydriques similaires à P5). Le déficit hydrique a également provoqué une fermeture progressive des stomates, un enrichissement des feuilles stressées en chlorophylle et des changements du statut azoté. L'ensemble de ces changements témoignent d'une réponse physiologique avérée de la plante en réponse au manque d'eau avec un ralentissement de la croissance provoquant une perte de 50 % de la biomasse aérienne en fin d'expérimentation (Figure 3C).

Expérience miroir

A



B

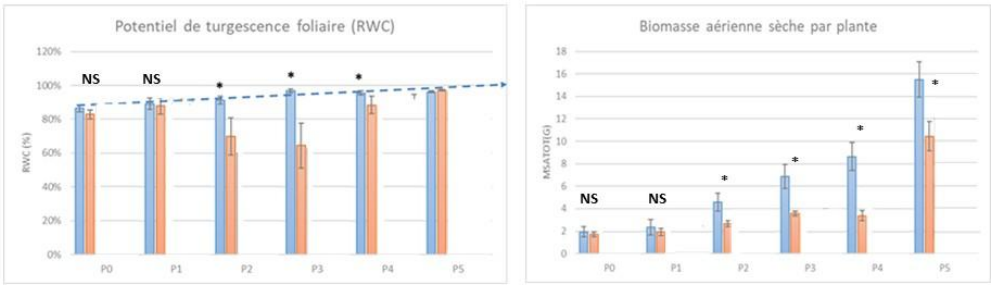


Figure 4 : Expérimentation « stress hydrique » miroir – crédits photos : Rittmo AgroEnvironnement

A. Photographies des plantes cultivées au cours de l'expérimentation

B. Suivi cinétique de quelques indicateurs physiologiques. Effet du stress hydrique : NS = non significatif, * p-value < 0,05.

Le stress hydrique a été appliqué progressivement par arrêt d'arrosage, comme pour l'expérimentation de référence. Malgré un arrêt d'arrosage de 7 jours, l'état hydrique des plantes (mesuré au travers du contenu relatif en eau des plantes) au moment de l'application des biostimulants (P1) ne montrait pas de différence significative par rapport à celui des plantes témoin (Figure 4). En revanche, l'évolution de cet indicateur montre que sur la suite de l'expérimentation, les plantes subissant la contrainte hydrique, ont bien subi une modification significative de leur état hydrique par rapport au témoin. La phase de réhydratation a permis aux plantes ayant subi la contrainte de revenir à un statut hydrique similaire aux plantes témoin (contenus relatifs en eau similaires à P5) mais avec néanmoins un déficit de biomasse qui reste marqué (Figure 4B).

- Effets physiologiques des biostimulants

L'application des biostimulants a eu des effets ponctuels sur certains des indicateurs suivis, notamment les biomasses mesurées à P2 et P4 (Tableau 8). Sur les 6 biostimulants testés, B1 semble avoir des effets génériques car a impacté plusieurs indicateurs.

Expérimentation de référence

Tableau 8 : Synthèse des effets physiologiques observés suite à l'application des biostimulants

Indicateurs			Biostimulants sur lesquels un effet physiologique a été observé					
			B1	B2	B3	B4	B5	B6
Suivi du développement	Jeunes feuilles	Surface foliaire	P4				P4	
		Biomasse	P4	P4			P2	
	Tiges	Biomasse	P2	P2	P2	P2	P2	
Statut hydrique	Contenu relatif en eau Potentiel hydrique		P2			P2 P2		

Les indicateurs impactés par la présence de biostimulants (B1 à B6) sont indiqués avec la mention du point de cinétique (P1 à P5).

Expérimentation miroir

L'application des biostimulants n'a pas eu d'effet sur les différents indicateurs suivis.

3.1.2. Expérimentations sous stress nutritionnel

- Validation du pilotage du stress

Expérimentation de référence

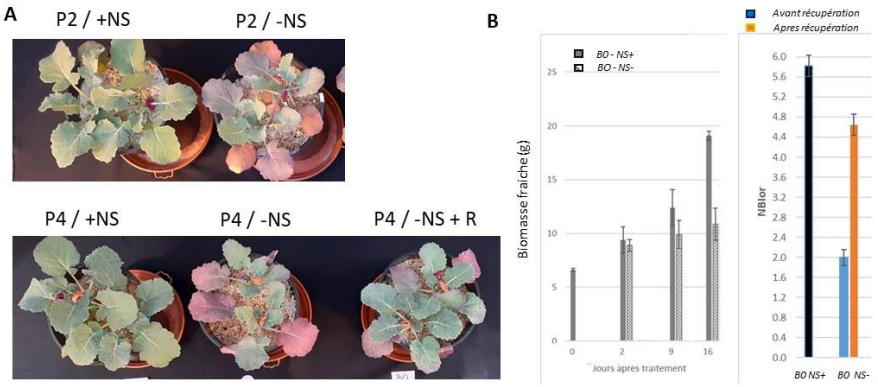


Figure 5 : Expérimentation « stress nutritionnel » de référence

A. Photographies des plantes cultivées au cours de l'expérimentation – crédits photos : UMR EVA

B. Suivi cinétique de quelques indicateurs physiologiques (biomasse, indice NBI) : NS = non significatif, * p-value < 0,05.

Le stress nutritionnel a été appliqué par lessivage du substrat (pour éliminer les minéraux présents) puis dans la même journée par arrêt d'alimentation en azote et en soufre. Comme pour les expérimentations menées sur le stress hydrique, l'effet du stress sur les plantes au moment de l'application des biostimulants (P1) ne montrait pas de différence significative par rapport à celui des plantes témoin (Figure 5). En revanche, sur la suite de l'expérimentation, la baisse de vitesse de croissance est visible (cf Figure 5A) et significative, au travers des indicateurs de biomasse et de NBI. La phase de réhydratation a permis aux plantes ayant subi la contrainte de revenir un indice NBI proche de celui du témoin (Figure 5B). L'ensemble de ces changements témoignent d'une réponse physiologique avérée de la plante en réponse au manque de nutriments.

Expérimentation miroir

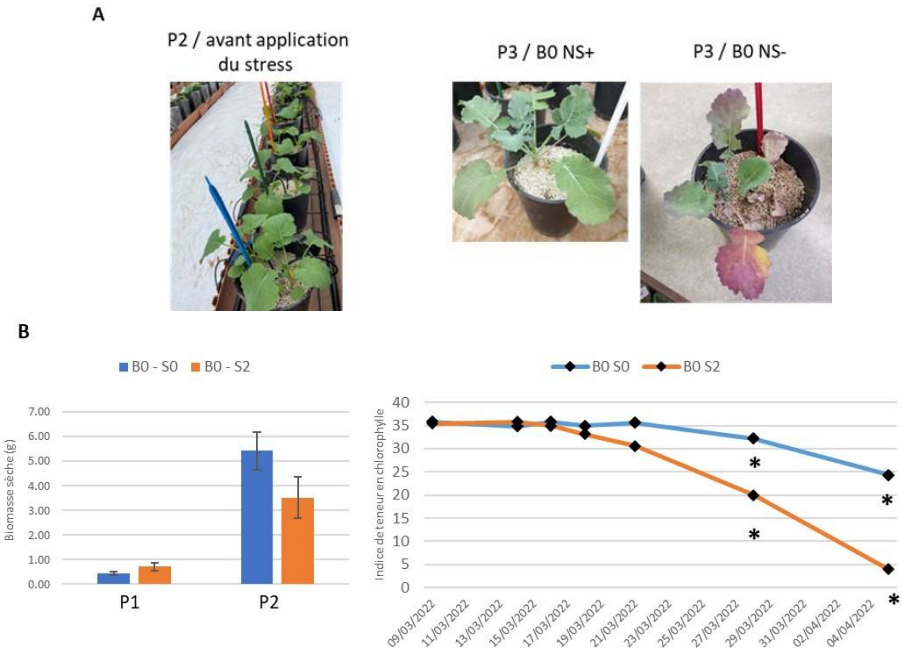


Figure 6 : Expérimentation « stress nutritionnel » miroir

A. Photographies des plantes cultivées au cours de l'expérimentation – crédits photos : Terres Inovia

B. Suivi cinétique de quelques indicateurs physiologiques (biomasse, indice de teneur en chlorophylle SPAD) : NS = non significatif, * p-value < 0,05.

Comme pour l'expérimentation de référence, le stress nutritionnel a été appliqué par lessivage du substrat (pour éliminer les minéraux présents) puis dans la même journée par arrêt d'alimentation en azote et en soufre. Comme pour les expérimentations menées sur le stress hydrique, l'effet du stress sur les plantes au moment de l'application des biostimulants (P1) ne montraient pas de différence significative par rapport à celui des plantes témoin (Figure 6). En revanche, sur la suite de l'expérimentation, la baisse de vitesse de croissance est visible (cf Figure 6A) et significative, au travers des indicateurs de biomasse et d'indice de teneur en chlorophylle (cf Figure 6B). L'ensemble de ces changements témoignent d'une réponse physiologique avérée de la plante en réponse au manque de nutriments.

- Suivi des effets physiologiques des biostimulants

Expérimentation de référence

Dans l'expérimentation menée par l'UMR EVA, sur les 9 biostimulants regardés, 2 biostimulants (B5 et B9) ont eu des effets plus importants sur la physiologie de la plante, retranscrits au travers de différents indicateurs : biomasse et N absorbé notamment, ainsi que l'indice de teneur en chlorophylle. Ces effets sont visibles en conditions de stress marqué (P3 notamment). Deux autres biostimulants ont eu également des effets mais plus ponctuels (B1 et B5) – cf photo 1 et tableau 9.

Comme pour les expérimentations menées en conditions de stress hydrique, les différences sont principalement visibles en fin d'expérimentation.

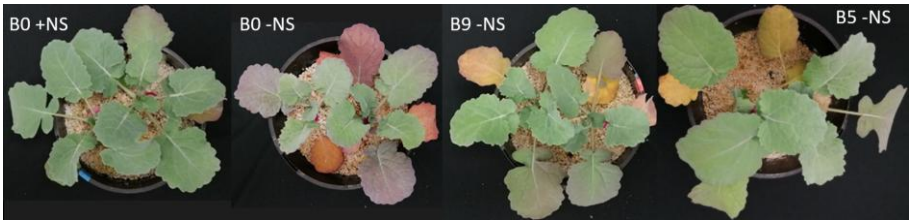


Photo 1 : Comparaison des modalités B5 et B9 au témoin conduit en conditions de croissance optimales et en condition de stress à P3. B0 : pas de biostimulant / B9 : biostimulant n°9 / +NS : sans stress azoté et soufré / -NS : avec stress azoté et soufré - crédits photos : UMR EVA.

Tableau 9 : Synthèse des effets physiologiques observés suite à l'application des biostimulants. Les indicateurs impactés par la présence de biostimulants (B1 à B9) sont indiqués avec la mention du point de cinétique (P1 à P5).

Indicateurs			Biostimulants sur lesquels un effet physiologique a été observé								
			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Développement	Chronophénologie										
Croissance	Jeunes feuilles	Surface foliaire									
		Biomasse			P3		P3				P3
	Tiges	Biomasse									
Captation lumineuse	Indice de teneur en chlorophylle				P3, P4		P3, P4, P5				P3, P4, P5
	Indice NBI		P5				P5				
Nutrition minérale	Quantité de N absorbé						P3				P3
	Quantité de S absorbé										

Expérimentation miroir

Sur l'essai mené par Terres Inovia, aucun effet significatif n'est identifié mais uniquement des tendances positives pour l'indicateur indice de chlorophylle et biomasse en faveur de B1 et B8. Comme pour les autres expérimentations, les différences sont principalement visibles en fin d'expérimentation.

3.2. Identification d'un premier set de gènes révélateurs de l'effet des biostimulants

Sur l'ensemble des biostimulants testés, peu présentait un effet significatif sur la physiologie des plantes. Pour les analyses transcriptomiques, 5 biostimulants ont cependant pu être retenus : B3-B4-B5 et B3-B5-B9 respectivement pour les expérimentations focalisées sur le stress hydrique et le stress nutritionnel. Pour ces modalités, ainsi que les témoins sans biostimulants, des prélèvements de feuilles (sur 4 répétitions) ont été réalisées au sein des expérimentations dites « de référence ».

3.2.1. Pré-sélection des gènes candidats – Analyse du séquençage des ARN

L'analyse du niveau d'expression a été réalisé en calculant le rapport du niveau moyen d'expression d'un gène dans la modalité avec biostimulant par rapport à celui dans la modalité témoin. La significativité des différentiels d'expression a été étudiée pour chaque gène via des tests de comparaison multiples, au travers des deux indicateurs : la p-value et la FDR (False Discovery Rate : p-value corrigée pour éliminer les faux positifs en cas de tests multiples). Un gène a été considéré comme différentiellement exprimé si p-value<0.05 et FDR<0.05.

L'analyse comparée des gènes foliaires différentiellement exprimés (DEG) au sein de chaque expérimentation montre des tendances assez différentes, avec notamment un plus grand nombre de DEG obtenu dans l'expérimentation de référence conduit en conditions de stress nutritionnel (Tableau 10). Cela est à mettre en relation avec plusieurs facteurs :

- l'hétérogénéité entre les répétitions biologiques pour chaque modalité (plus importante pour l'expérimentation conduite en conditions de stress hydrique) ;
- une différence de vitesse de mise en place des stress (lessivage puis alimentation carencée vs déficit hydrique progressif par déshydratation du substrat).

A noter également que les réponses géniques aux biostimulants testés semblent passer par des voies transcriptionnelles différentes ce qui aboutit à avoir peu de DEG communs à l'ensemble des biostimulants testés (voire pas du tout).

Par ailleurs, on constate que le nombre de DEG est plus faible à P2 (Tableau 11) qu'à P1 qu'au plus près de l'application des biostimulants. Cela tend à traduire une baisse de l'effet de la stimulation sur le moyen terme.

Tableau 10 : Nombre de gènes **foliaires** différentiellement exprimés (DEG) en présence de biostimulants **chez les plantes** peu stressées 2 jours après application des biostimulants (P1)

Stress étudié	Stress hydrique	Stress nutritionnel
Nombre de DEG	B3 : 262 B4 : 126 B5 : 0	B3 : 2077 B5 : 2445 B9 : 4102
Nombre de gènes commun aux différents biostimulants	0	1214

Tableau 11 : Nombre de gènes **foliaires** différentiellement exprimés (DEG) en présence de biostimulants chez les plantes stressées en conditions de stress marquées (P2)

Stress étudié	Stress hydrique	Stress nutritionnel
Nombre de DEG	B3 : 101 B4 : 51 B5 : 0	B3 : 1867 B5 : 2138 B9 : 3213
Nombre de gènes commun aux différents biostimulants	0	663
Nombre de gènes communs à ceux	84	395

identifiés en P1		

Sur la base de ces résultats, une pré-sélection de 119 gènes candidats a été réalisée. Initialement, il avait été envisagé de privilégier les gènes qui présenteraient un comportement similaire sur les différentes expérimentations, dans l'hypothèse que cela serait un gage d'une meilleure « robustesse » des tendances observées. A l'issue de l'analyse croisée des résultats RNA Seq des différentes expérimentations, 10 gènes communs avaient pu être identifiés. Néanmoins, les niveaux d'induction étaient faibles et les profils d'expression étaient différents suivant les expérimentations (certains étaient induits sur l'un des sites mais réprimés sur d'autres). Par ailleurs, l'analyse ACP réalisé sur l'ensemble des résultats a mis en évidence un effet « site » prépondérants, ce qui a conforté de ne pas retenir ces gènes dans le pool de gènes candidats.

La sélection des gènes parmi le pool de gènes différentiellement exprimé a donc été réalisée pour chaque expérimentation sur les critères suivants :

- gènes avec un différentiel d'expression visible à P1 mais également à P2 (suggérant un maintien de l'action de stimulation dans le temps) ;
- gènes avec un niveau d'induction ou de répression élevé (log2FDC >5) ;
- gènes avec un nombre de « read » (*i.e. nombre de lectures dans chaque échantillon qui chevauchent un gène*) qui soit supérieur à 1000 : car un nombre de reads trop faible sera synonyme de mauvaise amplification par RT-qPCR, qui est la dernière étape de validation des gènes.

3.2.2. Sélection finale des gènes - validation par RT q-PCR

La sélection finale à l'issue la seconde étape a finalement abouti à la sélection de 13 gènes sur les 119 pré-identifiés (Tableau 12).

La différence du nombre de gènes candidats entre les deux phases de sélection s'explique d'abord par les contraintes imposées par la validation par l'analyse en RT-qPCR qui avait imposé de sélectionner des gènes avec un nombre de « read » important (cf paragraphe précédent) puis qui ensuite a nécessité pour chaque gène identifié de pouvoir disposer d'amorces fonctionnelles. Pour l'ensemble des gènes pré-identifiés, ces seules contraintes ont amené à réduire le nombre de gènes candidats de 52 % à 60 %.

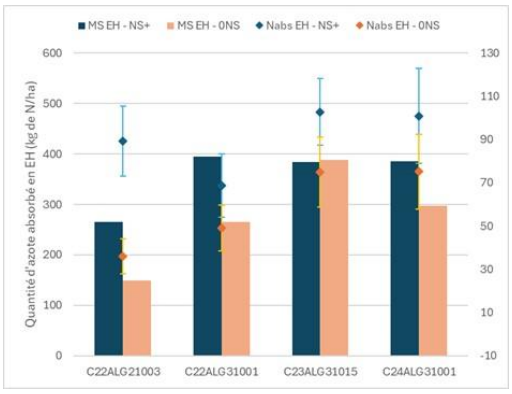
Par ailleurs, outre les modalités qui ont fait l'objet d'une analyse RNA-seq, il a été décidé d'inclure dans cette étape des modalités avec biostimulants mais pour lesquelles aucun effet physiologique n'avait été observé. L'introduction de ces nouvelles modalités visaient à pouvoir éliminer les gènes considérés comme « faux positifs ». L'hypothèse sous-jacente était que, si parmi les gènes pré-identifiés, on observait également un différentiel d'expression significatif chez ces modalités alors qu'aucun effet physiologique visible ne pouvait y être associé, alors il était probable que ce différentiel d'expression reflète bien une action de stimulation mais qui, en ne permettant pas d'aboutir à des effets physiologiques, ne puisse être considéré comme révélateur de l'efficacité des biostimulants. Cette phase d'élimination des « faux positifs » ainsi que l'élimination des multicopies de gènes ont conduit à une nouvelle réduction du nombre de gènes candidats de 65 % à 80 %.

Tableau 12 : Récapitulatif du nombre de gènes retenus après RT-qPCR

Expérimentation de référence	Stress hydrique	Stress nutritionnel
Nb de gènes sélectionnés *a priori*	54	29
Nb de gènes avec une amplification PCR effective	22	14
Nb de gènes retenus	8	5

3.3. Des données acquises qui renforcent la nécessité de mieux réfléchir le continuum labo-champ pour l'évaluation des biostimulants

3.3.1. Un différentiel d'alimentation qui a impacté la croissance du colza



En premier lieu, le différentiel d'apport de soufre et d'azote au semis a bien permis d'aboutir en entrée comme en sortie d'hiver à un différentiel de croissance significatif du colza (Figure 7 et 8) ainsi que d'absorption en azote.

Figure 7 : Quantités d'azote absorbées et biomasses en entré
d'hiver.

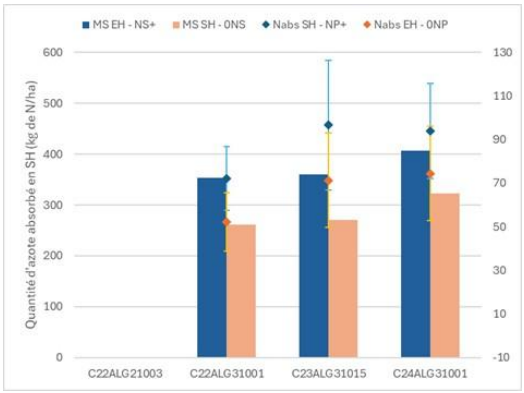


Figure 8 : Quantités d'azote absorbées et biomasses en sortie d'hiver.

3.3.2. Un impact non significatif des biostimulants

Que ce soit en entrée comme en sortie d'hiver, l'application des biostimulants n'a pas eu d'effet significatif sur la biomasse du colza ; seuls des écarts non significatifs ont pu être observés ponctuellement pour les biostimulants B4, B7 et B8 en conditions de disponibilité en azote et soufre restreinte (Figures 9 et 10) mais pas pour les modalités en conditions de disponibilité en azote et soufre renforcée.

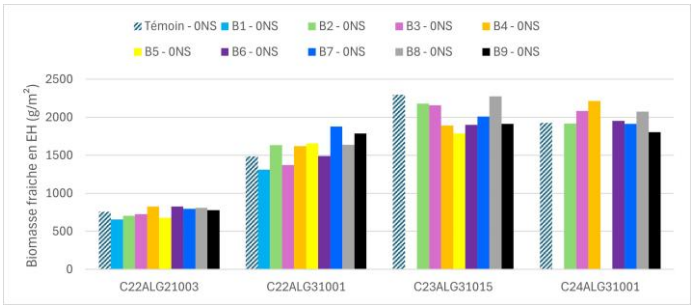


Figure 9 : Biomasse fraiche obtenue sur les essais de plein champ en entrée d'hiver

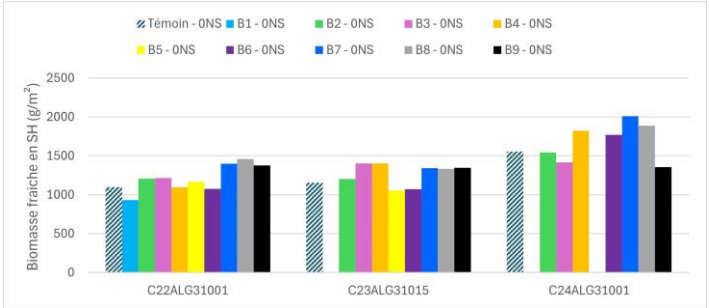


Figure 10 : Biomasse fraiche obtenue sur les essais de plein champ en sortie d'hiver

Si de tels écarts sont pris en considération, le « gain » de biomasse obtenue pour certains fertilisants conduit à une réduction de dose d'azote apportée au printemps de 15 à 30 kg de N/ha. Dans le cadre des essais, le choix a été fait de les prendre en compte pour le calcul de la dose azotée appliquée. Dans ces conditions, aucun effet sur le rendement ou sur la qualité des graines n'a été constaté.

3.3.3. Quelle cohérence des résultats entre les deux conditions d'expérimentation au champ et en conditions contrôlées ?

Les conditions d'expérimentation menées au champ ont permis de tester les mêmes biostimulants que les expérimentations en conditions contrôlées, appliqués au même stade de développement des plantes (6 feuilles), en essayant de créer un différentiel d'alimentation en eau et/ou en azote et en soufre. Aucun différentiel en eau n'a pu être induit mais un différentiel en azote a bien été obtenu (+20 à +25 kg de N/ha absorbé).

Les réponses physiologiques des plantes suite à l'application de produits biostimulants n'ont pas été marquées pour la majorité des biostimulants étudiés. Ainsi, les différences significatives mises en évidence sur certains indicateurs au sein de l'expérimentation de référence « stress nutritionnel » n'ont pas été reproduites dans les essais menés au champ. Une variabilité importante de réponse a été observée dans les essais au champ en fonction des années, qui est assez cohérente avec les différences de réponse obtenues entre deux expérimentations menées en conditions contrôlées. Parmi les 4 biostimulants B1, B5, B8 et B9 mis en avant dans les expérimentations de stress nutritionnel en conditions contrôlées, seul B8 tend à ressortir avec les tests au champ. A l'inverse, les produits B4 et B7 tendent à avoir des effets bénéfiques au champ (mais sans différences significatives) qui n'ont pas été observés dans les expérimentations en conditions contrôlées. Cela confirme les difficultés d'extrapolation entre les types d'expérimentation. Le test au champ apparaît donc comme un passage obligé pour évaluer les produits voire même, pour les sélectionner en amont. De plus, il semble essentiel de s'appuyer sur un pool d'essais diversifié (plusieurs années climatiques et plusieurs contextes parcellaires) pour évaluer dans quelle mesure la réponse au biostimulant, sur le positionnement (stade/dose) visé est régulière ou non selon les conditions environnementales.

Pour la campagne 2023/24, les 5 gènes candidats révélateurs de l'action des biostimulants en conditions de stress nutritionnel sélectionnés pour le biotest ont été suivis par RT-qPCR dans les feuilles de l'ensemble des modalités prélevées 2 jours après l'application des biostimulants. Les résultats obtenus ont mis en évidence des différences d'expression dans les feuilles ayant reçu un biostimulant par rapport à celles sans biostimulant mais qui n'apparaissaient pas cohérentes avec les effets physiologiques vus au champ. Néanmoins, avec les données issues d'un seul essai, il semble difficile de conclure et de nouveaux tests seraient à envisager pour aller plus loin.

4. Conclusions et perspectives – Prise de recul sur les méthodes proposées

L'objectif de ce projet était de bâtir une méthode d'évaluation de la réponse physiologique à l'application de produits biostimulants en conditions de stress.

Pour les expérimentations en conditions contrôlées, la gestion du stress hydrique ou nutritionnel (intensité et durée) a engendré des symptômes de stress marqués et réversibles après retour de l'alimentation hydrique ou minérale. Le set d'indicateurs a permis la gestion du stress pour vérifier que (i) le stress appliqué impactait bien les plantes, (ii) les effets associés étaient bien maintenus ou amplifiés durant la contrainte et (iii) de piloter le moment de reprise pour une reprise de croissance. Le choix des supports de culture (terreau pour les expérimentations menées en conditions de stress hydrique et mélange perlite/vermiculite pour les expérimentations en conditions de stress nutritionnel) étaient adaptés pour les modalités de stress souhaité. A noter que la déshydratation du substrat est progressive et nécessite une anticipation de l'arrêt d'arrosage des plantes pour permettre une adéquation temporelle afin de suivre un effet potentiel des biostimulants sur des plantes qui deviennent

déficientes en eau rapidement. L'application de stress nutritionnel a été plus drastique avec une étape de lessivage puis une alimentation carencée. Le choix de regarder l'effet du stress en 3 phases (stress modéré / stress prolongé donc plus marqué / levée du stress après une reprise de l'alimentation en eau et/ou en nutriments) a permis de suivre l'évolution de la réponse des plantes face aux stress et suite à l'application des biostimulants. Peu d'effets des biostimulants ont été observés ; mais à chaque fois, ces effets étaient plus marqués en P2 par rapport à P1 ; cela confirme la nécessite de regarder les effets de ces produits en condition prolongée de stress.

Concernant la mise au point d'une méthode d'évaluation en conditions de plein champ, l'instauration d'un différentiel d'alimentation en eau en fin d'été n'a pas été réussi pour 3 années sur 4 car très dépendant de la pluviométrie. Ce différentiel nécessite, sur la même parcelle, de pouvoir conduire un essai en conditions irriguées et un essai en conditions non irriguées. Ce type de test est donc à privilégier en station expérimentale. L'instauration d'un différentiel d'alimentation en azote a été effectif sur l'ensemble des essais. Un différentiel de disponibilité en nutriments se fait par différentiel d'apports en intrants, en parcelle agriculteur autant qu'en station expérimentale. Il sera d'autant plus important que la disponibilité en nutriments du sol sera faible. Dans le cadre de ce projet, l'impact du différentiel s'est maintenu jusqu'en sortie d'hiver ce qui tend à montrer que les doses de fertilisants choisies (60 kg de N/ha + 30 kg de S/ha) étaient suffisantes pour instaurer un différentiel qui se maintienne jusqu'à la sortie d'hiver. Les indicateurs de biomasse et d'azote absorbé ont i) permis de bien suivre l'impact du différentiel d'azote apporté sur les plantes et ii) d'ajuster la dose d'azote prévisionnelle à apporter au printemps en fonction du gain de biomasse obtenue. On aurait pu conserver une dose d'azote identique quelque soient les modalités et espérer dans ce cas un gain de rendement, lié au surplus de biomasse obtenu en sortie d'hiver ; l'effet du biostimulant aurait pu alors être évalué alors à « iso dose » d'azote apporté.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Avice Jean-Christophe : https://orcid.org/0000-0003-3676-8364

Benbrahim Mohammed : https://orcid.org/0009-0005-3246-6643

Clouet Vanessa : https://orcid.org/0000-0001-8541-7291

Etienne Philippe : https://orcid.org/0000-0002-4531-3874

Le Cahérec Françoise : https://orcid.org/0000-0001-9658-161X

Le Gall Cécile : https://orcid.org/0000-0002-1874-6009

Trouverie Jacques : https://orcid.org/0000-0002-1450-896X

Contributions des auteurs

Tous les auteurs et autrices ont lu et approuvé le manuscrit final.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous remercions les différentes sociétés qui ont accepté de fournir les produits à titre gracieux pour les expérimentations au champ et en conditions contrôlées : UPL, Hello Nature, Sumi Agro, Lallemand Plant Care, Timac Agro, Via Végétale, Syngenta.

Nous remercions les expérimentateurs et techniciens qui ont contribué à la réalisation et au succès des expérimentations : Marion Larroque, Nicolas Granger, Matthieu Gazzola, Baptiste Delmas pour les expérimentations au champ ; Aurélia Lomac, Aurélien Carrillo et Patrick Leconte en soutien avec les équipes serristes des unités pour les expérimentations menées en conditions contrôlées. Alain Bouchereau, Laurent Leport et Nathalie Nesi pour leurs conseils scientifiques.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a bénéficié du soutien financier du ministère de l'agriculture au titre de l'appel à projet Casdar Recherche Technologique2019.

Références bibliographiques

Franzoni, G., Cocetta, G., Prinsi, B., Ferrante, A., Espen, L., 2022. Biostimulants on Crops: Their Impact under Abiotic Stress Conditions. Horticulturae, 8, 189. https://doi.org/10.3390/horticulturae8030189

Jardin, P. du, 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation . *Biostimulants in Horticulture* 196 (30 novembre 2015): 3-14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021.

Nelson MN, Nesi N, Barrero JM, *et al*., 2022. Strategies to improve field establishment of canola: A review. Advances in Agronomy 175:133–177. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.05.001

Rouphael, Y., Spíchal, L., Panzarová, K., Casa, R., Colla, G., 2018. High-Throughput Plant Phenotyping for Developing Novel Biostimulants: From Lab to Field or From Field to Lab? Frontiers in plant science, 9, 1197. doi:10.3389/fpls.2018.01197

Pour citer cet article : Cécile Le Gall, Françoise Le Caherec, Mohammed Benbrahim, Laurent Kremmer, Marie Françoise Niogret, *et al*.. Biostim Colza : Mettre au point une méthode d'évaluation de la réponse du colza aux biostimulants en conditions de stress, du labo au champ. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.189-214. 10.17180/ciag-2025-vol107-art15

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

CERCOCAP - pilotage de la CERcosporiose de la betterave par COuplage entre modèle agroclimatique et CApteurs connectés

François JOUDELAT[1], François BRUN[2], David ROUSSEAU[3], Fabienne MAUPAS[1]

[1] ITB, 45 rue de Naples, 75008 Paris, France

[2] ACTA, 149 rue de Bercy, 75595 Paris cedex 12, France

[3] Université d'Angers, 40 rue de Rennes - BP 73532, 49035 - ANGERS cedex 01, France

Correspondance : f.joudelat@itbfr.org

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art16

Résumé

Le projet CERCOCAP a consisté à développer et à évaluer des méthodes pour mesurer ou prévoir les épidémies de cercosporiose de la betterave. Les observations du réseau de suivi biologique du territoire et des essais conduits par l'ITB (Institut technique de la betterave) ont servi à calibrer des modèles de prévision de la maladie basés sur des paramètres agronomiques et météorologiques. Différents modèles de caméras connectées ont été éprouvés au sein d'un petit réseau de surveillance. Les images de symptômes acquises et labellisées ont entraîné des algorithmes de segmentation dans l'optique de quantifier automatiquement la maladie. En prévision de l'assimilation des mesures issues des capteurs, le modèle épidémiologique a été adapté pour intégrer les observations terrain et améliorer sa précision de prédiction. Enfin, plusieurs prototypes d'outils d'aide à la décision ont été réalisés et présentés aux acteurs de la filière, avant une diffusion restreinte en 2024.

Mots-clés : Outil d'Aide à la Décision, modélisation, capteur imageur connecté, assimilation de données, cercosporiose

Abstract: Cercocap: monitoring cercospora leaf spot on sugar beet by coupling agro-climatic model and connected sensors

The CERCOCAP project consisted in developing and evaluating methods for measuring or forecasting cercospora leaf spots epidemics. Observations from the biological monitoring network and ITB trials were used to calibrate disease forecasting models based on agronomic and meteorological inputs. Various models of IoT cameras were tested within a small monitoring network. The symptom images acquired and labeled were used to train segmentation algorithms in order to automatically quantify the disease. In anticipation of the assimilation of sensor data, the epidemiological model was adapted to incorporate field observations and improve its predictive accuracy. Finally, several prototypes of decision support tools were produced and presented to the members of the sugar beet industry, before a restricted distribution in 2024.

Keywords: Decision Support Tool, modeling, imaging IoT, data assimilation, cercospora

1. Introduction

La betterave sucrière est cultivée sur environ 400 000 ha en France (Cultures Sucre, 2024). La cercosporiose est la maladie cryptogamique ayant le plus gros impact sur le rendement, jusqu'à 30 % en masse de racine et 2 points de teneur en sucre. *Cercospora beticola*, le champignon responsable de la maladie, voit son développement favorisé par des conditions chaudes et humides de plus en plus fréquentes, même dans le nord et l'ouest de la France. Les symptômes visibles se manifestent sous la forme de taches circulaires grises aux bords bruns d'environ 5 mm.

La lutte intégrée repose aujourd'hui sur un enfouissement des résidus de culture, un allongement des rotations, le semis de variétés tolérantes voire « tolérantes+ » qui sont encore plus tolérantes, un suivi fréquent des symptômes, un déclenchement des traitements fongicides selon les seuils recommandés, l'utilisation de matières actives adaptées et l'ajout de cuivre. De nombreuses menaces pèsent cependant sur l'efficacité de ces leviers : changement climatique, souches de champignon résistantes, diminution de l'arsenal phytosanitaire efficace, disponibilité des agriculteurs…

Le projet CERCOCAP vise donc à maintenir la triple performance de la culture, en acquérant et en synthétisant de la connaissance sur les déterminants agro-climatiques des épidémies afin de mieux conseiller la filière. Le projet doit notamment fournir des prévisions en cours de campagne (améliorées par un suivi automatisé de la situation sanitaire) pour maximiser la pertinence et l'efficacité des interventions phytosanitaires.

Nous nous demandons donc comment accompagner la filière betteravière dans sa lutte contre la cercosporiose via une approche conjointe de modélisation et d'observation automatisée.

Pour ce faire, 3 partenaires complémentaires sont mobilisés :

- ACTA (Association de Coordination Technique Agricole) : science des données et modélisation ;
- ITB (Institut Technique de la Betterave) : fournisseur de données, connaissance de la filière et coordination ;
- UA (Université d'Angers) : analyse d'image et « deep learning ».

De nombreux travaux, utilisant des approches variées, traitent déjà de la modélisation de la cercosporiose de la betterave (Marcuzzo, 2016)(Jörg)(Racca, 2004)(Racca, 2007)(Shane, 1985)(Windels)(El Jarroudi 2021)(Rossi 1995)(Rossi 1994)(Rossi)(Wolf, 2020)(Vereijssen, 2007) (Khan, 2007)(Cioni 2014) le plus souvent en contexte nord-américain, et plus rarement européen. Ces résultats ne sont toutefois pas directement transposables à la situation française : l'agressivité et la résistance des souches a évolué, la zone climatique est différente, et les moyens de lutte ne sont pas les mêmes : tolérance variétale, matières actives des fongicides, prophylaxie… Notre partenariat a également l'expertise sur la modélisation d'autres ravageurs avec des techniques variées (Brun 2017)(Gauriau 2024)(Wallach 2018)et l'assimilation de données observées(Maupas, 2021).

De même, l'utilisation de capteurs connectés en agriculture est chose courante avec les stations météo personnelles et les pièges à insectes. Toutefois, les capteurs imageurs, malgré une apparente maîtrise technologique (Bosch Field Sensor par exemple), n'ont pas encore séduit le marché des productions végétales. Côté traitement d'image, les succès du « machine learning » et du « deep learning » ne sont plus à démontrer (LeCun 2015)(Ronneberger 2015), les algorithmes ont déjà été adaptés à la détection de stress biotiques (Bauer)(Mahlein, 2016)(Hallau, 2018)(Mahlein, 2012)(Barreto, 2023). Plusieurs travaux ont déjà été conduits dans ce domaine par les partenaires (Joudelat, 2022).

Enfin, la création d'outils d'aide à la décision (OAD) est courante dans le secteur agricole pour synthétiser l'expertise acquise et la diffuser de manière interactive aux acteurs décideurs. Certains travaux de modélisation précédemment cités ont notamment été implémentés sous la forme d'OAD et mis à disposition des filières (Windels) ; toutefois aujourd'hui leur accès est restreint. Les partenaires comptent plusieurs réalisations à leur actif dans ce domaine (Alerte Maladies)(Aléa pluie) diffusées librement à plusieurs milliers de visiteurs annuels.

En lien avec l'articulation du projet, nous présentons une démarche scientifique structurée autour de 3 grands thèmes :

1. modélisation épidémiologique et assimilation de données,
2. acquisition d'images au champ et quantification automatisée des symptômes,

3. synthèse et diffusion sous la forme d'un OAD.

2. Matériels et méthodes

2.1. Données d'observation et d'expérimentation pour la modélisation épidémiologique

Les experts de l'ITB animent et contribuent chaque année au Réseau de suivi biologique du territoire (RSBT) plus connu pour son rôle d'alimentation des Bulletins de santé du végétal (BSV). Chaque année plus de 200 parcelles de betterave représentatives des pratiques des agriculteurs sont suivies de manière hebdomadaire.

L'ITB conduit également des essais thématiques en micro-parcelles afin de répondre à des problématiques précises : tolérance variétale, stratégie d'application des fongicides, …

Deux types de notations de la cercosporiose sont conduites selon les protocoles :

- notation en « fréquence » ou « incidence » selon le protocole IPM (Intensité de pression maladie) : on compte le pourcentage de feuilles ayant au moins un symptôme parmi 100 feuilles choisies aléatoirement dans la couronne intermédiaire des betteraves ;
- notation en « gravité » ou « sévérité » : on estime le rapport entre la surface touchée par la maladie et la surface foliaire totale. L'échelle va de 0 (pour 0 %) à 10 (pour 100 %).

La notation en fréquence est plus adaptée au suivi précoce de la maladie et est utilisée historiquement comme seuil de déclenchement des interventions fongicides en plaine ; tandis que la gravité est utilisée plus tardivement pour mieux comparer les dynamiques entre modalités d'un essai lorsque la fréquence sature. Les deux sources de données sont ainsi complémentaires sur le plan des variables observées, mais aussi du point de vue des covariables agronomiques disponibles.

De nombreuses variables agronomiques sont connues pour influer sur la progression de la maladie ; toutefois, leur mesure sur le terrain n'est pas forcément pratique. En général, par manque de valorisation immédiate et par gain de temps, les bases de données contiennent très peu de données sur les itinéraires culturaux. Le réseau d'épidémiosurveillance sert avant tout à déclencher les traitements en cours de saison, et les essais étudient une problématique précise où tout autre paramètre est supposé égal par ailleurs. Aussi, l'utilisation d'un historique d'essais aussi profond rend compliqué la récupération d'informations qui n'auraient pas été renseignées à l'époque. L'information variétale fait cependant exception.

Les données météorologiques proviennent de réanalyses historiques Météo-France. Les variables quotidiennes du modèle de simulation des schémas de surface Safran – Isba de Météo-France (SIM2) ont été utilisées en joignant spatialement sur le point de grille le plus proche (grille 8 km).

L'historique 2009-2022 du RSBT a été exploité en ne conservant que les observations réalisées par l'ITB et le CTBL (Centre technique betteravier de Limagnes) en raison de leur plus grande fiabilité (gain de 0,07 points de R^2). Cela représente au total plus de 750 parcelles (parcelles différentes chaque année) réparties dans toutes les régions productrices de betterave sucrière à l'exception de l'Alsace qui n'est pas intégrée dans le RSBT. Après nettoyage des données non validées ou aberrantes, il nous reste 5500 observations de fréquence, soit en moyenne 7 notations de maladie sur une parcelle et une année donnée.

Pour chaque ligne du tableau de données, plusieurs covariables ont été ajoutées : longitude, latitude, jour de l'année, zone à risque (booléen indiquant la tendance historique du département de la parcelle), tolérance variétale normalisée (variable quantitative explicitée par la suite), fréquences observées dans la même parcelle il y a 7 ou 14 jours (interpolation linéaire), moyennes de variables météo à plusieurs échéances. Pour la météo, la température moyenne, la température minimale, la température maximale, l'humidité relative, la quantité de précipitations, le rayonnement et la vitesse du vent ont été

utilisées, en accord avec la bibliographie et des analyses préliminaires (El Jarroudi, 2021)(Rossi, 1994)(Lawrence, 1970). Ces variables journalières ont été pivotées et renommées afin d'avoir une référence relative à chaque observation. Par exemple, T_j 3 représente la température moyenne 3 jours avant chaque observation. Sur le même principe, une agrégation par semaine a également été utilisée afin de limiter le nombre de covariables.

Différents modèles ont été comparés : régression linéaire pénalisée (ridge, lasso, elasticnet), arbres de décisions (random forest, GBM, histogram-based GBM, lightGBM). L'implémentation est issue des bibliothèques scikit-learn et lightgbm en Python.

La validation des résultats a été réalisée selon une validation croisée. Pour chaque année, un modèle a été calibré sur toutes les autres années de la période, puis évalué sur l'année laissée de côté. Cette procédure permet d'évaluer les performances prédictives dans le contexte d'une utilisation pratique avec une nouvelle campagne inconnue. Nous nous sommes particulièrement intéressés au R^2 qui indique le pourcentage de variance expliqué, au RMSE (Root Mean Squared Error) qui est l'erreur quadratique moyenne, au MAE (Mean Squared Error) qui est l'erreur moyenne, et au biais.

L'historique 2005-2022 des observatoires variétaux a également été utilisé pour analyser la relation entre tolérance variétale et développement de la maladie. Il s'agit d'un réseau d'essais de comparaison des variétés en l'absence de traitements fongicides. Après filtrage des essais conformes, 37 sites ont été retenus, soit 375 variétés distinctes et 33700 notations de gravité.

Ces observations ont été synthétisées temporellement au niveau de chaque micro parcelle en calculant : la gravité moyenne, la gravité maximale, la première date de dépassement de la gravité 0 et de la gravité 1, et l'AUDPC (Area Under Disease Progression Curve) via la méthode des trapèzes. Ces variables ont ensuite été intégrées dans un modèle linéaire mixte afin d'affecter un coefficient de tolérance à chaque variété. Le classement obtenu a ensuite été validé par comparaison avec les classements officiels annuels (établis selon une méthodologie différente).

Ces observations ont également été utilisées pour calibrer un modèle mécaniste simplifié, inspiré des formalismes de la bibliographie (Shane, 1985). Un optimiseur Python de la bibliothèque Scipy minimise la somme des carrés entre la gravité observée et une somme paramétrée de variables météo : température, humidité, précipitations, vent, rayonnement. La validation est réalisée en étudiant la convergence sur des années distinctes et en vérifiant la plausibilité des coefficients.

2.2. Caméras connectées et quantification automatisée de la cercosporiose

L'offre en caméras connectées adaptées à l'agriculture (alimentation autonome, étanchéité, bas coût, possibilité d'achat, simplicité d'utilisation, haute résolution, transfert des images brutes via réseau mobile, …) est très limitée. Peu de fournisseurs commerciaux ont été identifiés en amont du projet (également pendant et après) : Advansee et Copeeks (appareil Peek 8 + 2 MP). Nous avons par la suite travaillé plus étroitement avec Advansee et différents modèles : BEECAM (5 MP) et e-GLEEK modifié (8 MP).

Durant le projet, plusieurs caméras ont été mises en place : 4 en 2020, 4 en 2021, 18 en 2022 et 9 en 2023. Les capteurs ont été positionnés dans des essais ITB pour suivre les variétés sensibles et acquérir des images de symptômes, ou pour suivre des couples de variétés avec une différence extrême de tolérance pour confirmer les écarts de notation. Les objectifs sont positionnés à la verticale, à environ 1 m du dessus du couvert, afin de couvrir environ 1 m² de canopée. Les appareils ont été configurés pour prendre le maximum de photos par jour sans compromettre l'autonomie et le forfait de données (3, 4 ou 7 en pratique).

Les images ont été extraites manuellement du système d'information (SI) du fabricant : soit un serveur FTP (File transfer protocol), soit une interface web.

Avant labellisation, un travail préliminaire basé sur la plateforme d'eye-tracking (Cordier, 2022) de l'Université d'Angers a permis d'optimiser l'échelle d'annotation afin de limiter la pénibilité de la tâche pour les annotateurs et d'accélérer le processus.

Un jeu de données préalablement constitué a ainsi pu être élargi, en mettant à disposition plusieurs collaborateurs pour annoter les différentes classes d'intérêt (symptômes de cercosporiose, feuille saine, sol ou feuille morte) sur la plateforme Labelbox. Un algorithme de « data augmentation » a été mis en place afin de générer artificiellement plus de labellisations de feuilles malades en dupliquant artificiellement les spots de cercosporiose (et leur masque correspondant) sur des images de feuilles saines. En 2020, 58 images ont été labellisées puis 122 en 2021, 200 en 2022 et 183 en 2023.

Au niveau des algorithmes, le problème de quantification des symptômes étant une segmentation d'image, nous nous sommes tournés vers l'état de l'art en la matière : l'architecture U-Net (Ronneberger, 2015).

Nous nous sommes également intéressés à la diversité de notre jeu de données. Les objectifs étaient d'une part, d'identifier les nouvelles images les plus atypiques pour les labelliser en priorité afin de les intégrer au jeu d'entraînement et d'autre part, de savoir si un réentraînement est nécessaire, ou si au contraire, les images d'une nouvelle campagne ne sont pas différentes des précédentes. Pour cela, nous avons utilisé des approches de réduction de dimensions à partir de l'espace latent de l'encodeur de U-Net : UMAP, T-SNE, ISOMAP.

2.3. Prototypage d'un OAD en accord avec les enjeux de la filière

Afin de pouvoir utiliser les modèles dans un OAD, il faut les modulariser et standardiser les formats des paramètres, entrées et sorties. La modularisation la plus poussée a conduit à la création de « Application Programming Interface » (API) de type « REpresentational State Transfer » (REST), permettant d'interroger les modèles de manière simple et transparente. Les développeurs n'ont donc pas à maîtriser les détails du modèle pour pouvoir l'intégrer dans un autre système d'information.

Plusieurs prototypes d'interfaces basées sur des technologies web ont été réalisées afin de proposer une saisie ergonomique des paramètres d'entrée des modèles et recueillir les retours d'expérience des testeurs.

Plusieurs échanges ont été conduits afin de présenter les modèles et leurs performances aux experts betteraviers puis à un cercle restreint d'acteurs variés de la filière. En 2024, un modèle a notamment été intégré dans l'OAD « Alerte Maladies » de l'ITB et mis à disposition de manière confidentielle pour collecter les retours des différents types d'utilisateurs avant une future diffusion générale.

3. Résultats

3.1. Modélisation

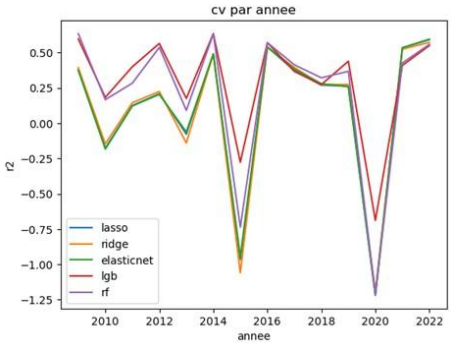


Figure 1 : Valeur du R^2 pour chaque année de test, par modèle, selon la procédure de validation croisée. Une valeur de 0 correspond à une prédiction par l'estimateur de la moyenne, une valeur de 1 correspond à une prédiction parfaite.

La modélisation de la fréquence de cercosporiose a confirmé l'apport de techniques de machine-learning plus complexes par rapport à une régression linéaire simple (Gauriau, 2024)(Vallet, 2022) qui apportent une meilleure performance globale et une plus grande robustesse. On remarque en effet grâce à la validation croisée que certaines

années avec une incidence faible sont plus compliquées à prévoir (Figure 1). Les valeurs élevées extrêmes sont également sous-estimées, sans doute en lien avec leur faible représentation.

Tableau 2 : performances du modèle (R^2 et MAE) selon l'échéance de prédiction et la présence d'une observation

Echéance	Observation	R^2 (% variance expliquée)	MAE (erreur moyenne)
14 jours	non	39	10
14 jours	oui	87	4
7 jours	non	36	10
7 jours	oui	93	3

Le Tableau 2 montre que l'ajout d'une observation antérieure comme covariable améliore très nettement les performances des modèles. Cette covariable explique à elle seule une grande part de la variabilité, ce qui est logique, mais les prévisions bénéficient cependant toujours de l'apport des autres covariables. Cela montre, d'une part, que l'assimilation de données est prometteuse pour améliorer le modèle, et d'autre part, qu'une approche de modélisation est complémentaire de l'observation terrain seule.

L'analyse SHAP (shapley additive explanations) nous permet de quantifier l'effet additif de chaque covariable explicative, même pour des architectures de modèles complexes. Dans notre cas, on retrouve la date comme premier facteur explicatif, ce qui montre la progression logique de l'épidémie mais questionne sur la capacité à modéliser des années atypiques. La tolérance variétale apparaît comme fortement explicative ; toutefois les essais en cours de campagne ont montré quelques dynamiques fausses pour des variétés tolérantes. La température est la variable météo qui ressort le plus souvent, suivie de l'humidité et de la vitesse du vent ; à l'inverse, la pluie et le rayonnement ont très peu d'effet.

Le classement variétal est basé sur les coefficients issus du modèle linéaire mixte avec l'AUDPC de la gravité comme variable réponse. L'échelle est normalisée en utilisant deux variétés bien connues pour leur profil de tolérance : Celcius (sensible) et Jellera KWS (tolérante). La comparaison avec les recommandations officielles montre un accord global. Les différences proviennent notamment du choix d'une échelle continue (plus pratique pour la calibration fine des autres modèles) ; et également de l'analyse sur tout l'historique disponible (nécessaire pour inclure toutes les variétés du catalogue).

La calibration du modèle mécaniste de gravité montre des performances comparables avec un R^2 proche de 0,5. Le rôle de la température est confirmé, avec une activation du champignon sur la plage 10-20°C. Comme pour le modèle précédent, l'influence de la pluie et de l'humidité ne ressort pas à l'inverse de la vitesse du vent qui semble inhiber le développement de la maladie. La validation par les experts est globalement concluante avec une bonne identification par le modèle des périodes de pics épidémiques correspondant aux recommandations de pulvérisation des deuxième et troisième fongicides. Néanmoins une tendance à la surestimation est identifiée sur les zones littorales avant 2018, ce qui pourrait s'expliquer par l'absence d'inoculum mais de conditions climatiques favorables. En effet, ces zones étaient faiblement touchées par la cercosporiose à cette époque.

3.2. Quantification automatisée

La mise en place et la maintenance d'un réseau de caméras connectées se sont révélées plus compliquées que prévu (Photo 1). La configuration et la vérification des premiers appareils était trop longue et peu ergonomique, tout comme la mise au point des objectifs. La transmission des images par réseau mobile sur un serveur FTP s'est révélée pratique et fonctionnelle, malgré une appréhension des zones blanches. Le principal point noir a cependant été l'infiltration d'eau dans les appareils malgré les joints étanches. En raison de ce problème, environ la moitié des caméras n'ont pas fonctionné.



Photo 1 : Exemple d'image prise par une caméra connectée du couvert végétal © ITB

La nouvelle génération de capteurs a permis de mieux distinguer les symptômes de cercosporiose en passant de 5 MP (mégapixels) à 8 MP. Toutefois, les optiques, capteurs et prétraitements sont encore perfectibles.

La labellisation est un processus long et laborieux. Heureusement, les techniques mises en place (logiciel spécifique, taille d'annotation, annotateurs multiples, data augmentation, pré-labellisation par réseau de neurones) ont permis d'y remédier partiellement.

L'entraînement du modèle U-net s'est bien déroulé : l'optimisation a montré une diminution régulière de la fonction de perte. Au final, le modèle est capable de classifier correctement les pixels correspondant aux symptômes de la cercosporiose avec un score F1 correct de 0.63 (en comparaison, la tâche de segmentation végétation-sol, beaucoup plus simple, donne un score F1 de 0.92).

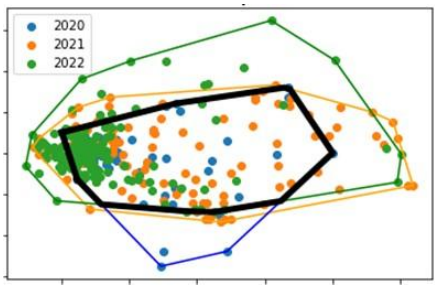


Figure 2 : Projection de chaque image dans un espace latent en 2 dimensions et identification des valeurs atypiques par la délimitation de contours convexes

Nous avons également essayé des modèles plus récents censés avoir de meilleures performances, comme le modèle SAM publié en 2023. Étant un modèle générique, il est seulement capable de segmenter les grands objets contrastés comme le sol et les feuilles, mais n'est pas capable d'identifier la cercosporiose.

La méthode de réduction de dimensions a permis de projeter les images du jeu de données dans un espace à deux dimensions et d'identifier les valeurs atypiques. Les nuages de points se superposent beaucoup entre les différentes années ce qui montre que la variabilité inter-annuelle est faible (Figure 2). L'intersection des enveloppes convexes permet d'identifier les images qui sortent de l'ordinaire et sont donc, pour une nouvelle campagne d'acquisition, plus intéressantes à labelliser pour améliorer les performances du réseau de neurones.

3.3. OAD

Les différents prototypes d'OAD ont permis d'interfacer les modèles épidémiologiques, de tester leur fonctionnement et de lancer les discussions quant à la manière de communiquer les prévisions.

La mise en place d'API tout au long du projet a été permise par la prise en main de plusieurs bibliothèques dans différents langages de programmation : PlumbeR (R), http.server (Python), Flask + Swagger (Python). Flask s'est montré plus simple d'utilisation pour intégrer un modèle construit en Python, avec une bonne réactivité à l'utilisation. Les freins à l'utilisation d'API sont cependant la complexité de mise en place sur des serveurs et la latence liée à la requête de données météo.

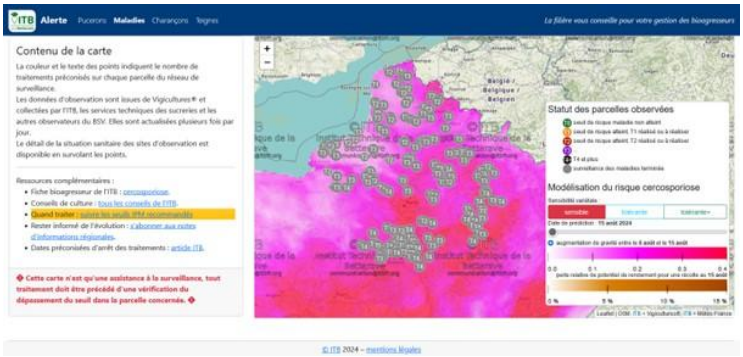


Figure 3 : Capture d'écran de l'OAD en 2024 © ITB

L'OAD (Figure 3) diffusé de manière restreinte en 2024 à une trentaine de membres de la filière (agriculteurs, conseillers, sucriers) a montré 100 % de disponibilité (durée opérationnelle / durée totale) tout au long de la campagne.

Le dépouillement du questionnaire a montré plusieurs tendances :

- les utilisateurs n'ont pas encore intégré l'outil dans leur routine d'estimation du risque ;
- les prévisions sont perçues comme correctes voire légèrement surestimées ;
- un accompagnement et une meilleure ergonomie seraient profitables.

4. Discussion

Les objectifs du projet sont globalement remplis, avec l'aboutissement d'un OAD pour accompagner la filière dans sa lutte contre la cercosporiose.

4.1. Modélisation

La modélisation épidémiologique s'est révélée plus ardue qu'envisagée. Le jeu de données initialement identifié pour suivre le développement de la cercosporiose s'est montré lacunaire en matière de saisie des covariables culturales, voire peu fiable au niveau des notations de maladie par certains observateurs. Les observations du RSBT sont représentatives de la variabilité des conditions de culture de la betterave, mais leur qualité n'est pas consistante sur toute la période pour pouvoir les utiliser seules. Il a donc fallu compléter les données par les observations issues des expérimentations thématiques de l'ITB. Ces données permettent notamment d'estimer très précisément l'influence de la tolérance variétale, le principal facteur agronomique identifié. Une véritable fusion des sources n'a cependant pas été possible en raison de protocoles de notations trop différents.

Les principales variables explicatives des épidémies ont pu être confirmées et leur effet quantifié. Néanmoins, l'effet de la pluie, souvent évoqué dans la bibliographie, n'est pas ressorti dans nos analyses ; à l'inverse, le vent semble défavorable aux épidémies. Les précipitations ne seraient pas pertinentes à l'échelle 8 km surtout lors de phénomènes orageux, mais l'importance du vent traduirait d'une certaine manière la probabilité d'avoir un feuillage sec à l'échelle du microclimat. L'utilisation de stations à la parcelle n'est pas possible en raison de l'historique d'analyse souhaité et de la volonté de proposer un OAD aux agriculteurs non équipés de matériel spécifique.

Certains leviers agronomiques connus pour avoir un impact sur la dynamique de la maladie n'ont pas pu être approfondis dans le temps imparti : le labour, connu pour accélérer la dégradation de l'inoculum primaire, et la durée de la rotation, sont des variables mal renseignées dans les suivis. L'effet précis des fongicides n'a pas pu être modélisé, les difficultés proviennent de l'extraction compliquée de cette donnée depuis les systèmes d'information et de la faible fiabilité de son enregistrement dans le RSBT ; le travail pourra néanmoins être poursuivi à partir d'essais spécifiques.

Le travail de modélisation a graduellement progressé en finesse et en complexité : partant d'objectifs synthétiques pour aller vers de la prévision dynamique, en accord avec les attentes de la filière. La nature du cycle épidémiologique de la maladie complexifie aussi sa modélisation : le début de l'épidémie est presque chaotique dans le sens où une faible variation de la quantité d'inoculum présent (résidus intra et extra parcellaires, contaminations voisines…) et du microclimat peuvent énormément accélérer le départ du cycle. Ces informations manquantes sont difficiles à capter : la quantification des spores libérées en cours de saison nécessite un protocole lourd, non généralisable aux exploitations betteravières.

Toutefois, comme montré précédemment, les modèles de CERCOCAP expliquent une part non négligeable de la variabilité rencontrée, part qui est fortement améliorée par de l'assimilation.

4.2. Quantification automatisée

Pensée comme complémentaire à la modélisation, l'observation automatisée de la maladie n'est pas encore assez mature pour équiper les fermes betteravières. CERCOCAP a néanmoins permis de débroussailler les points clés nécessaires au développement de cette technologie et surtout ses limites (robustesse, maintenabilité, business model et rentabilité). Tout au long des quatre campagnes d'expérimentation, nous avons pu enrichir notre base de données d'images annotées. Celle-ci apparaît représentative des différentes conditions d'acquisition. Toutefois, les symptômes acquis en début de projet sont peu résolus en raison des capteurs utilisés. Le petit nombre d'appareils opérationnels est aussi responsable du faible nombre global d'images de symptômes bien définis. La poursuite du projet ou son extension à d'autres maladies serait sans doute plus efficace en se focalisant dès la première campagne sur l'acquisition et la labellisation en masse d'images de symptômes au plus près des futures conditions d'utilisation. A noter que l'augmentation de données s'est montrée très utile pour améliorer l'entraînement des algorithmes de détection et permet de diminuer l'effort de labellisation. Aussi, la disponibilité du matériel s'est montrée très sensible à la crise sanitaire de la COVID-19 malgré l'utilisation de composants courants. Une approche d'auto-construction serait intéressante à développer pour valoriser l'expertise et le recul acquis et faciliter la diffusion à des agriculteurs intéressés tout en maximisant la disponibilité des pièces et l'évolution du matériel.

Les performances brutes des algorithmes de segmentation semblent stagner ces dernières années, tout en évoluant vers des problématiques plus complexes (« zero-shot learning », « promptable models »…). Néanmoins, dans notre cas, les approches « classiques » basées sur U-net présentent de meilleurs résultats que SAM par exemple. La détection de la cercosporiose n'est pas une problématique classique dans le sens où les objets sont très petits et où la classe est largement minoritaire (1 pixel donné a ainsi une très faible probabilité de représenter de la cercosporiose, probabilité négligeable devant celle de la végétation ou du sol), rendant la tâche plus ardue pour les réseaux de neurones qui sont construits pour synthétiser rapidement les dimensions spatiales au détriment de la résolution et avoir des poids équilibrés. La data augmentation permet d'améliorer l'entraînement même si un design spécifique de l'architecture des réseaux de neurones et une gestion poussée du déséquilibre de classes seraient bénéfiques

Le couplage entre le réseau d'observation automatisé et le modèle épidémiologique n'a pas pu être réalisé intégralement. Cependant, nous avons pu mettre en place plusieurs logiciels permettant le traitement de nouvelles images, même par des non-spécialistes. D'autre part, le modèle épidémiologique a montré sa capacité à valoriser l'information de la fréquence de la maladie la semaine précédente. En plus de la construction d'une infrastructure complète de traitement en temps réel des images et d'une API pour la communication avec le modèle épidémiologique, il faudra calibrer la relation entre ce qui est perçu par les capteurs et les notations humaines traditionnelles. Des pistes sont déjà envisagées comme d'une part la relation statistique entre la gravité et la fréquence ; et d'autre part, la segmentation automatique des feuilles sur les images, permettant de recalculer une valeur de fréquence.

4.3. Couplage et OAD

Les choix faits quant au prototypage de l'OAD ont évolué à plusieurs reprises en lien avec les performances des modèles, les capacités informatiques, les attentes des futurs utilisateurs et les différents enjeux au sein de la filière. L'outil mis à disposition en 2024 est un compromis entre tous ces aspects et évoluera selon les résultats de l'enquête associée et la poursuite des travaux de modélisation. A noter que, pour nuancer, bien que la cercosporiose soit perçue par la filière comme un enjeu critique, paradoxalement, seulement un cinquième des agriculteurs consulte l'OAD déjà existant, et il y a eu peu d'engouement pour tester le modèle en 2024 (année à forte pression). Il faudra donc

encore sans doute plusieurs années d'échanges pour améliorer la conception de l'outil et accompagner avec pédagogie les utilisateurs pour intégrer l'OAD dans une gestion intégrée de la maladie.

5. Conclusion

L'ambitieux projet CERCOCAP a permis de faire progresser la gestion intégrée de la cercosporiose sur de nombreux aspects théoriques et opérationnels. De futurs travaux et échanges permettront de peaufiner les outils et d'améliorer l'efficacité de la lutte contre la cercosporiose.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

François Joudelat : https://orcid.org/0000-0003-1189-230X

François Brun : https://orcid.org/0000-0002-1079-2385

Contributions des auteurs

François JOUDELAT : Project administration, Data curation, Formal analysis, Machine learning, Software, Visualization, Writing – original draft

François BRUN : Formal analysis, Machine learning, Supervision, Writing – review & editing

David ROUSSEAU : Formal analysis, Machine learning, Supervision, Writing – review & editing

Fabienne MAUPAS : Conceptualization, Funding acquisition, Validation, Writing – review & editing

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Merci aux collègues de l'ITB ayant participé de près ou de loin à CERCOCAP que ce soit par la gestion des essais, le coloriage des symptômes ou simplement des conseils qui ont permis d'améliorer ce projet. Et un grand merci également aux stagiaires Lucile Vallet et Yonghan Liao pour leur implication et leur travail de qualité.

Merci à Météo-France pour les données fournies, brutes, et pour leur ouverture fin 2023.

Déclaration de soutien financier

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR du ministère de l'agriculture, de la Souveraineté Alimentaire et de la Forêt.

Références bibliographiques

« Alea pluie : prévision probabiliste du cumul des précipitations sur 2 semaines pour les agriculteurs ». Consulté le: 16 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://aleapluie.modelia.org/

« Alerte Maladies • ITB ». Consulté le: 16 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://alerte.itbfr.org/maladies/

F. Cioni, M. Collina, G. Maines, M. F. R. Khan, G. A. Secor, et V. V. Rivera, «A New Integrated Pest Management (IPM) Model for Cercospora Leaf Spot of Sugar Beets in the Po Valley, Italy », Sugar Tech, vol. 16, no 1, p. 92-99, mars 2014, doi: 10.1007/s12355-013-0260-7.

V. Rossi, P. Racca, et P. Battilani, «A simulation model for Cercospora leaf spot epidemics on sugarbeet », p. 105-112, mars 1994.

L. Hallau *et al.*, «Automated identification of sugar beet diseases using smartphones », Plant Pathol., vol. 67, no 2, p. 399-410, févr. 2018, doi: 10.1111/ppa.12741.

C. E. Windels, H. A. Lamey, D. Hilde, J. Widner, et T. Knudsen, «A Cerospora Leaf Spot Model for Sugar Beet: In Practice by an Industry », p. 11.

P. Racca, E. Jörg, S. Mittler, et J. Petersen, «CERCBET 3 - a forecaster for epidemic development of Cercospora beticola », présenté à IIRB, févr. 2004.

P. Racca et E. Jörg, «CERCBET BlackwellPublishingLtd 3 – a forecaster for epidemic development of », EPPO Bull., p. 6, 2007.

V. Rossi et P. Battilani, «CERCOPRI: a forecasting model for primary infections of cercospora leaf spot of sugarbeet », p. 5.

C. E. Windels, «Cercospora Leaf Spot Prediction Models in North America ».

O. Gauriau, L. Galárraga, F. Brun, A. Termier, L. Davadan, et F. Joudelat, «Comparing machine-learning models of different levels of complexity for crop protection: A look into the complexity-accuracy tradeoff », Smart Agric. Technol., vol. 7, p. 100380, mars 2024, doi: 10.1016/j.atech.2023.100380.

Y. LeCun, Y. Bengio, et G. Hinton, «Deep learning », Nature, vol. 521, no 7553, p. 436-444, mai 2015, doi: 10.1038/nature14539.

A. Barreto, F. R. Ispizua Yamati, M. Varrelmann, S. Paulus, et A.-K. Mahlein, «Disease Incidence and Severity of Cercospora Leaf Spot in Sugar Beet Assessed by Multispectral Unmanned Aerial Images and Machine Learning », Plant Dis., vol. 107, no 1, p. 188-200, janv. 2023, doi: 10.1094/PDIS-12-21-2734-RE

P. Wolf et J. Verreet, «Empirical-deterministic prediction of disease and losses caused by Cercospora leaf spots in sugar beets », undefined. Consulté le: 19 novembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: /paper/Empirical-deterministic-prediction-of-disease-and-Wolf-Verreet/...

J. Vereijssen, J. H. M. Schneider, et M. J. Jeger, «Epidemiology of Cercospora Leaf Spot on Sugar Beet: Modeling Disease Dynamics Within and Between Individual Plants », Phytopathology®, vol. 97, no 12, p. 1550-1557, déc. 2007, doi: 10.1094/PHYTO-97-12-1550.

A.-K. Mahlein, U. Steiner, C. Hillnhütter, H.-W. Dehne, et E.-C. Oerke, «Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases », Plant Methods, vol. 8, no 1, p. 3, 2012, doi: 10.1186/1746-4811-8-3.

J. Khan, L. E. del Río, R. Nelson, et M. F. R. Khan, «Improving the Cercospora Leaf Spot Management Model for Sugar Beet in Minnesota and North Dakota », Plant Dis., vol. 91, no 9, p. 1105-1108, sept. 2007, doi: 10.1094/PDIS-91-9-1105.

L. L. Marcuzzo, R. Haveroth, et A. Nacimento, «Influence of temperature and leaf wetness duration in the severity of Cercospora leaf spot of beet », Summa Phytopathol., vol. 42, no 1, p. 89-91, mars 2016, doi: 10.1590/0100-5405/2111.

Bauer et Förstner, «Investigation into the classification of diseases of sugar beet leaves using multispectral images », p. 10.

W. W. Shane, P. S. Teng, A. Cattanach, et H. A. Lamey, «Management of Cercospora Leaf Spot of Sugarbeets: Decision Aids », Farm Res., vol. 43, no 3, 1985, [En ligne]. Disponible sur: http://hdl.handle.net/10365/8243

Cultures Sucre, «Mémo Statistique Sucre et autres débouchés », campagne 2023-2024.

M. Cordier, P. Rasti, C. Torres, et D. Rousseau, «Optimisation de l'échelle d'observation pour l'annotation d'images », présenté à GRETSI, Nancy, sept. 2022, p. 4.

F. Maupas, J. Adrian, F. Joudelat, F. Brun, et S. Jay, «PHENOBET: Combinaison de données issues de capteurs de phénotypage avec des modèles de culture pour caractériser les variétés de betterave sucrière », *Innovations Agronomiques* 79, p. 257-266, doi: 10.15454/RKKK-CW07.

J. F, D. S, B. B, C. F, et M. F, «Phénaufol - Mise au point d'outils et techniques de PHENotypage pour détecter AUtomatiquement les maladies FOLiaires de la betterave », *Innovations Agronomiques* 85, p. 279-288, 2022, doi: 10.17180/CIAG-2022-VOL85-ART21.

A.-K. Mahlein, «Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping », Plant Dis., vol. 100, no 2, p. 241-251, févr. 2016, doi: 10.1094/PDIS-03-15-0340-FE.

L. Vallet *et al.*, «Prédiction des épidémies de cercosporiose de la betterave par des approches d'apprentissage automatique », in VÉGÉPHYL - 13ème Conférence internationale sur les maladies des plantes, Orléans, France, déc. 2022, p. 1-3. Consulté le: 6 novembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://hal.science/hal-03918080

E. Jörg, P. Racca, et B. Kleinhenz, «THE CERCBET – MODELS: DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR CERCOSPORA LEAF SPOT CONTROL IN SUGAR BEET IN GERMANY », p. 6.

O. Ronneberger, P. Fischer, et T. Brox, «U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation », 2015, doi: 10.48550/ARXIV.1505.04597.

V. Rossi, «Use of a simulation model « CERCODEP » in the controle of cercospora leaf spot on sugarbeet », p. 3, juin 1995.

F. Brun, L. Michel, J. Veslot, M. Chen, D. Makowski, *et al.*, «Valorisation des données agricoles d'épidémiosurveillance. Création d'outils pour les acteurs régionaux du Bulletin de santé du végétal. », 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.16162.94403.

M. El Jarroudi, F. Chairi, L. Kouadio, K. Antoons, A.-H. M. Sallah, et X. Fettweis, «Weather-Based Predictive Modeling of Cercospora beticola Infection Events in Sugar Beet in Belgium », J. Fungi, vol. 7, no 9, p. 777, sept. 2021, doi: 10.3390/jof7090777.

J. S. Lawrence, «Wind Dispersal of Conidia of Cercospora beticola », Phytopathology, vol. 60, no 7, p. 1076, 1970, doi: 10.1094/Phyto-60-1076

Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment, 3rd ed. London: Academic press, 2018.

Pour citer cet article : François Joudelat, François Brun, David Rousseau, Fabienne Maupas. CERCOCAP -pilotage de la CERcosporiose de la betterave par COuplage entre modèle agroclimatique et CApteurs connectés. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.215-226. 10.17180/ciag-2025-vol107-art16

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

SAMOSA : Des capteurs climatiques et des outils numériques pour piloter des systèmes horticoles bas intrants phytosanitaires.

Bruno PARIS[1,5], Léo KERAUDREN[1], Roxane CALVAIRE[2], Emilie MAUGIN[3], Jacques FILLATRE[4], Isabelle CABEU[4], Sophie DESCAMPS[5], Laurent CAMBOURNAC[5], Stephen AMBROGIO[2], Fabien ROBERT[1].

[1] ASTREDHOR, 44 rue d'Alésia, 75682 Paris cedex 14, France

[2] INRAE UMR 1355 Institut Sophia Agrobiotech, 06900 Sophia Antipolis, France

[3] ASTREDHOR Sud-Ouest, 71 Avenue Edouard Bourlaux, BP 81, 33140 Villenave-d'Ornon cedex, France

[4] ARMEFLHOR, 1 chemin de l'IRFA, 97410 Saint Pierre, La Réunion

[5] Chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes, MIN Fleurs 17-box85, 06296 Nice cedex 3, France

Correspondance : bruno.paris@astredhor.fr ; bparis@alpes-maritimes.chambagri.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art17

Résumé

Des avancées significatives à l'aide de macroorganismes ont été mises en œuvre par les partenaires dans le cadre de différents projets Ecophyto et à l'occasion du présent projet CASDAR SAMOSA 2020-2023 pour réduire l'usage des pesticides en cultures horticoles. Toutefois, des impasses restent prégnantes sur certains bioagresseurs, et la recherche du « zéro pesticide » nécessite d'identifier les éléments clés pour un pilotage des systèmes qui garantissent la viabilité économique. Dans le projet SAMOSA, les sites expérimentaux « zéro pesticide » sont conduits sur 3 systèmes horticoles : une succession de plantes en pot en région Sud-Ouest, du rosier fleurs coupées en région tropicale, du Gerbera fleurs coupées en région méditerranéenne, et implémentés de capteurs climatiques. Le projet CasDAR SAMOSA, a permis de générer des fonctionnalités numériques d'aide au diagnostic et à la préconisation dans l'application métier Baco créée pour piloter les systèmes. Les données de températures et d'hygrométrie collectées sur les trois sites ont permis un meilleur positionnement des interventions et leur évaluation.

Mots-clés : outil d'aide à la décision, capteurs, essai système, protection des cultures

Abstract: SAMOSA: Climate sensors and digital tools to manage horticultural systems with low phytosanitary inputs.

Significant progress with macroorganisms has been made by the partners in various Ecophyto projects and in the present CASDAR SAMOSA 2020-2023 project to reduce the use of pesticides in horticultural crops. However, impasses remain on certain pests, and the search for zero pesticide requires to identify the key elements for a system management that guarantees the economic viability. In the SAMOSA project, "zero pesticide" experimental sites are conducted on 3 horticultural systems: a succession of potted plants in the southwest region, cut flower roses in the tropical region, gerbera cut flowers in the Mediterranean region, and implemented with climate sensors. The CASDAR SAMOSA project generated new digital functionalities in the Baco business application created to manage the systems. Temperature and hygrometry data collected on the three sites have enabled better positioning and evaluation of interventions.

Keywords: decision support tool, sensors, systemic approach, crop protection

1. Introduction

Un des enjeux de la filière horticole est clairement la mise au point de schémas de culture économes en pesticides pour à la fois répondre aux impasses auxquelles les producteurs doivent faire face (Paris *et al*., 2019), et aux attendus du plan Ecophyto II+.

L'institut technique ASTREDHOR et le pôle INRAE Santé des Plantes de Sophia-Antipolis ont constitué une Unité Mixte Technologique (UMT) FioriMed pour traiter de la problématique de la réduction des pesticides des systèmes horticoles, au travers de programmes de recherche. La réduction drastique des pesticides dans les systèmes de culture horticoles doit être accompagnée par des outils numériques. L'utilisation d'un outil d'aide à la décision est un facteur de réussite dans la gestion de l'agro-écosystème devenu de plus en plus complexe du fait de l'utilisation d'auxiliaires de lutte biologique (Paris *et al.,* 2019).

Toutefois, malgré cette complexité induite, un pas supplémentaire doit être franchi via une prise de risque accrue dans le pilotage des agro-systèmes expérimentaux, via l'amélioration et la création d'un nouvel outil de suivi et de conseil et via l'implémentation de nouvelles technologies (capteurs). L'objectif est également d'assurer le test en conditions réelles de la généricité des capteurs, des outils numériques associés et des méthodes développées. L'objectif majeur des capteurs est d'améliorer le diagnostic à la parcelle, de le fiabiliser, de le tracer et d'en accélérer la disponibilité au plus grand nombre. Cette transparence et cette traçabilité des éléments de la prise de décision jusqu'aux préconisations constituent l'objet principal de l'outil de service Baco.

Dans la continuité et en parallèle des projets DEPHY EXPE (OTELHO 2013-2018, 2.ZERHO 2019-2024) et pour parvenir à l'objectif principal de réduire significativement le recours aux pesticides de nature chimique, le projet SAMOSA propose de tester l'implémentation de nouvelles technologies connectées.

2. Matériels et méthodes

La re-conception des systèmes de production horticole passe à la fois par le test de situations de production dite « zéro pesticide » (prise de risque maximale) et par l'analyse holistique de ces systèmes expérimentés. La mise en place d'un processus d'appropriation des innovations incluant l'usage des capteurs et d'outils d'aide à la décision est en phase d'analyse par des sociologues dans d'autres projets.

2.1. Un réseau d'expérimentation en stations

Les partenaires ont lié leur activité expérimentale en cours sur 3 sites de stations expérimentales (test de schémas de production « zéro pesticide » à ASTREDHOR Sud-Ouest, au CREAM de la Chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes et à l'ARMEFLHOR (Photo 1)) en incluant des dispositifs connectés de façon à lier les suivis épidémiologiques aux données climatiques collectés par les capteurs et aux données d'image de pièges connectés. La méthodologie dite du quicksampling (échantillonnage visuel rapide par classe d'abondance) est utilisée pour les suivis épidémiologiques (Bout *et al.,* 2010). Elle permet la réalisation de cartographies spatio-temporelles pour visualiser l'évolution des épidémies.



Photo 1 : Sites des stations expérimentales. De gauche à droite : Station ASTREDHOR Sud-Ouest (Potées fleuries de printemps), Station ARMEFLHOR (Rosiers fleurs coupées), Station CREAM Chambre agri 06 (Gerbera fleurs coupées). (Crédit photo ASTREDHOR)

2.2. Baco : outil développé par l'UMT FioriMed pour appuyer le conseil agroécologique

Après arrêt du fonctionnement de la plateforme numérique S@M (Paris *et al.* 2017) en 2023, l'application métier **Baco (Biocontrôle Agroécologie pour un Conseil Optimisé Figure 1)** a été développée par l'UMT FioriMed. Elle constitue le socle de l'élaboration des diagnostics culturaux et des préconisations agroécologiques et permet une aide à la décision pour les professionnels : chercheurs, expérimentateurs, conseillers.

Cette application développée dans le cadre d'un partenariat pluridisciplinaire est accueillie sur les serveurs gérés par l'UMR Institut Sophia Agrobiotech. Co-conçue pour répondre à des besoins professionnels, l'application métier sert aussi des objectifs de recherche en sociologie de l'innovation (appropriation du numérique et de l'agroécologie) et modélisation de situations épidémiologiques pour l'anticipation de la survenue des épidémies.

Baco est donc une application métier conseil développée dans le cadre du projet 2.ZERHO 2019-2024 pour l'élaboration d'un diagnostic fiable et dans le cadre du projet FAM SESAME 2021-2024 pour l'élaboration d'un conseil agroécologique à même de sécuriser, tracer et mettre en exergue les méthodes alternatives qui concourent à la réduction des pesticides en horticulture.

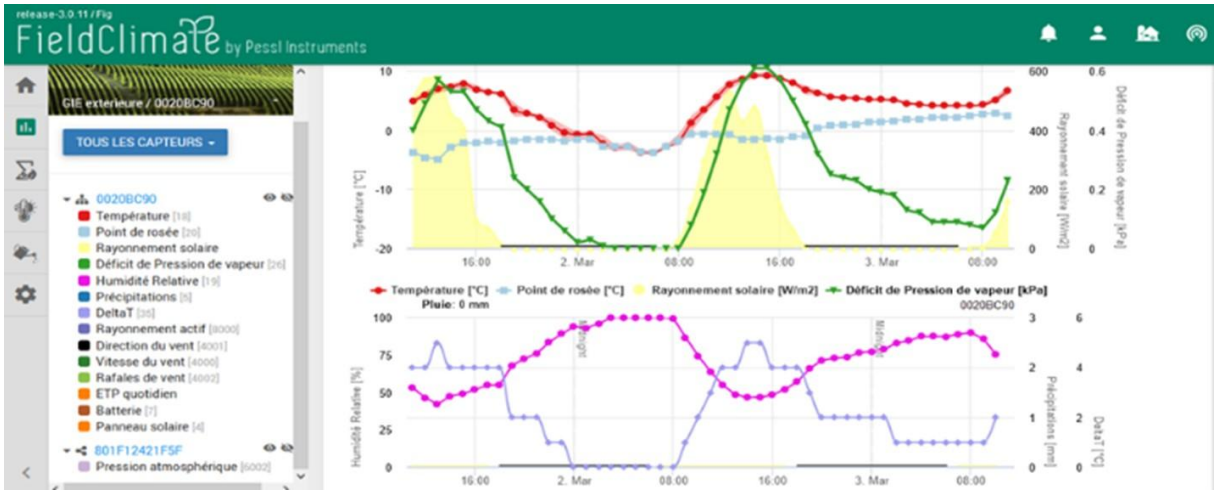


Figure 1 : Logo Baco et interface et menu d'accueil

Durant ce projet, la prise en compte des éléments de caractérisation et prévision du climat est considérée comme facteur d'anticipation des épidémies et la prise en compte de la distribution des bioagresseurs (cas des capteurs climatiques et des pièges connectés) viendra implémenter l'application métier à la faveur du projet CasDAR RT SAMOSA 2020-2023 (Paris *et al.,* 2022).

2.3. Des capteurs d'intérêt ?

L'année 2020 du projet CasDAR SAMOSA a permis la prospection des capteurs adéquats afin d'équiper les sites pilotes. L'année 2021 constitue l'année d'installation et d'acquisition des capteurs climatiques et est en conjonction avec le fonctionnement des sites du projet DEPHY EXPE 2.ZERHO.

L'objectif ambitieux de ces capteurs est de collecter un ensemble pertinent de données susceptibles d'être des indicateurs des dynamiques biotiques. Les facteurs d'impact des dynamiques sont de différentes natures et se déclinent en deux grandes catégories : les données biotiques et les données abiotiques. Ces données permettront de comprendre et de gérer la complexité des agroécosystèmes, afin de prendre les décisions de protection de façon optimale.

L'UMT FioriMed a sélectionné, avec ses partenaires, des paramètres à collecter dans les systèmes et dans leurs abords (Tableau 1).

Tableau 1 : Recensement des facteurs biotiques (ravageurs, auxiliaires, maladies...) et abiotiques indicateurs des dynamiques biotiques et des moyens d'acquisitions identifiées

Facteurs	Moyen de mesure	Autre moyen innovant
Biotiques		
Présence/répartition	Observation à l'œil sur culture (Quicksampling Bout *et al.,* 2010) ou pièges (englués ou alimentaires par exemple, berlèses…)	Pièges connectés Caméras de détection automatisée (RGB, multispectrales…) Détection de spores dans l'air
Ouverture de l'agroécosystème	Observation à l'œil sur culture	0 à 100, 0 étant un système clos et 100 un système ouvert. Une parcelle en plein air tend vers 100, une serre tend vers 0 selon ses infrastructures
Quantité et qualité de la nourriture disponible		Peuvent être reliées aux opérations culturales (nourrissage), à la présence des proies (voir point précédent), au stade floral (présence de pollen) ainsi qu'à l'état de santé des végétaux pour les phytophages
Niveau de prédation	Taux de parasitisme, quantification des prédateurs, proies factices, cartes de prédation…	Caméras de détection sur proies factices et cartes de prédation
Qualité et quantité de l'habitat (culture +/- favorable, type de substrat…)	Qualitatif : notation du type de substrat, son âge, culture en place, stade cultural (BBCH), stress hydrique	Logiciel de traitement de l'image pour estimer la masse végétale et son état de santé (stress ; vigueur)
Interventions culturales (humaines)	Cahier de culture	
Abiotiques		
Températures	Thermomètre	Thermomètres sur couche limite
Hygrométrie	Hygromètre	
Pression atmosphérique	Baromètre	
Temps d'humectation	Capteur d'humectation	
Quantité et qualité de la lumière reçu	Pyranomètre (rayonnement global)	Spectrophotomètre (différentes longueurs d'ondes) Radiomètre UV Capteurs PAR

Flux d'air	Girouette Anémomètre	Modélisation
Qualité air	Sonde CO_2, O_2	

Pour les données biotiques : des relevés hebdomadaires ont été réalisés par quicksampling sur 24 à 32 points d'échantillonnage, selon la typologie du site. Ces relevés concernent pucerons, momies de pucerons, aleurodes, oïdium, stade phénologique… (Voir partie 3.3.1. Tableau 2).

Pour les données climatiques (voir partie 3.3.1. Tableau 3) : 9 thermohygromètres connectés en réseau bas débit LoRa ont été disposés selon un maillage de 3x3 dans les cultures, au niveau de la canopée des cultures. Données enregistrées sur un pas de temps horaire : température et hygrométrie moyennes, maximales et minimales + données calculées automatiquement : point de rosée, déficit de pression de vapeur et DeltaT.

2.4. Des capteurs d'images avec des algorithmes de reconnaissance

Les données les plus onéreuses à acquérir sont les données biotiques : elles nécessitent une formation et une expertise élevées ainsi qu'un temps humain d'acquisition important. Elles sont réalisées par quicksampling une fois par semaine et certaines cultures peuvent amener à monitorer plus de 15 variables.

L'objectif des pièges connectés est de diminuer la charge de quicksampling tout en gardant un niveau d'information suffisant pour la conduite des cultures. Cependant, certains ravageurs particulièrement problématiques (thrips, pucerons notamment) possèdent une taille réduite (de l'ordre du millimètre) rendant la détection automatisée délicate.

Par ailleurs, l'entreprise Pessl, avec laquelle nous avons contractualisé l'acquisition des capteurs d'images (*Iscout color trapp* et *Iscout Phéromone,* Photo 2), travaille actuellement sur un prototype de caméra macro pour répondre à ce besoin mais se heurte à la mobilité réduite de ces espèces.



Iscout color trap, Serre INRAE Sophia-Antipolis, (tomates hors sol)



Iscout Phéromone, Serre INRAE Sophia-Antipolis, (tomates hors sol)

Photo 2 : Capteurs d'images de ravageurs en test Iscout color trap et phéromone (Crédit photo ASTREDHOR)

2.5. Des combinaisons de leviers en évaluation

Les stratégies mises en place sur les 3 sites expérimentaux mettent en avant la reconception des systèmes et l'usage de combinaisons de leviers (prophylaxie, macroorganismes, gestion climatique, produits de biocontrôle, nourrissage des auxiliaires, biostimulants) pour gérer les épidémies dans un objectif de viabilité économique (Projet Ecophyto DEPHY EXPE 2.ZERHO) (*Paris et al.,* 2024).

3. Résultats et discussion

3.1. Baco, de nouvelles fonctionnalités pour piloter et évaluer, une interface pour l'utilisation des données

Les partenaires de l'UMT FioriMed s'appuyaient initialement sur la plateforme S@M. Du fait de son arrêt en cours du projet, ils ont convenu, en cohérence avec le projet FranceAgriMer SESAME 2021-2024 qu'ils portent, de développer une application métier dénommée Baco et de développer des interfaces pour générer des indicateurs pour l'évaluation et le pilotage des systèmes de culture. Le projet SAMOSA bénéficie des développements introduits dans Baco pour l'enregistrement des données.

3.1.1. Des indicateurs d'évaluation construits en atelier s'appuient sur l'épidémiosurveillance et Baco

Parmi les indicateurs utilisés, l'IFT a été jugé intéressant pour caractériser l'impact des stratégies testées dans les sites producteurs, puisqu'il combine un indicateur de pratique sans le biais des produits commerciaux multi-matières actives et un indicateur d'impact sur le risque de contaminations (transferts) (Penguilly *et al.,* 2018).

Les données collectées sur les parcelles permettent d'obtenir d'autres indicateurs pour apprécier l'utilisation de solutions de biocontrôle hors IFT, et c'est tout l'enjeu de dispositifs de rupture sans pesticides chimiques testés en stations.

3.1.2. Une plateforme fournisseur pour réceptionner et visualiser les données issues de capteurs (plateforme FieldClimate)

Les données sont visualisables et exportables. Le fournisseur de capteurs *Pessl Instrument* a mis à disposition du projet une interface web conviviale dénommée FieldClimate. Elle permet aux utilisateurs de visualiser le fonctionnement des capteurs, les données produites et propose des mises en forme graphiques/tableaux. Ainsi cela permet de représenter l'ensemble des variables biophysiques et agronomiques sur les 3 sites expérimentaux. L'interface de la plateforme FieldClimate est visualisable ci-dessous (Figure 2) selon le schéma de rapatriement des données sur une plateforme unique (Figure 3).

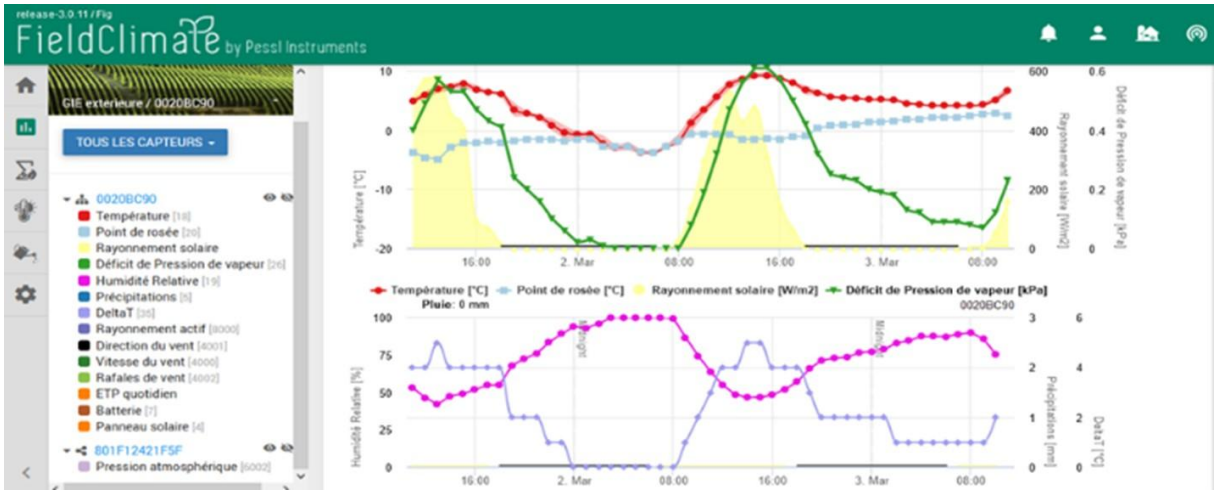


Figure 2 : interface *Fieldclimate* pour visualisation et export des données

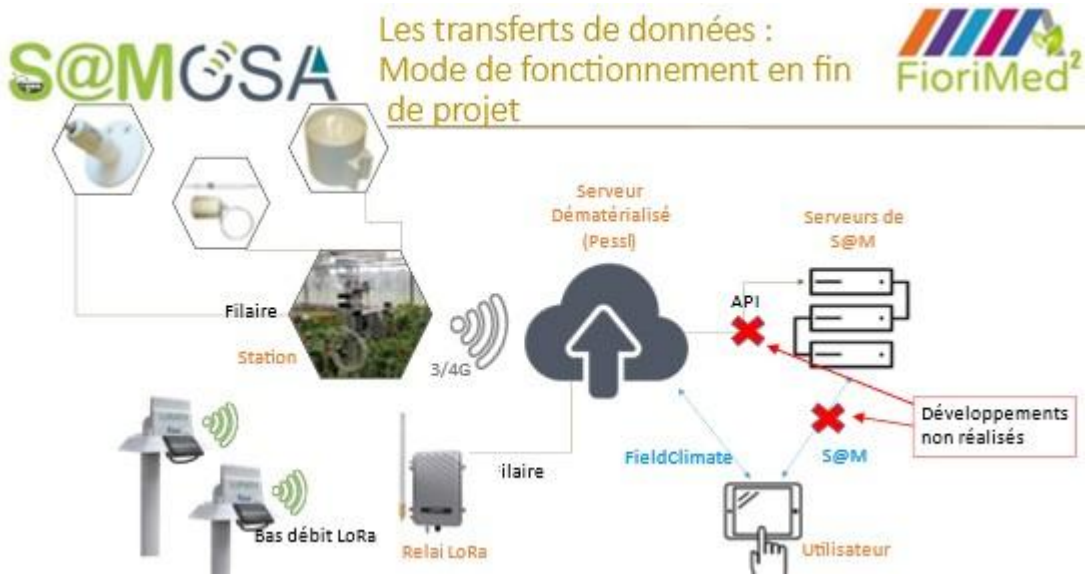


Figure 3 : Schéma de rapatriement des données

3.2. Des capteurs climatiques pour appréhender l'évolution des épidémies

Les installations réalisées durant l'année 2021 ont permis d'acquérir à partir de la fin de l'année, un ensemble de données (Tableau 1) sur 3 sites pilotes. Tous les jeux de données complets collectés permettront au-delà du projet de développer une méthode d'étude de corrélation et/ou de sélection de variables appliquée aux données disponibles pour établir les espèces pour lesquelles une rupture de progression dans les effectifs est notable.

L'efficacité des capteurs LoRATH thermo hygromètre permettent d'éditer des cartographies spatiales des températures et hygrométries, un outil pour l'aide à la décision graphique, rapide et facile d'accès (Figure 4). Les foyers de bioagresseurs peuvent être plus facilement et précocement identifiés pour l'anticipation des interventions. La température est un facteur clé dans la dynamique des populations d'acariens tétranyques. L'oïdium, principal facteur mettant à mal la protection intégrée des cultures en entreprises (Pizzol *et al.,* 2014), impose un suivi rigoureux de l'hygrométrie pour anticiper les phases de risque.

3.2.1. Mieux connaitre les systèmes de culture : des cartographies spatiales

Les cartographies spatio-temporelles de température et d'hygrométrie constituent un outil pour analyser l'émergence d'une épidémie et sa localisation sur la parcelle, par exemple au travers de la localisation de points chauds et de points froids (Figure 4) qu'il convient de corréler avec l'intensité épidémiologique d'un bioagresseur (Figure 4 bis).

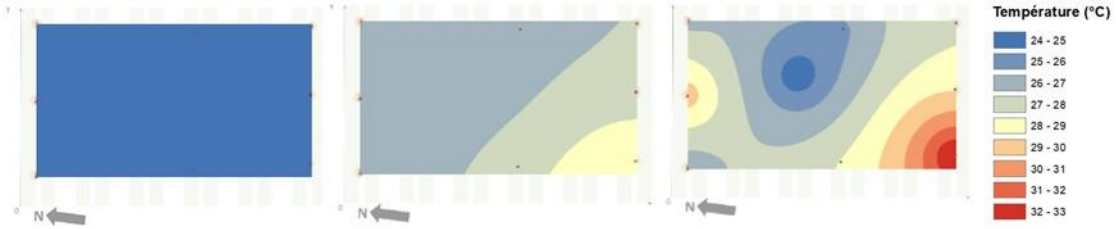


Figure 4 : Cartographies des températures à 10h00, 11h00 et 12h00 (de gauche à droite) le 08/03/2021 traduisant l'évolution dans le temps de l'hétérogénéité des températures (site station CREAM Gerbera fleurs coupées – Modèle d'interpolation spatiale exponentielle)

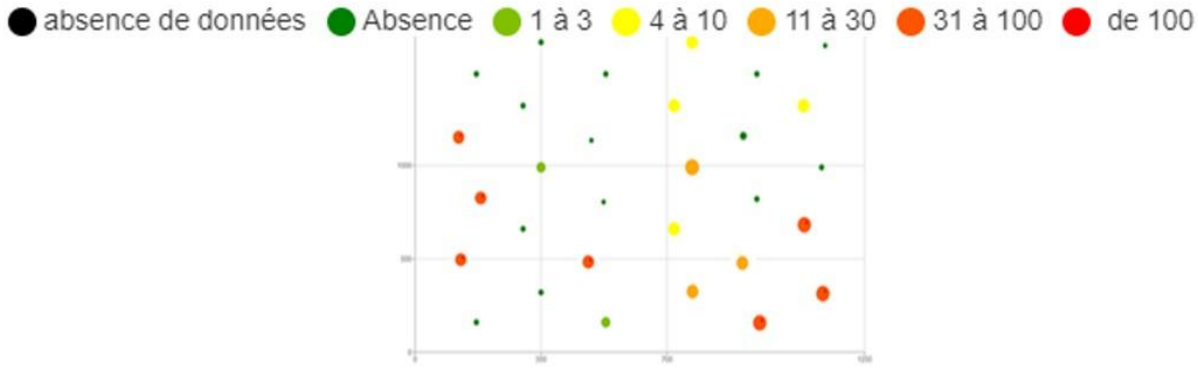


Figure 4 bis : Cartographie des occurrences de pucerons sur la culture de Gerbera, montrant une superposition des foyers de pucerons avec les points chauds du compartiment

Les cartographies laissent entrevoir des perspectives d'analyses de données à partir de jeux complets pour vérifier les premières impressions visuelles (présence de foyers plus intenses au niveau des points chauds). Un premier jeu de données complet sera versé sur la plateforme en ligne RD-agri, mais pour plus de robustesse dans l'analyse, la collecte de données devra s'opérer sur plusieurs années au-delà du projet.

Nous pouvons conclure de l'intérêt de ce type de données pour une aide à la décision à partir d'une représentation visuelle des données climatiques et épidémiologiques. Cela permet d'ores et déjà des interventions localisées (biologiques ou chimiques) et donc un pilotage plus fin des cultures où la protection phytosanitaire ne doit intervenir qu'en ultime recours.

3.2.2. Mieux maitriser l'application des moyens du biocontrôle dans les systèmes de culture : des conditions climatiques contrôlées

L'équipement en capteurs climatiques a permis d'appréhender de façon plus fine les conditions nécessaires à l'application de certains leviers et particulièrement à la réussite du biocontrôle. L'utilisation du champignon entomopathogène *Beauveria bassiana* (Photo 3), est souvent réalisée en conditions trop sèches pour être efficace. Intégrer les données climatiques dans les schémas décisionnels et les processus d'application permettra à terme d'anticiper les dynamiques épidémiques des ravageurs et/ou maladies et de mesurer l'efficacité des produits de biocontrôle impactée par le changement climatique.



Photo 3 : Thermo hygromètre LoRATH pour vérifier les conditions des traitements BOTANIGARD 22 WP (B. bassiana). Essai sur jeunes plans de boutures horticoles avec Botanigard WP avec usage d'un film P17 pour le contrôle de l'hygrométrie, vérifiée par le capteur LoRATH Pessl. (Crédit photo ASTREDHOR Sud-Ouest)

3.3. Des capteurs d'images et de l'intelligence artificielle pour appréhender la survenue des épidémies

A la fin du projet, et compte tenu du principe même de l'usage des techniques d'intelligence artificielle qui impose le traitement de séries chronologiques importantes, le projet n'aura pas pu apporter toutes les réponses en matière de modélisation des épidémies à partir de jeux de données climatiques et épidémiologiques, car ces derniers sont encore trop partiels et nécessitent des jeux de données sur plusieurs années.

3.3.1. Des preuves de concept pour relier données épidémiologiques et données climatiques et éclairer les décisions d'intervention

L'un des axes de travail de cette étude a permis d'identifier les hétérogénéités climatiques au sein des compartiments équipés ainsi que les hétérogénéités d'une diversité de variables biotiques (maladies, ravageurs et auxiliaires ainsi que le stade phénologique) (Tableau 2). Quotidiennement plus de 5 000 données ont été collectées (25 variables sont mesurées chaque heure et les indicateurs calculés. 12 à 14 variables observées par semaine sur 24 à 32 points/zones d'échantillonnage fixes = +17 000 données biologiques brutes par an).

Tableau 2 : Extrait de données biologiques brutes avec différents indicateurs calculés (note de 0 à 3 type « Bulletin de santé du végétal » (BSV), taux d'absence, taux de présence)

Variables Numéro dispositif	*Dégâts*	*Stade phéno*	*Thrips*	*Pucerons*	*Chenilles*	*Botrytis*	*Phytoséides*	*Momie puceron*	*Oïdium*
Nombre de classe	5	6	7	6	5	5	5	5	5
1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
2	1	2	1	2	1	1	1	1	1
3	1	2	1	1	1	1	1	1	1
21	3	5	1	1	1	1	2	1	1
22	3	5	1	4	1	3	1	2	1
23	3	4	1	3	1	1	1	1	1
Note	2,0	5,5	0,3	2,6	0,0	0,5	0,6	0,5	0,2
Note BSV	0,6	1,7	0,1	0,8	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1
Taux d'absence	56,5	0,0	90,9	36,4	100,0	86,4	81,8	86,4	95,5
Taux de présence	43,5	100,0	9,1	63,6	0,0	13,6	18,2	13,6	4,5

Le projet a permis de créer les scripts pour mettre en forme les données horaires issues des capteurs et disponibles sur la plate-forme FieldClimate en données et indicateurs hebdomadaires statistiquement exploitables et comparables aux données biologiques recueillies au cours du projet, également sur un pas de temps hebdomadaire. Ainsi, les données telles qu'exportées de la plateforme sont présentées sur le tableau 3 (ci-après).

Tableau 3 : Extrait d'export de données brutes d'un thermohygromètre

	Température de l'air [°C]			*Point de rosée [°C]*		*Humidité relative [%]*			*DeltaT [°C]*		
Date/heure	moy	max	min	moy	min	moy	max	min	moy	max	min
2022-06-03 16:00:00	30,94	31,33	30,54	18,21	17,43	46,6	48,6	43,6	9	9	8
2022-06-03 15:00:00	28,83	30,45	26,6	19,17	18,07	56,1	66,2	47,5	7	8	5
2022-06-03 14:00:00	24,2	26,06	23,12	19,26	18,77	73,9	77,9	69,4	3	4	3
2022-06-03 13:00:00	22,4	23	21,62	19,17	18,57	81,9	85,1	78,7	2	3	2
2022-06-03 12:00:00	21,6	21,81	21,37	18,85	18,3	84,4	87,3	82,2	2	2	2
2022-06-03 11:00:00	22,08	22,39	21,85	19,52	18,87	85,3	88	82,5	2	2	1
2022-06-03 10:00:00	22,52	22,62	22,41	19,24	17,86	81,7	88,2	75,4	2	3	1

Plusieurs indicateurs hebdomadaires ont été créés pour chaque capteur (x9) sur la base de ces données afin d'étudier les éventuelles corrélations entre ces données et les occurrences de maladies, ravageurs et auxiliaires (Tableau 4).

Tableau 4 : Extrait d'export de données et indicateurs climatiques hebdomadaires. Non videsX : nombre de données climatiques horaires. Un nombre inférieur à 168 (=7*24) indique des données manquantes (perte de connexion entre la plate-forme LoRa et la station) ; SommeTX : cumul des températures horaires moyennes durant la semaine ; MinTX : température horaire minimale durant la semaine ; MaxTX : température horaire maximale durant la semaine ; Variation TX : Moyenne des écarts de température entre le jour et la nuit (Max-Min) sur les 7 jours de la semaine ; EcartypeTX : écart type de Pearson, qui mesure la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne ; TendanceX : coefficient directeur de la droite de régression sur la semaine, indique la tendance à la hausse ou à la baisse des températures ; TX_25 : nombre d'heures au-dessus de 25°C.

Semaine	*Non vides1*	*SommeT1*	*MinT1*	*MaxT1*	*VARIATIONT1*	*EcartypeT1*	*Tendance1*	*T1_25*	*T1_30*	*T1_35*	*T1_40*
38	168	3178,17	12,37	30,03	13,68	4,84	-0,10	21	1	0	0
37	168	3875,99	12,76	36,05	13,16	5,63	-0,47	58	23	4	0
36	168	3925,29	15,79	37,14	14,28	5,57	-0,08	62	23	4	0
35	168	4238,37	17,64	37,13	14,12	5,23	-0,05	76	41	7	0
34	168	4383,54	18,39	37,38	13,85	5,04	0,17	86	46	8	0
33	168	3956,15	16,77	32,69	12,76	4,53	0,04	67	14	0	0
32	168	4923,52	19,38	41,36	16,60	6,27	-0,09	111	70	44	5
31	168	4742,38	17,55	41,35	17,92	6,59	0,05	100	69	33	6
30	160	4048,84	15,93	37,18	15,37	5,77	0,18	80	46	5	0
29	168	4633,56	16,82	43,21	16,49	6,48	-0,11	98	65	21	6
28	168	5112,37	19,49	40,54	18,94	6,63	0,12	118	86	57	6
27	168	4350,18	16,94	36,37	15,14	5,65	0,32	92	54	7	0
26	151	3291,78	13,25	34,71	13,45	5,63	0,20	51	11	0	0

Des premières analyses de données, principalement descriptives, ont été conduites sur les données climatiques afin de quantifier les disparités spatiales. Un script R a été créé pour conduire cette analyse, qui vise principalement à identifier les zones significativement plus froides et les zones significativement plus chaudes. De plus, afin d'appuyer ces analyses, des cartographies ont été réalisées sous ArcGIS afin d'interpoler les données mesurées par les thermohygromètres (modèle d'interpolation exponentielle) et étudier les corrélations visuelles entre facteurs biotique et abiotique (Figure 4, 4 bis).

A ce stade, le projet ne permet pas d'exploiter des séries chronologiques complètes suffisamment longues pour en tirer des conclusions scientifiquement robustes sur la base de nombreuses répétitions. C'est pourquoi nous présentons un travail préliminaire exploratoire.

3.3.2. Mieux connaitre et anticiper l'émergence et les dynamiques d'une épidémie en parcelle

Les capteurs d'images sont un équipement innovant pour tenter d'anticiper la survenue des épidémies par la détection précoce des vols d'insectes qui s'appuie sur l'intelligence artificielle et l'expertise des utilisateurs qui alimentent les algorithmes de reconnaissance.

Deux typologies de capteurs du fournisseur autrichien Pessl Instrument ont été testés dans ce projet avec des efficacités différentes et surtout une nécessaire prise en compte de l'expertise des utilisateurs qui corrigent les erreurs de reconnaissance. Cela permet d'entrainer l'algorithme à mieux identifier les espèces d'insectes présents sur les plaques engluées photographiées.

- Le cas de l'iSCOUT « *colortrap* » (Photo 4)

Nous avons rencontré des difficultés pour l'identification des petits insectes (thrips, pucerons) très problématiques en cultures horticoles avec des confusions préjudiciables lors de présences importantes. De plus, il serait de bon aloi d'adapter la focale de l'appareil photo qui ne permet pas une détermination jusqu'à l'ordre du fait de la résolution (malgré une définition de 13Mpx).

Ainsi, les travaux conduits indiquent que des améliorations doivent être apportées à ce type de matériel, car l'imagerie photo n'est pas toujours suffisamment précise ni suffisante pour repérer ou identifier les petits insectes. Des difficultés de connexion avec l'équipe Pessl MetosFrance ont freiné la progression de la détermination des petits insectes. Le partenariat reste par ailleurs toujours actif avec Metos France pour l'ensemble des capteurs installés.

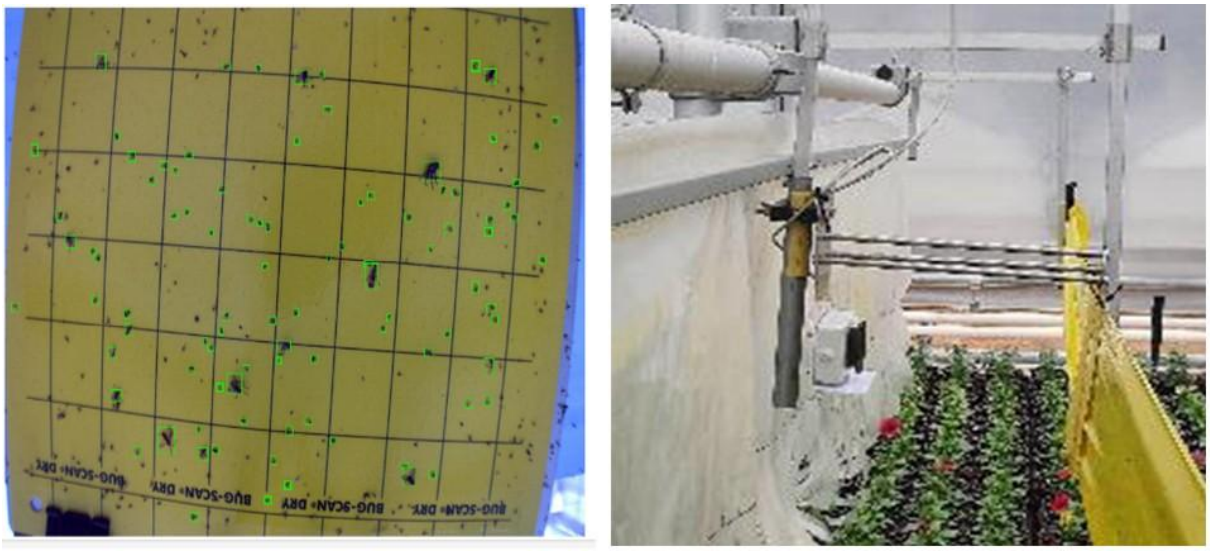


Photo 4 : Image de plaque engluée et capteur sur chariot de thigmomorphogènese en culture de plantes en pot. (Crédit photo ASTREDHOR Sud-Ouest)

- Le cas de l'iSCOUT Phéromone (Photo 5)

Ce type de pièges permet la reconnaissance très performante des lépidoptères avec un taux reconnaissance proche de 97%. L'interface et l'algorithme de reconnaissance sont implémentables avec facilité pour les lépidoptères. Un travail a été conduit pour *Chrysodeixis chalcites* et *Duponchelia fovealis* (deux problématiques en plantes en pot) et sur *Tuta absoluta* en culture de tomates.

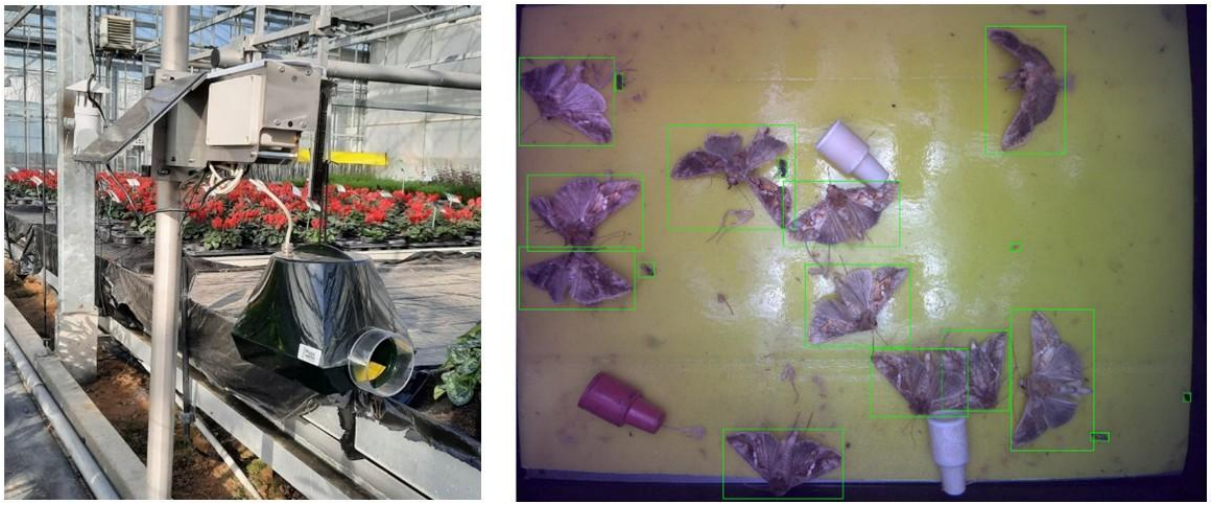


Photo 5 : Serre de potées fleuries à ASTREDHOR Sud-Ouest et image de capture de lépidoptères. (Crédit photo ASTREDHOR Sud-Ouest)

L'envoi automatique des photos sur la plateforme Fiedclimate est convivial ; toutefois, il convient de bien choisir les horaires photos et le nombre de photos par jour. En effet, malgré une cellule photovoltaïque pour recharger la batterie, nous avons noté une limite de la batterie pour un choix de nombre de photos trop important et pour une utilisation sous serre où les conditions de recharge sont réduites.

3.4. L'intérêt des capteurs en question

3.4.1. Des outils pour la recherche

Les outils et capteurs numériques constituent un enjeu majeur. En effet, les données et connaissances produites par les capteurs et les saisies épidémiologiques au cours du projet, même si elles s'inscrivent dans l'objectif de favoriser la transition agroécologique, posent la question de leur qualité et de leur gouvernance :

- expertise des utilisateurs de capteurs pour alimenter les algorithmes de reconnaissance sur les capteurs d'images ;
- service après-vente des fournisseurs pour une donnée de qualité en continu, pour éviter les « trous » d'information au cours d'une campagne de production ;
- nécessité d'un rapatriement des données sur les serveurs des partenaires (option identifiée dans le projet mais non réalisée du fait de problèmes rencontrés avec le développeur).

La production de données en séries chronologiques complètes et de qualité n'a pas pu être réalisée dans le cadre de ce projet, mais les outils sont disponibles sur les sites expérimentaux conduits en « zéro-pesticide » pour poursuivre le travail *et al*imenter des travaux de recherche en modélisation. L'objectif reste la co-conception de modèles prédictifs robustes qui viendront éclairer les prises de décisions.

C'est pourquoi nous pensons d'une part que des partenariats gagnant-gagnant doivent être coconstruits avec les fournisseurs de capteurs à l'issue ou au cours des projets de recherche et, d'autre part, qu'un outil tel que Baco, outil de service coconstruit, sera amené à collecter ce type de données de terrain, et qu'il doit être géré par un consortium de partenaires dans le cadre d'une structuration originale à coconstruire.

Le numérique et les capteurs pourraient accompagner et accélérer des transitions vertueuses mais il est impératif d'anticiper et d'éviter les écueils liés à des mésusages (Bellon-Maurel *et al.,* 2022) soit par les fournisseurs (accaparement de l'expertise) soit par des attaques sur les systèmes (question de cybersécurité). Disposer d'un minimum de capteurs robustes, simples d'utilisation et pertinents tels que les LoRATH testés dans ce projet semble être un bon compromis au tout numérique notamment pour bien prendre en compte la diversité des agricultures et répondre au besoin d'aide au pilotage (De Solan *et al.*, 2015).

3.4.2. Des services pour les conseillers et les producteurs : des outils de terrain

Les capteurs et les services numériques proposés dans ce projet visent à développer un conseil » numérique » personnalisé s'appuyant sur des données spatialisées (données épidémiologiques, capteurs thermo-hygromètre positionnés au cœur des cultures). Ce conseil prendrait deux formes, soit directement disponible pour l'agriculteur via les interfaces et des alertes climatiques implémentables sur les outils tel que FieldClimate, soit via le conseiller agricole qui va traiter l'information avec des outils numériques et générer des alertes et des recommandations accessibles aux agriculteurs.

L'intérêt des capteurs LoRATH bas débit est démontré pour l'identification de zone à risques dans les parcelles, grâce aux cartographies températures/hygrométries parcellaires. Il en est de même pour les

capteurs d'images qui embarquent des algorithmes de reconnaissance, notamment le capteur à phéromones, très pertinent pour la problématique de lépidoptères. Il permet de bien mesurer l'importance des vols d'insectes, donc les potentiels dégâts aux cultures et ainsi anticiper les interventions biologiques.

4. Conclusion et perspectives

Du fait d'un cortège de bioagresseurs important dans les systèmes horticoles, le suivi épidémiologique dans les différents systèmes devient un élément crucial de la décision. Son automatisation permet de gagner du temps, de l'efficacité et participe à la formation des utilisateurs professionnels (expérimentateurs, conseillers et producteurs) (Reboud *et al.,* 2017). Le projet SAMOSA soutenait cette idée et proposait un panel de capteurs climatiques et d'images à tester dans la vie réelle et l'utilisation des données produites par l'expertise (épidémiosurveillance).

Le projet SAMOSA a permis de sélectionner un ensemble de capteurs d'intérêts robustes pour le suivi des cultures spécialisées (capteurs : températures, hygrométrie, images). Toutefois, des améliorations à apporter subsistent, notamment sur les algorithmes de reconnaissance des bioagresseurs, sur le matériel (focales pour photos) ou les méthodes pour sécuriser des séries chronologiques complètes pour tester des méthodes de modélisation.

Ce projet confirme par ailleurs que dans le cadre des technologies numériques, le conseiller doit passer d'une activité de collecte d'informations sur le terrain (entretien, tour de champs ou capteurs), à une activité d'apport de connaissances et compétences à l'aide du numérique (Eastwood *et al*., 2019).

L'utilisation de capteurs robustes et parcimonieux tels que ceux identifiés dans le projet confirme que les horticulteurs ne doivent pas être reconvertis en objets générateurs de données, produisant des données environnementales commercialement viables par le biais de technologies propriétaires, et parfois interprétés comme des marchandises (Gardezi et Stock 2021) mais comme des utilisateurs avertis s'appuyant sur une expertise coconstruite par de la donnée numérique et de la donnée relationnelle (chercheurs, conseillers) dans des écosystèmes partenariaux de gestion des données (recherche académique, recherche appliquée, conseil, producteur).

En matière d'agriculture de précision, l'objet de nos projets est la co-conception et la co-utilisation de l'outil numérique Baco et des capteurs de façon aussi à générer des alertes producteurs ou des diagnostics territoriaux qui alimentent les bulletins de santé du végétal et ainsi un service d'intérêt général.

Des outils au plus près des cultures pour un conseil optimisé doivent répondre aux besoins de facilitation du travail des acteurs du monde agricole, au plus près de la culture (De Solan *et al.,* 2015). L'enjeu essentiel dans le cas des cultures horticoles est bien la combinaison des sources de données (épidémiologiques et climatiques) en temps réel et à coût acceptable (réseaux sans fil type Lora) pour une décision appuyée par un conseil personnalisé et complet.

En matière de détection précoce d'insectes, d'autres pistes de recherche sont à inventer. Elles pourraient, au-delà des algorithmes de reconnaissance, s'attacher à identifier d'autres marqueurs de la présence des insectes, par exemple leurs traces acoustiques, leurs traces olfactives, ou l'énergie source de chaleur, de vibration qu'ils déploient pour se déplacer.

Le projet SAMOSA se poursuit au travers des projets DEPHY Ecophyto 2.ZERHO 2019-2024, FAM SESAME 2021-2023-24 et du projet européen ADVISORY NETworks to reduce the use and risks of PESTicides 2023-2027.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Les auteurs de cet article sont ceux qui ont mené les recherches durant ces 3 années et demi, et qui ont occupé les rôles de chef de projet et de responsables des sites où les expérimentations ont été réalisées.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des équipes techniques et administratives des instituts ASTREDHOR et unités Territoriales, de l'institut ARMEFLHOR pour leur participation, et une attention particulière à Catherine Auguet-Chadaj et Philippe Castagnone de l'INRAE UMR institut Sophia-Agrobiotech à Sophia-Antipolis pour leur soutien.

Déclaration de soutien financier

Compte d'affectation spécial développement agricole et rural et Interprofession VAL'HOR.

Références bibliographiques

Bellon-Maurel V., Brossard L., Garcia F., Mitton N., Termier A., 2022. Agriculture et numérique –livre blanc- Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables.

Bout A., Boll R., Mailleret L., Poncet C., 2010. Realistic Global Scouting for Pests and Diseases on Cut Rose Crops. Journal of Economic Entomology 103, 2242-2248.

De Solan B., Closset M. Desbourdes C. Février 2015. Aide au pilotage des cultures –Des technologies très complémentaires. Dossier Perspectives agricoles -N°419

Eastwood Callum, Margaret Ayre, Ruth Nettle, and Brian Dela Rue. 2019. « Making Sense in the Cloud: Farm Advisory Services in a Smart Farming Future. » NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences 90–91.

Paris B., Boll R., Doise S., Bout A., Robert F., Maugin E., Drouineau A., Denegri T., Cabeu I., Tragin M., Poncet C., 2015. Un réseau d'expérimentations et des outils télématiques innovants pour réduire l'usage des pesticides en horticulture. AFPP : Cinquième conférence internationale sur les méthodes alternatives de protection des plantes – Lille.

Paris B., Doise S., Poncet C., Maugin E., Drouineau A., Denegri T., Cabeu I., Fillatre J., Suay R., Tragin M., 2017 - S@M : un outil d'aide à la décision développé par l'UMT FioriMed pour accompagner la réduction des pesticides en horticulture. Phytoma 12-14.

Paris B., Doise S., Fatnassi H., Maugin E., Fillâtre J., Cabeu I. Drouineau A., Denegri T., Poncet C., 2019 – OTELHO : Vers une horticulture connectée, suivi des macroorganismes pour réduire les pesticides. Innovation agronomique 2019.

Paris B., Keraudren L., Doise S., Maugin E., Cambournac L., Fillatre J., Cabeu I., Bourgeois N., Robert F, Fatnassi H., Pecou E., Poncet C. 2022 - S@MOSA : Des capteurs et des algorithmes pour une horticulture connectée qui réduit ses usages de pesticides. AFPP : Septième conférence internationale sur les méthodes alternatives de protection pour une production intégrée – Lille.

Paris B., Calvaire R., Keraudren L., Maugin E., Njike D., Fillâtre J., Cabeu I., Descamps S., Cambournac L., Henry S., Ambrogio S., Robert F. 2024 2.ZERHO : Des systèmes horticoles pilotés en zéro pesticide avec des combinaisons de leviers. (en cours d'écriture)

Penguilly D., Collet J.M., Porteneuve C., Allainguillaume J., Orsini F., Rovarch G., Abjean-Uguen A., Juin A., Le Cunff Y., Rostoll G., Le Roux M., Estorgues V., 2018, Evaluation de systèmes de culture de légumes frais à bas intrants phytosanitaires en Bretagne : l'expérimentation système DEPHY Ecophyto BREIZLEG

Pizzol J., Nammour D., Rabasse J.M., Parolin P., Desneux N., Poncet C., Reynaud P., 2014. Species and population dynamics of thrips occurring inside and outside greenhouses cultivated with roses in southern France. International Journal of Agricultural Policy and Research, 2(4), 141-153.

Reboud X., Carpentier A., Aubertot JN., Lemarié S., Peyrard N., Turenne N., Roussey C., avec la collaboration de Couture S., Cellier V., Gaba S., Sabbadin R., Cros M-J., Toquebeuf P., Bonroy O., Barbier J.M. et Charbonnier E.2017. Ce que l'épidémiosurveillance apporte ou n'apporte pas encore à la moindre dépendance aux produits phytopharmaceutiques. *Innovations Agronomiques* 59 (2017), 81-91.

Robert F., Paris B., Doise S., Boll R., Bout A., Tragin M., Maugin E., Henry S., Poncet C. 2017. OAD Serre : Développement d'outils d'aide à la décision en cultures horticoles sous serres : vers une horticulture de précision. Innovations agronomique (55) 2017, 317-325.

Pour citer cet article : Bruno Paris, Léo Keraudren, Roxane Calvaire, Emilie Maugin, Jacques Fillatre, *et al*.. SAMOSA : Des capteurs climatiques et des outils numériques pour piloter des systèmes horticoles bas intrants phytosanitaires. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.227-241. 10.17180/ciag-2025-vol107-art17

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Myco3C : Identifier et limiter les risques de mycotoxines dans les céréales produites, stockées et transformées en circuit court.

Jean-Michel SAVOIE[4], Rodolphe VIDAL[1], Camille VINDRAS[1], Marie-Hélène ROBIN[2], Gwenaëlle JARD[2], Delphine SICARD[3]

[1] ITAB, Institut Technique de l'Agriculture et de l'Alimentation Biologiques, 149, rue de Bercy, 75595 PARIS Cedex 12, France

[2] École d'Ingénieurs de Purpan, 75 voie du TOEC, 31076 Toulouse cedex 3, France

[3] INRAE, UMR SPO, 2 place Viala, 34060 Montpellier, France

[4] INRAE, UR1264 MycSA, 71 avenue Édouard Bouleaux, CS20032, 33882 Villenave d'Ornon, Cedex, France

Correspondance : jean-michel.savoie@inrae.fr ; rodolphe.vidal@itab.asso.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art18

Résumé

La problématique de la contamination des céréales par les mycotoxines se pose aux agriculteurs, quel que soit le mode de conduite et le type d'agriculture. L'opinion publique qui est sensibilisée à la question des mycotoxines dans l'alimentation associe souvent l'agriculture biologique (AB) à un risque de contamination plus élevé. Par ailleurs un questionnement légitime apparaît sur la qualité sanitaire de produits céréaliers commercialisés en circuits courts rarement contrôlés. Cependant, il y a un manque de données spécifiques exploitables sur le risque d'occurrence des mycotoxines, pour une évaluation des spécificités du système céréalier en agriculture biologique chez les producteurs, stockeurs et transformateurs à la ferme avec de la vente en circuit court. Les données acquises dans le cadre du projet Myco3C mettent en lumière que la sensibilité des systèmes de production est équivalente mais que les filières courtes ne sont pas toujours sensibilisées à la problématique des mycotoxines. Il convient donc de proposer des recommandations aux agriculteurs afin de fournir de meilleures garanties aux consommateurs sur les niveaux de contaminations en mycotoxines.

Mots-clés : mycotoxines, circuit court, blé, maïs, farine, pain, pâtes

Abstract: Identify and limit the risks associated with mycotoxins in cereals produced, stored and processed in short distribution channels.

Farmers are confronted with the issue of mycotoxin contamination of cereals, regardless of the type of farming they practise. People who are aware of the presence of mycotoxins in food often associate organic farming with a higher risk of contamination. Legitimate questions are also being asked about the sanitary quality of cereal products marketed through short distribution channels, which are rarely inspected. However, there is a lack of specific, usable data on the risk of mycotoxins appearing, to assess the specific features of the organic farming cereal system among farmers growing, storing and-processing on farms involved in producer-to-consumer food chains. The data acquired as part of the Myco3C project provide answers on the sensitivity of these production systems, raise farmers' awareness of the mycotoxin issue, and offer them recommendations, thus providing consumers with better guarantees on mycotoxin contamination levels.

Keywords: mycotoxins, producer-to-consumer food chain, wheat, maize, flour, bread pasta

1. Introduction

Les mycotoxines, métabolites secondaires produits par divers champignons filamenteux microscopiques, présentent des risques importants pour la santé humaine et animale en raison de leurs propriétés toxiques et de leur présence fréquente (25 % d'occurrence moyenne au-dessus des seuils européens et jusqu'à 80 % d'occurrence au-dessus des seuils de détection) dans les denrées alimentaires (Eskola *et al*. 2020). La contamination par les champignons et les mycotoxines étant un problème sanitaire reconnu, des limites législatives ont été introduites afin de protéger la santé des consommateurs. Les règlements (UE) 2023/915, 2024/1022, 2024/1038, de la Commission Européenne fixent des teneurs maximales pour les mycotoxines suivantes dans les céréales ainsi que leurs produits dérivés : aflatoxine B1 et somme aflatoxines B1, B2, G1 et G2, ochratoxine A (OTA), déoxynivalénol (DON), toxines T-2 et HT-2 (T2+HT2) zéaralénone (ZEA), fumonisines (somme FB1+FB2). Les aflatoxines et l'OTA sont principalement produites en post-récolte par des espèces d'*Aspergillus* et *Pénicillium*, alors que les autres mycotoxines sont produites par des espèces de *Fusarium* infectant les épis au champ. Une espèce de *Fusarium* peut produire plusieurs mycotoxines et une mycotoxine peut être produite par plusieurs espèces de *Fusarium*.

Plusieurs stratégies physiques, chimiques et biologiques peuvent être appliquées au cours de la culture et de la transformation des céréales afin de minimiser leur apparition à différents stades de la chaîne de production. Elles ont été développées dans des contextes éloignés du système céréalier, en agriculture biologique (AB) par des producteurs, stockeurs et transformateurs à la ferme avec vente en circuits courts. Les stratégies au champ visent à prévenir la formation de mycotoxines en limitant la contamination fongique par les agents responsables des fusarioses ; elles incluent le maintien de bonnes pratiques agricoles (rotations avec des cultures non sensibles, broyage et enfouissement des résidus de récolte), l'utilisation de fongicides ou la sélection de variétés de cultures tolérantes. Cependant, le facteur de risque principal est le climat, principalement autour de la floraison. La réduction du développement des moisissures et de la contamination par les mycotoxines après la récolte est généralement très difficile, voire pratiquement impossible. Seules des mesures préventives pour maintenir la température et l'humidité à des niveaux inférieurs aux besoins des champignons évitent des sur-contaminations par les mycotoxines fusariennes et l'apparition d'aflatoxines et OTA (Fleurat-Lessard 2017, Oswald *et al*. 2024).

Diverses études comparant agriculture conventionnelle et biologique sur les risques de contaminations en mycotoxines au champ arrivent à des conclusions contradictoires ou à l'absence de différence significative (Wang *et al*. 2024). Après récolte, les blés et maïs stockés et transformés à la ferme dans des exploitations en circuits courts, ne rentrent pas dans les circuits classiques des organismes stockeurs et meuneries industrielles qui pratiquent des contrôles de qualité sanitaire avec analyses de mycotoxines pour limiter le risque de contamination des produits alimentaires commercialisés. Pour des raisons économiques (coût des analyses à réaliser par rapport à la taille réduite des lots et leur diversité), ou du fait d'un manque de sensibilisation à cette problématique, les producteurs-stockeurs-transformateurs ne réalisent que très rarement des recherches de mycotoxines. Ainsi, les circuits courts céréaliers qui sont majoritairement en AB sont souvent interrogés sur les risques de contamination en mycotoxines sans pouvoir s'appuyer sur des données fiables. Les risques liés à ces systèmes nécessitent d'être évalués pour eux-mêmes dans leur diversité, sans se référer aux systèmes conventionnels, et maîtrisés avec des moyens spécifiques.

Ainsi le projet Myco3C s'est intéressé à la maîtrise de la contamination en mycotoxines des grains de blé et maïs produits, stockés et transformés à la ferme dans des exploitations en circuits courts, majoritairement en AB, en intégrant les contaminations au champ et le devenir des mycotoxines en première transformation (meunerie, semoulerie, fabrication de pâtes et de pain). Pour déterminer dans quelle mesure les contaminations en champignons mycotoxinogènes et en mycotoxines présentent des profils particuliers (en quantité et qualité) dans ce système intégré de production céréalière, nous avons

croisé les données de contamination avec les itinéraires techniques et technologiques, tout au long de la chaîne de valeur. Puis, nous avons recherché les risques spécifiques qui pourraient être associés à la diversité des pratiques agronomiques par ces agriculteurs (utilisation de variétés populations ou lignées pures, longueur des rotations, quantités et qualités d'intrants, etc.), aux modes de stockage et aux technologies utilisées pour la mouture et la transformation des farines. Une approche expérimentale complémentaire a précisé les conséquences de conditions de stockage et de modalités de premières transformations sur le devenir des mycotoxines. Finalement des recommandations ont été produites et diffusées auprès des acteurs, pour diminuer les risques et augmenter le niveau de qualité sanitaire des céréales et leurs produits transformés pour l'alimentation humaine, dans ce contexte agricole de circuits courts en plein essor.

2. Connaissance des niveaux de contamination en mycotoxines des grains et produits céréaliers issus d'agriculteurs valorisant leurs grains en circuits courts de proximité

Pour acquérir des références sur les niveaux de contamination en mycotoxines et la flore fongique associée, du champ au produit de première transformation, et identifier des typologies de pratiques affectant positivement ou négativement le risque de contamination en mycotoxines, une collecte d'échantillons et de données sur les itinéraires techniques, des facteurs climatiques, et une notation de présence de fusariose ont été réalisées par les partenaires des GAB régionaux (Groupement Agriculteurs Biologiques) chez une quarantaine d'agriculteurs volontaires sur deux années de culture (récoltes 2020 et 2021) à la récolte, après stockage et parfois après transformation. Il s'agissait majoritairement de blé panifiable, mais aussi de blé poulard et de maïs populations. Des analyses multi-mycotoxines ont été pratiquées sur ces échantillons par un laboratoire prestataire habilité par l'INAO et accrédité Cofrac (Capinov, Landerneau, France). Des détections d'espèces de *Fusarium* ont été réalisées par PCR en temps réel avec des amorces spécifiques à l'UR1264 MycSA d'INRAE.

2.1. Niveaux de contaminations des blés panifiables et blés poulard et facteurs favorisants

2.2.1. Contaminations à la récolte

En 2020 et 2021, 37 parcelles de blé (variétés populations en majorité) ont été échantillonnées à la récolte chaque année. 45 % des échantillons présentaient des contaminations en trichotécènes B (DON et/ou Nivalénol -Niv-) quantifiables. Des co-contaminations par de la ZEA ont été observées pour 27 %, et avec la toxine HT2 pour 21 %. Au niveau mondial, la prévalence de DON et ZEA dans les grains est de 60 et 80 % respectivement (Eskola *et al* 2019). Cependant, ces données correspondent à des mesures au-dessus des limites de détection alors que dans cette étude nous ne considérons comme contaminés que les échantillons dépassant les limites de quantification qui sont un peu plus élevées. Globalement les concentrations en DON étaient assez faibles et respectaient la limite maximale autorisée dans le règlement EU 2024/1022 (1000 µg/kg), compte tenu de la prise en compte des incertitudes de mesures. Seul un échantillon n'était pas conforme en 2021 (Figure 1). Les contaminations en autres mycotoxines étaient également à des niveaux faibles respectant largement les règlements UE 2024/1038 pour les toxines T2/HT2 (50 µg/kg) et 2023/915 pour la ZEA (100 g/kg).

Aucun *Fusarium culmorum* (producteur de DON) n'a pas été détecté dans les échantillons analysés et *F. sporotrichioïdes* (producteur de toxines T2/HT2) ne l'a été que marginalement. *Fusarium graminearum* producteur de (DON) et *F. poae* (producteur de Niv) étaient associés dans presque tous les échantillons contenant du DON, avec ou sans Niv, mais *F. graminearum* était toujours en plus grande abondance avec des valeurs plus élevées dans les échantillons fortement contaminés. *Fusarium poae* était présent dans tous les échantillons contaminés en Niv. Nous avons observé une

assez bonne cohérence entre les teneurs en mycotoxines et les champignons producteurs, sauf pour la contamination en T2/HT2.

Globalement notre étude n'a pas mis en évidence un niveau de contamination en mycotoxines à la récolte qui permette de considérer que ce mode de production en agriculture biologique et en circuits courts utilisant des variétés populations soit particulièrement sensible.

Le second facteur déterminant était le type de blé, blé tendre ou blé poulard. La comparaison d'échantillons provenant du Sud-Ouest montre une incidence plus importante du DON dans les blés poulard assimilés au blé dur. Nous avons comparé les données de teneur en mycotoxines de blé tendre et de blé poulard provenant d'un même agriculteur. En 2021, 5 couples d'échantillons ont été identifiés. La moyenne des teneurs en DON des blés poulard (445 µg/kg) était significativement supérieure à celle des blé tendres (134 µg/kg) ainsi que pour deux couples en 2020 avec 1001 et 453 µg/kg. Il semble donc que l'on retrouve, avec les variétés population assimilées au blé dur ou blé tendre, la même tendance à une sensibilité supérieure des blés durs par rapport aux blé tendres, connue pour les variétés actuelles (Delgado *et al*. 2014).

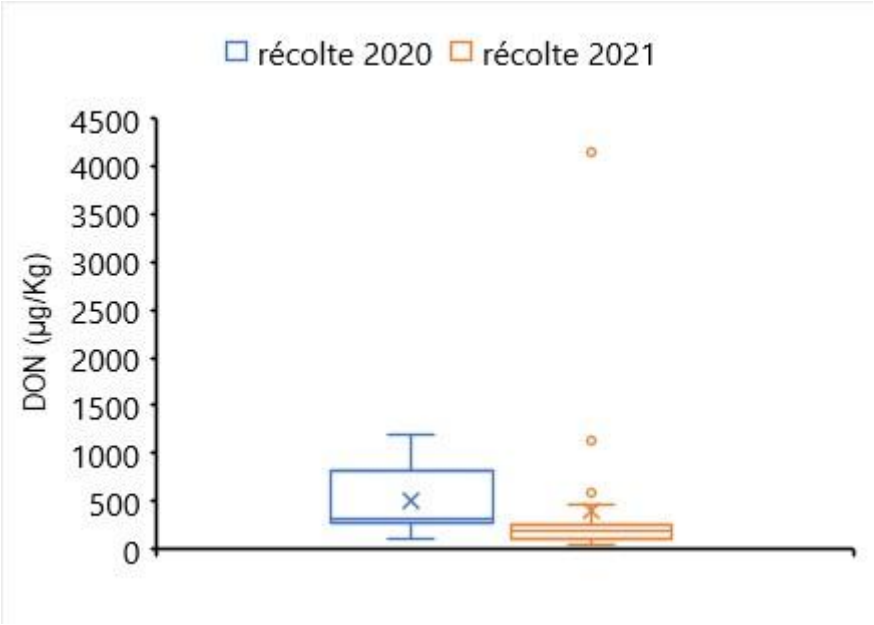


Figure 1 : Box plot des concentrations en DON (déoxynivalénol) supérieures aux limites de quantification dans les échantillons de grains de blé collectés à la récolte, en 2020 et 2021.Parmi les facteurs associés à la présence des quatre mycotoxines détectées, le principal a été la localisation géographique des échantillons. Ils provenaient très majoritairement du Sud-Ouest (Occitanie et Aquitaine) de la France, alors qu'aucune contamination n'a été révélée sur des échantillons de Haute-Loire ou de la région PACA. Ceci est associé aux conditions climatiques favorables aux contaminations des épis par les *Fusarium* spp cette année-là. En rajoutant des résultats d'analyses de DON sur des échantillons provenant de la plateforme expérimentale de l'École d'Ingénieurs de Purpan et des données climatiques, nous n'avons pas pu confirmer qu'une précipitation d'au moins 40 mm autour de la floraison était un facteur favorable à la contamination en mycotoxines comme cela est souvent évoqué (Schaafsma et Hoocker 2007). Par contre, les niveaux de pluie enregistrés quelques semaines avant étaient les facteurs les mieux corrélés (Bonnet *et al*. 2022). Les modèles climatiques prédictifs de risque de contamination par les *Fusarium* spp et leurs mycotoxines, construits à partir de données des décennies précédentes, devraient être révisés pour tenir compte d'une combinaison d'effets du changement climatique et du type d'agriculture (Savoie *et al*. 2024).

Pour aborder la question des effets des pratiques culturales sur le risque de contamination, un travail collaboratif avec tous les partenaires a permis d'établir une liste de pratiques spécifiques à la filière courte et leurs potentiels impacts sur les contaminations. Ces données ont été rassemblées dans un arbre de décision pour contrôler le risque de mycotoxines en agriculture biologique en petites exploitations, conçu à partir des données de 2020 et validé avec celles de 2021 (Figure 2). Malgré le faible nombre d'échantillons, nous avons pu confirmer certains effets de pratiques culturales sur les contaminations en DON (Tableau 3), connu dans la littérature.

Les pratiques suivantes sont recommandées pour limiter les contaminations en mycotoxines, d'après les données collectées dans ce projet : le désherbage, l'enfouissement des résidus de récolte par labour et un semi très tardif. Le facteur 'précédant cultural' n'est pas ressorti clairement ici du fait d'une quasi généralité des rotations longues dans les parcelles retenues avec retour de céréales après deux années ou plus de cultures moins sensibles.

Les stockages à la ferme étaient réalisés dans de petites cellules ventilées, en big-bag ou en 'remorques'. Les résultats d'analyses de mycotoxines n'ont pas révélé d'évolution significative des mycotoxines du champ pendant le stockage (Vidal *et al*. 2023). En 2020, année caractérisée par un été chaud et sec, les grains ont été rentrés en stockage dans des conditions d'humidité très favorables et il n'y a pas eu de contamination par des mycotoxines de stockage (OTA et aflatoxines). Cependant, en 2021 de l'OTA a été mesurée dans 4 échantillons après stockage à des teneurs faibles de 0,26 à 1,6 µg/kg. Le stockage à la ferme dans les systèmes étudiés ici semble être pratiqué de façon à conserver la qualité sanitaire des grains.

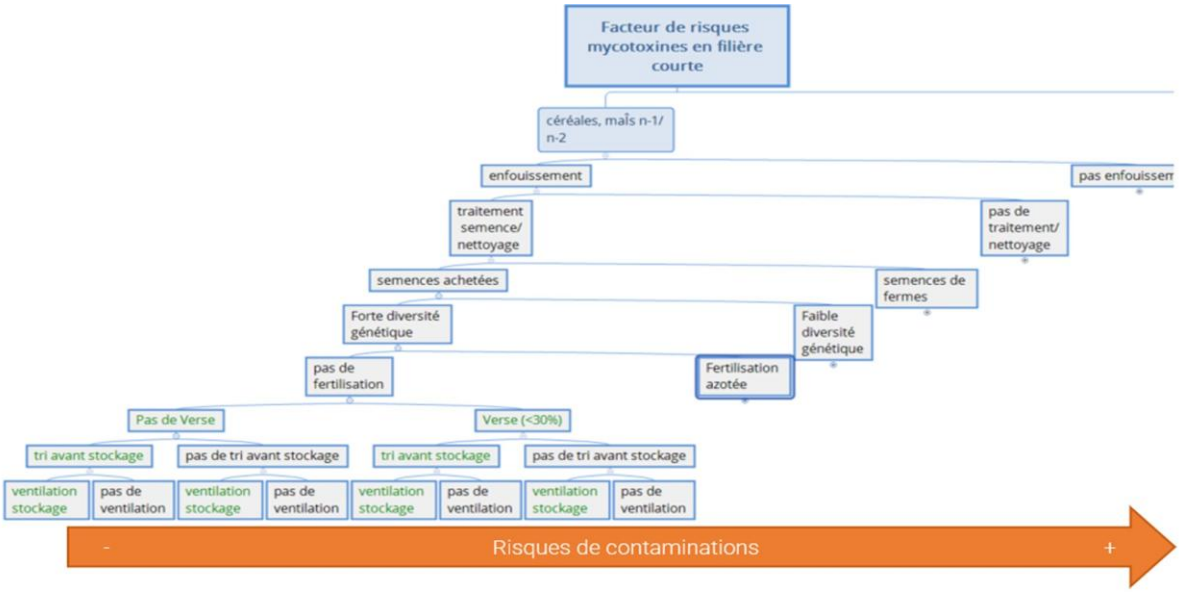


Figure 2 : Arbre de décision pour minimiser les risques de contamination en mycotoxines en filière blé tendre de petites exploitations en circuits courts, contaminations post-récolte

Il est donc recommandé aux agriculteurs de poursuivre leurs pratiques et de rester vigilants sur la phase de séchage et refroidissement des grains en début de stockage quand les grains sont récoltés dans des conditions d'humidité défavorables.

Pour quelques fermes, des échantillons de farine et issues (sons) ont pu être obtenus. De façon générale, les teneurs en DON, Niv ou ZEA mesurées dans les farines n'étaient pas significativement différentes de celles des grains (compte tenu des incertitudes de mesures). Par contre, les concentrations des issues étaient significativement plus élevées (Figure 3). Fréquemment des toxines T2/HT2 devenaient quantifiables dans ces issues alors qu'elles ne l'étaient pas dans les grains et les

farines. Ces observations de distribution des mycotoxines sont conformes à ce qui est connu (Pinson-Gadais *et al*. 2007). Il est à noter qu'en cas de concentrations du grain proches des teneurs maximales autorisées (1000 µg/kg pour le DON), mais encore conformes, la farine peut dépasser ces limites qui sont abaissées (600 µg/kg). L'utilisation du son comme additif ou pour l'alimentation animale peut présenter des risques.

Treize fermes produisant du maïs population destiné à l'alimentation humaine ont été suivies au cours de la saison 2020 et/ou 2021. Elles étaient réparties sur deux territoires distincts. Les pratiques des fermes suivies dans le Pays Basque présentent des caractéristiques très similaires, toutes étant intégrées dans une « filière » autour du Grand Roux Basque. Dans le Périgord, les variétés ainsi que les itinéraires techniques sont plus diverses (densité de semis, date récolte, mode de stockage). Ces deux territoires sont à risque potentiel de contamination élevé, du fait du climat. Des prélèvements d'échantillons ont été réalisés à la récolte puis après stockage entre 8 et 9 mois. Pour 8 de ces origines, de la farine et de la semoule complètes obtenues sur meules de pierre à partir des mêmes lots ont également été échantillonnées et analysées.

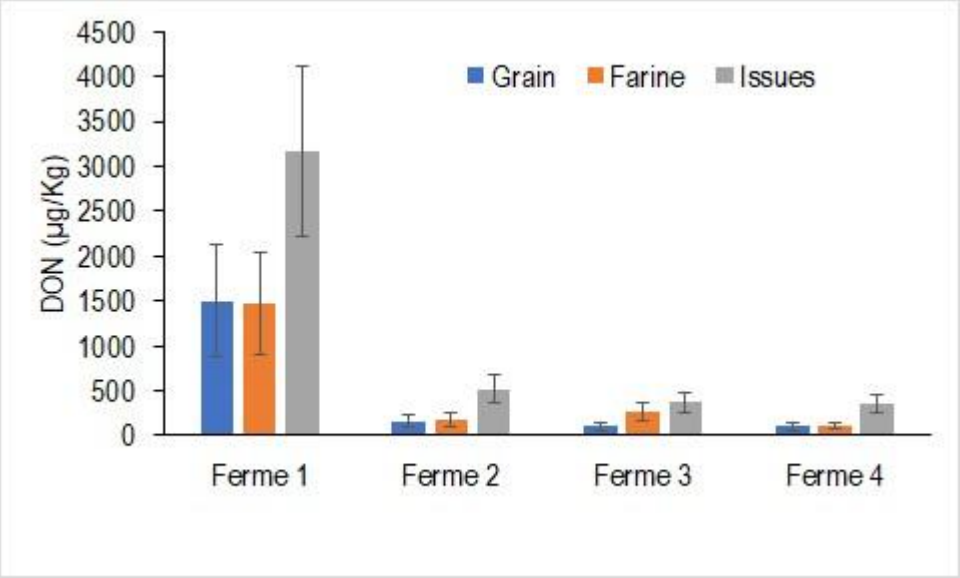


Figure 3 : Exemples d'évolution des teneurs en DON (déoxynivalénol) entre le grain et les produits de mouture. Barres d'erreur = incertitudes. Contamination de maïs population du Sud-Ouest pour l'alimentation humaine

2.2.2. Fusarium et toxines fusariennes produites au champ et pendant le stockage

La majorité des échantillons analysés à la récolte étaient contaminés par *F. graminearum* et contenaient du DON (10/13). Sept d'entre eux contenaient aussi de la ZEA. *F. poae*, producteur de Niv, *F. sporotrichioides* producteur de toxine T2/HT2, et *F. verticillioïdes*, producteur de fumonisines, étaient peu présents à la récolte. Cependant les toxines ont été détectées dans 7, 8 et 9 échantillons respectivement (Savoie *et al*., 2023). En prenant en compte les incertitudes, tous les échantillons étaient conformes à la législation européenne relative au maïs pour les concentrations en DON (1500 µg/kg), T2+HT2 (100 µg/kg), ZEA (350 µg/kg), et FB1+FB2 (4000 µg/kg) (Figure 4).

Cependant, au cours du stockage des sur-contaminations en moisissures et mycotoxines ont été observées dans différents échantillons (Tableau 1). Ainsi, alors que tous les échantillons étaient conformes à la récolte, certains dépassaient significativement les valeurs maximales autorisées après stockage. C'est le cas en particulier pour les origines A et C et les teneurs en DON, ZEA et T2+HT2. Cela s'accompagnait d'une augmentation des quantités d'ADN de *F. graminearum* et *F. poae* et dans une moindre mesure *F. sporotrichioides*. L'origine M dépassait la limite pour la ZEA. Pour les 4 origines

(A, B, C, M) qui montraient des augmentations de concentration en mycotoxines, le stockage était effectué en cribs. Cependant c'était aussi le cas pour H, I, J, K et L pour lesquelles les concentrations en mycotoxines étaient assez faibles à la récolte et stables, voire diminuaient pendant le stockage. Parmi les trois origines où le stockage n'était pas réalisé en cribs, F dépassait la limite réglementaire pour la somme FB1+FB2 après stockage et montrait un développement de *F. verticillioides*. Pour les autres (D, E), les concentrations de toutes les mycotoxines étaient stables (Savoie *et al*. 2023).

Cette étude sur des variétés populations de maïs cultivées en AB a permis de confirmer la relation attendue entre la présence des différentes espèces de *Fusarium* et les contaminations en mycotoxines au cours de la culture et de développements ultérieurs potentiels au cours du stockage. Une forte variabilité entre les niveaux de contamination a été révélée, mais, du fait du nombre d'échantillons restreint, il n'a pas été possible de l'associer précisément à des pratiques culturales ou de stockage ou autres facteurs à part la localisation sur un territoire pourtant restreint. Le séchage et stockage en cribs se sont cependant avérés comme un facteur d'amplification du risque de sur-contamination en mycotoxines de *Fusarium* probablement associé à des situations climatiques locales particulières. Mais il est aussi possible d'avoir un stockage convenable avec ce type de pratique.

Il est donc recommandé aux agriculteurs qui souhaitent poursuivre ce mode de stockage, associé à une typicité locale du produit commercialisé, de protéger au mieux leurs cribs de sources d'humectation, de surveiller les évolutions des épis (visuelles et mesures de taux d'humidité des grains) et d'avancer dans la saison leur date d'égrainage et entreposage des grains, pour éviter les périodes de températures extérieures supérieures à 15°C.

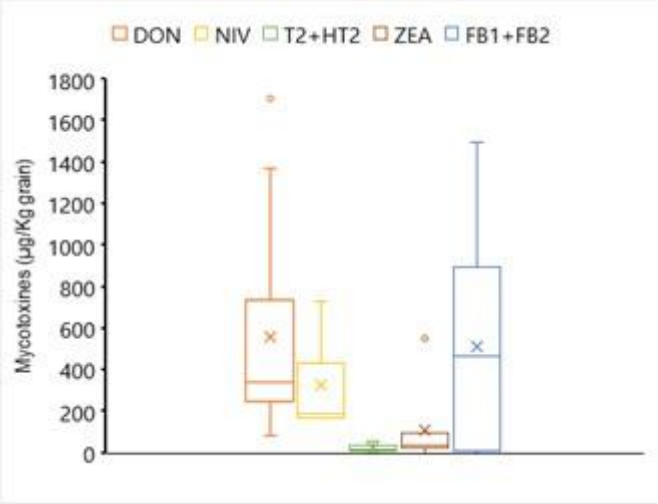


Figure 4 : Box plot des concentrations en mycotoxines supérieures aux limites de quantification dans les échantillons de grains de maïs collectés à la récolte.

Tableau 1 : Évolution des concentrations en mycotoxines dans les échantillons de grains de maïs au cours du stockage dans différentes fermes (A, B, C…). DON : déoxynivalénol, Niv + Fx : Nivalénol + Fusarénone X, toxines T-2 et HT-2, ZEA : zéaralénone, FB1 + FB2 + FB3 : fumonisines. Nd = non détecté ; 0 = faible concentration à récolte et non détecté après stockage. * absence à la récolte mais quantifiée à plus ou moins grande concentration après stockage ; > = augmentation significative pendant le stockage (> = 1 à 5 fois, >> = 6 à 20 fois, >>> = plus de 20 fois ; < = diminution significative pendant le stockage (plus de 50 %).

	DON+15-ADON	Niv+Fx	T-2+HT-2	ZEA	FB1+FB2+FB3
A	>	>	>>	=	*
B	>	***	>	=	=

C	>>	***	**	>>>	*
D	<	<	=	=	=
E	=	nd	=	nd	>
F	=	nd	**	=	>>
G	=	>	**	*	=
H	<	<	0	=	0
I	*	nd	Nd	nd	=
J	*	*	Nd	*	nd
K	<	<	Nd	*	nd
L	Nd	<	0	nd	<
M	=	>>	>	>>>	<

2.2.3. Devenir des mycotoxines dans les produits de mouture

La transformation primaire des grains peut causer une redistribution des mycotoxines par fractions (Schaarschmidt et Fauhl-Hassek, 2021). Cependant, il n'y a pas de référence concernant les productions de farines et semoules complètes obtenues sur meule de pierre. En raison des valeurs d'incertitude des mesures, les différences de concentrations en mycotoxines entre les grains et les produits de mouture enregistrées ici n'étaient significatives que pour quelques cas (tableau 2).

Parmi les trois origines assez fortement contaminées en DON (A, B et C), les comportements variaient (Tableau 2). Pour A, la moitié du DON et Niv mesurés dans les grains a été retrouvée après la mouture dans la farine et la semoule, la moitié de la ZEA dans la semoule. Ces réductions sont généralement attendues par effet de fractionnement. Par contre, les fumonisines ont été concentrées dans la farine. Les concentrations de DON et de fumonisines dans la farine de B étaient 2 à 3 fois plus élevées que dans les grains. Celles de T2+HT2 et ZEA ont augmenté aussi fortement dans les deux produits de mouture. La hausse des fumonisines n'était significative que pour la farine. Par contre, celle du Niv n'a pas évolué. Pour C, aucune différence significative n'a été trouvée.

Ces différences apparentes dans les évolutions de concentration de mycotoxines lors du fractionnement peuvent en partie être expliquées par le soin apporté au nettoyage des grains avant mouture. Les données de la littérature révèlent que l'impact du nettoyage peut fortement varier d'un lot à l'autre, puisqu'il dépend de l'homogénéité du lot, de la qualité du grain, ainsi que du type et de la quantité de matière étrangère présente dans le lot (Schaarschmidt et Fauhl-Hassek, 2021). Mais un biais important peut être celui de l'hétérogénéité des contaminations à l'intérieur d'un stock de grains et de l'échantillonnage. Il n'a pas été possible de prélever le grain à l'entrée de la meule et les produits correspondant à la sortie. Ainsi il sera nécessaire de conduire des expérimentations contrôlées avec comparaisons de méthodes de nettoyage et tri et le suivi de petits lots de grains et leur mouture pour identifier une tendance sur le devenir des mycotoxines lors de la transformation primaire de grains entiers sur meules de pierre.

Quoi qu'il en soit, en raison des teneurs élevées dans les grains, les produits de mouture provenant de ces trois exploitations ont dépassé les teneurs maximales fixées par exemple à 750 µg de DON par kg de farine ou semoule (UE 2023/915 du 25 avril 2023 modifié par le règlement UE 2024/1022). Par ailleurs, l'origine F dépassait aussi la valeur maximale autorisée pour FB1+FB2 (1000 µg/kg), plus de 4 fois dans la farine et plus de deux fois dans la semoule, malgré un effet de dilution.

Tableau 2 : Transfert des mycotoxines des grains de maïs aux produits de mouture, farine et semoule. DON : déoxynivalénol, Niv + Fx : toxines T-2 et HT-2, ZEA : zéaralénone, FB1 + FB2 + FB3 : fumonisines. nd = non

détectée dans grains et moutures ; 0 = détectée dans grains, mais pas dans les moutures, * = différence significative.

	Rapport Farine / grain après stockage					Rapport Semoule / grain après stockage				
	Mycotoxines					Mycotoxines				
origine	DON+15-ADON	Niv+Fx	T2+HT2	ZEA	FB1+FB2+FB3	DON+15-ADON	Niv+Fx	T2+HT2	ZEA	FB1+FB2+FB3
A	0,54 *	0,49 *	1,68	0,65	2,85 *	0,4 *	0,44 *	0,92	0,42 *	1,51
B	2,74 *	1,22	4,08 *	8,17 *	3,02 *	1,72	0,76	2,89 *	4,56 *	1,62
C	1,24	1,4	0,12	1,43	1,18	1,03	1,06	0,19	1,35	0,90
D	2,29	1,34	2,9	7,48 *	1,47	1,59	0,72	1,58	1,14	0,44
E	0,93	nd	8,29 *	nd	2,56 *	0,63	nd	4,63 *	nd	1,17
F	0,61	nd	0,91	0,54	0,73	0,5	nd	0,66	0,39	0,39 *
G	0,91	0,82	0	0,87	0,58	1,46	0,99	0,51	1,99	1,02
H	1,72	0,45	nd	2,31	0	0	0	nd	0	0

Globalement, les niveaux de contamination étaient plus élevés dans les farines que dans les semoules, mais avec quelques exceptions (Tableau 2). Ce fait est bien documenté et avait été pris en compte dans la réglementation européenne pour laquelle les limites maximales pour les mycotoxines fusariennes sont 1,4 à 1,7 fois plus élevées dans les farines de maïs (au moins 90 % de particules < 500 µm) non mises sur le marché pour le consommateur final que dans les autres fractions ou dans tous les produits de mouture à destination directe du consommateur final.

Il est donc recommandé de ne pas transformer des grains de maïs suspectés d'être fortement contaminés en mycotoxines, puisque, malgré des effets de fractionnement, les semoules et farines produites resteront non commercialisables. Conséquences de conditions de stockage et de modalités de premières transformations sur le devenir des mycotoxines dans les blés

Pour compléter les informations obtenues avec les échantillons collectés chez les agriculteurs, des expérimentations ont été conduites à l'échelle du laboratoire et à l'échelle pilote pour tester les effets des conditions de température et d'humidité sur la contamination des grains après récolte et pour suivre le devenir des mycotoxines au cours de processus de panification ou de production de pâtes.

2.2. Conditions de contamination des grains pendant le stockage

La teneur en eau des grains et la température sont les facteurs principaux affectant l'activité des champignons toxinogènes présents dans et sur les grains et donc leur contamination finale en divers mycotoxines. Comme il n'est pas possible de maintenir toutes les parties d'un lot de céréales en-dessous de valeurs d'humidité critique pendant une période de stockage prolongée, il n'est pas rare qu'une infection par ces champignons se produise dans les céréales stockées sous des climats tempérés humides ou chauds, entraînant des pertes qualitatives irréversibles (Fleurat-Lessard, 2017). Les champignons toxinogènes les plus nocifs sont des espèces xérophiles appartenant aux genres *Aspergillus* et *Penicillium*. Leurs mycotoxines les plus préoccupantes du fait de leur toxicité sont les aflatoxines et l'ochratoxine A (OTA) qui sont réglementées. Il existe de nombreuses études sur les conditions de contamination des grains par ces mycotoxines. Cependant les sur-contaminations en mycotoxines dues aux espèces de *Fusarium* hygrophiles sont moins regardées, de même que nous manquons de données sur le devenir des mycotoxines présentes à la récolte, en fonction des conditions de stockage.

Des études ont été conduites à l'échelle du laboratoire sur des lots de grains de variétés anciennes (type population), issus de la partie 2.1, dont l'humidité relative (HR) a été ajustée à 16, 18, 21 et 25 %, en affectant le moins possible le microbiote de surface des grains. Ces grains ont été incubés un mois à

21, 25, ou 30°C. Les dénombrements des champignons par suspension dilution a montré une augmentation continue au cours de l'incubation. La contamination fongique n'était sensible qu'à partir de 21 % d'HR et le niveau le plus élevé était observé à 25°C. L'augmentation de 21 à 25 % d'HR amplifiait la contamination. Une diversité d'espèces peut être observée, avec notamment *Penicillium aurantiogriseum, Trichothecium roseum, P. polinicum, P. citreonigrum, P. viridicatum, Aspergillus fumigatus*. Concernant les mycotoxines, la contamination par l'OTA était significative après une semaine d'incubation, mais elle n'a été observée qu'avec 21 et 25 % d'HR et à 20 et 25°C. A 30°C, la contamination était sous le seuil de quantification. Les aflatoxines n'ont pas été détectées. Pour les fusariotoxines, dans la plupart des conditions testées, la concentration de DON était stable ou diminuait significativement (en particulier aux HR et températures les plus basses). Cela s'accompagnait parfois d'augmentations des teneurs en Niv et 15-ADON. Mais l'événement le plus notable a été l'apparition de fortes quantités de ZEA à 21 % d'HR pour des températures de 20 et 25°C. L'effet était plus modéré à 30°C (Arias Benavides 2021 ; Domenech 2022).

Au vu de ces données obtenues avec des échantillons de variétés anciennes de blé (type population) produites en AB, il est donc recommandé aux agriculteurs stockant leurs grains de maintenir une humidité du grain à des valeurs au moins inférieures à 20 % et des températures inférieures à 25°C ou supérieures à 30°C pour contenir la contamination par l'OTA et la ZEA. Proche de ces plages, il est possible d'obtenir un effet bénéfique sur la dégradation du DON du fait de l'activité du microbiote des grains. Cependant, du fait des difficultés de maîtrise des conditions climatiques dans l'écosystème grain, cette approche ne peut pas être préconisée pour décontaminer un stock. Il est préférable d'essayer de conserver les grains dans les conditions défavorables à toute activité fongique, à savoir moins de 15 % d'HR et 15°C, tout au long du stockage en évitant les hotspots de réhydratation et de limiter le temps de stockage en cas de doutes (Fleurat-Lessard, 2017).

2.3. Devenir du DON et de l'OTA pendant la mouture

Des lots de grains contaminés en mycotoxines au champ ont été collectés. Parfois, ils ont été séparés en deux sous-lots, l'un étant stocké dans de bonnes conditions, l'autre subissant des phases d'humidification et des variations de température pour obtenir du grain altéré. Des tests de mouture à l'échelle pilote ont été pratiqués sur ces grains, soit sur meule de pierre type Astrié, soit sur cylindres.

Les opérations de broyage à sec peuvent entraîner une redistribution des mycotoxines, mais n'affectent généralement pas leur structure chimique (Pinson-Gadais *et al* 2007, Schaarschmidt et Fauhl-Hassek 2018). Les sons sont généralement plus contaminés que les farines blanches. Pour des lots de grains avec des concentrations en DON comprises entre 400 et 4500 µg/kg, un effet de dilution significatif a été constaté, mais dans seulement environ la moitié des farines. Il n'y avait pas de différences significatives de concentrations en DON entre les farines obtenues sur meule de pierre ou sur cylindre. Les évolutions du grain à la farine étaient semblables pour les lots bien stockés et les lots altérés (Vidal *et al*. 2023). Par contre pour l'OTA, présente uniquement dans les lots altérés, les concentrations dans les farines obtenues sur meules de pierre étaient deux fois plus élevées que dans celles obtenues sur cylindres (Arias Benavides 2021 ; Domenech 2022), atteignant ainsi plus de 5 µg/kg.

Malgré les effets de dilution et comme ils ne sont pas toujours flagrants, il est donc recommandé de ne pas passer à la mouture des lots de grains fortement contaminés en mycotoxines ou présentant un risque élevé d'après les observations visuelles et les relevés d'événements critiques pendant le stockage. Ceci d'autant plus que les teneurs maximales autorisées des farines et autres produits de mouture sont plus basses que celle des grains non transformés. Par exemple, pour la DON, elles passent de 1000 µg/kg (ou 1500 pour le blé dur) dans les grains de céréales non transformés à 600 µg/kg dans les produits de mouture.

2.4. Devenir du DON au cours de la panification

Des farines obtenues dans le paragraphe 3.2 ont été utilisées pour réaliser des tests de panification à l'échelle pilote dans lesquels chaque farine était transformée avec l'ajout de 3 levains d'origines différentes, donc de composition microbienne différente (Mietton *et al*. 2024) ou une levure commerciale. Les tests de panification ont été réalisés deux années de suite avec des lots de grains différents, mais avec les mêmes origines de levains. La première année, les teneurs en DON des farines étaient inférieures à la teneur maximale autorisée, la seconde année elles fluctuaient de 700 à 2000 µg/kg. Des échantillons de grains, farines, issues, pâtes à pain et pains ont été prélevés puis soumis à des analyses de mycotoxines par HPLC MS/MS et la caractérisation de la flore fongique par une approche de métabarcoding, en utilisant le code barre ITS1 (Von Gastrow *et al*. 2023).

L'analyse de la composition fongique des pâtes à pain avant enfournement a montré que le microbiote fongique des pâtes est proche de celui du levain chef ou de la levure commerciale, quelle que soit l'origine de la farine comme déjà montré précédemment (Lhomme *et al*. 2016 ; Mietton *et al*. 2023). L'espèce de levure dominante de la communauté du levain chef reste dominante tout au long de la panification et les champignons filamenteux présents dans la farine diminuent largement en fréquence. Dans les panifications réalisées avec un levain très pauvre en levure, les champignons filamenteux déjà présents sur les grains de blé, dont certains pourraient produire des mycotoxines sont dominants tout au long du process.

Au cours du process de panification, les concentrations en DON ont globalement eu tendance à rester stables dans la première expérimentation, elles ont diminué en moyenne de 23 % dans la seconde. Les différences entre les levains ont été plus marquées dans les farines issues de grains altérés pendant le stockage, mais les effets des différents levains variaient d'une expérimentation à l'autre (Vidal *et al*. 2023). L'étape finale de cuisson a induit une diminution de la teneur en DON de l'ordre de 25 à 30 % dans les deux expérimentations.

Les données collectées ici sont conformes à la littérature scientifique du domaine. Des études montrent que l'OTA est assez stable au cours du processus complet de panification avec du levain, indépendamment des facteurs testés et que la concentration tend à augmenter à la cuisson (Vidal *et al*. 2014). La concentration de DON est souvent affectée significativement par les étapes de pétrissage et de fermentation de manière opposée en fonction de l'utilisation des levains et du niveau de contamination des farines. La cuisson n'affecte généralement pas significativement la concentration en DON. Finalement, si des baisses de concentrations de DON sont fréquemment observées, les possibilités d'augmentation doivent être considérées avec précaution. L'utilisation de levain plutôt qu'une souche pure de levure semble bénéfique du fait des actions connues des bactéries lactiques. Elles produisent des composés antagonistes qui inhibent la croissance des champignons mycotoxinogènes, elles adsorbent certaines mycotoxines sur leurs parois et elles sont capables de bio-transformation en sous-produits non ou moins toxiques (Houssni *et al*. 2023).

Il est recommandé d'utiliser préférentiellement des levains naturels pour la panification pour tendre vers une diminution des contaminations en mycotoxines compte tenu des fonctions détoxifiantes connues des bactéries lactiques (Nasrollahzadeh *et al*. 2022). Toutefois, les recettes et diagrammes de fabrication des pains étant très divers (température, durées, ...), les résultats du projet n'ont pas permis de confirmer la diminution des contaminations par les levains. Il n'est donc pas envisageable actuellement de récupérer un lot de grain ou de farine non conforme en comptant sur le fait que la fermentation fera diminuer suffisamment le contenu en mycotoxines. Des études complémentaires faisant varier les compositions microbiennes des levains, les diagrammes de fabrication et les concentrations initiales de mycotoxines seraient nécessaires pour valoriser le potentiel du levain et permettre de faire des prédictions fiables de ses effets.

2.5. Devenir des mycotoxines pendant la transformation en pâtes et leur cuisson

Des farines obtenues dans le paragraphe 3.2 ont été utilisées pour fabriquer des « pâtes » artisanales à l'échelle pilote en suivant un diagramme de fabrication représentatif des pratiques des paysans-pastiers ou pastiers artisanaux vendant leur production en circuits courts. Ces « pâtes » artisanales sont fabriquées à base de farine afin de faciliter l'utilisation de blés locaux. Ce ne sont donc pas à proprement parlé des pâtes, étant donné la réglementation sur la dénomination « pâtes » imposant une fabrication à base de semoule de blé dur (Décret n°55-1175 du 31 août 1955 pris pour l'application de la loi du 1er août 1905 sur la répression des fraudes, en ce qui concerne les pâtes alimentaires).

Trois fabrications de pâtes ont été réalisées avec 3 lots de farines contenant des concentrations de DON différentes (lot 1 : 115 ppm, lot 2 : 341 ppm, lot 3 : 1554 ppm). La farine a été hydratée à 30 % puis malaxée avant extrusion pour former des pâtes de format fusili. Les pâtes fraîches ont été séchées selon 2 diagrammes de séchage différents : basse température (16 h, 50°C, 8 cycles) et haute température (5 h, 90°C, 3 cycles). Les pâtes séchées à basse température (BT) ont ensuite été cuites au temps optimal de cuisson déterminé au préalable (11,5 min) selon 2 modes de cuisson différents : un mode suivant la méthode normée ou MN (100 g de pâtes dans 2 L d'eau salée à 7 g/L) et un mode ménager ou mm (100 g de pâtes dans 450 mL d'eau salée à 7 g/L). Les échantillons de pâtes sèches et cuites ont été prélevés puis analysés en DON par un prestataire extérieur (Phytocontrol).

Le type de séchage (haute ou basse température) n'influence pas le devenir des mycotoxines DON (Tableau 3). La cuisson des pâtes induit une diminution de la teneur en DON de l'ordre de 40 à 65 % selon le mode de cuisson par dilution, par absorption d'eau dans les pâtes, et par transfert des mycotoxines dans l'eau de cuisson.

Lors de la fabrication de pâtes sèches, il y a peu d'effet de dilution des mycotoxines lors du procédé puisque l'eau ajoutée pour donner la forme aux pâtes est ensuite évaporée lors du séchage. La diminution de teneur en DON du lot 3 en passant de farine à pâtes sèches est surprenante mais peut être expliquée par un changement de matrice limitant l'extraction du DON à l'analyse. Les résultats obtenus sont conformes à la bibliographie : sur des pâtes fabriquées à base de semoule de blé dur, il a été montré que le séchage, qu'il soit à basse ou haute température, n'a que peu d'impact sur la concentration en DON (Vidal *et al*., 2016).

Il est donc recommandé aux pastiers de ne pas utiliser des lots de farine fortement contaminés en mycotoxines puisque ces mycotoxines se retrouvent ensuite dans les pâtes sèches vendues. De plus, la cuisson des pâtes avant consommation ne permet pas une élimination complète des mycotoxines présentes.

Tableau 3 : Teneur en déoxynivalénol (µg/kg) de 3 lots de farines contaminées (matières premières), de pâtes sèches obtenues après un séchage à haute température (HT) et basse température (BT) et de pâtes séchées à basse température cuites selon la méthode normée (MN : 100 g de pâtes dans 2 L d'eau salée à 7 g/L) et la méthode ménagère (MM : 100 g de pâtes dans 450 mL d'eau salée à 7 g/L)

	Farines	Pâtes sèches (HT)	Pâtes sèches (BT)	Pâtes BT cuites (MN)	Pâtes BT cuites (MM)
Lot 1	115	97 ± 39	124 ± 7	<50	<50
Lot 2	341	291 ± 9	280 ± 24	<50	65 ± 60
Lot 3	1554	764 ± 41	881 ± 120	262 ± 24	447 ± 43

3. Conclusion

La contamination des céréales et du maïs par divers mycotoxines reste une préoccupation majeure de qualité sanitaire des aliments produits à partir de matières premières agricoles, qui s'inscrit dans un contexte de changement globaux (Savoie *et al*. 2024). Elle est plus marquée certaines années. Ainsi en 2024, des semis tardifs et un printemps froid et sec suivi de précipitations abondantes ont pu favoriser le développement des *Fusarium* sp*,* producteurs de mycotoxines, et ont rendu difficile le séchage des grains après récolte. Outre les facteurs climatiques déterminants, les pratiques agricoles et de transformation contribuent à moduler les niveaux de concentrations finaux. L'agriculture biologique est questionnée pour ce risque mycotoxique, essentiellement dans des systèmes en circuits courts pour lesquels les contrôles de conformité aux teneurs maximales autorisées sont peu pratiqués.

En acquérant des données de contaminations multi-mycotoxines sur deux années consécutives, avec des agriculteurs en Agriculture Biologique et circuit court (ABCC) dans différentes régions, le projet Myco3C a confirmé l'effet majeur des conditions climatiques qui s'est traduit par une forte disparité régionale (risque accru pour les régions à climat plus humide). Les données de niveaux de contaminations et l'analyse de la diversité des pratiques (mais avec quelques constantes comme le travail du sol, les rotations longues) et la diversité génétique utilisée (variétés anciennes, variétés populations) permettent de confirmer que l'AB est plutôt réductrice du risque de contamination au champ. Cependant des situations individuelles particulières sur une exploitation donnée peuvent conduire à des risques de contamination élevés à la récolte qui doivent être bien identifiés et pris en compte par les agriculteurs.

Les étapes de séchage et stockage diverses des blés ont évité les contaminations par des mycotoxines de stockage, pour les deux années étudiées, sauf quelques cas accidentels. Pour le maïs, l'utilisation des cribs a pu être un facteur de risque conduisant à une poursuite d'activité d'espèces de *Fusarium* toxinogènes, mais il ne s'est pas exprimé dans tous les cas.

Les études aux échelles du laboratoire et pilote sur les effets des paramètres climatiques du stockage et des process de transformation sur l'évolution des niveaux de contamination de lots de grains de variétés anciennes et variétés populations ont fourni des données à partir de grains produits par des agriculteurs en ABCC et permis de développer des supports pour les accompagner sur ces phases critiques. Bien que certains procédés de transformation primaire tendent à réduire les niveaux de contamination, ils ne sont pas suffisamment efficaces et bien maîtrisés, dans l'état actuel des connaissances, pour permettre à un lot de grains dépassant les valeurs maximales autorisées de donner des produits alimentaires respectant la réglementation européenne. Des travaux de recherche complémentaire seront nécessaires avant de proposer aux agriculteurs en ABCC des procédés post-récolte permettant de garantir une détoxication suffisante de leurs productions primaires.

La sensibilisation à la problématique (y. c. l'analyse rapide par test immunologique pour quantifier le risque en sortie de champ) et la construction de réflexions individuelles et collectives pour identifier les leviers de diminution du risque, mobilisables par chacun, qui a été initiée avec quelques groupes de producteurs de céréales en ABCC montrent que la filière pourra faire valoir des allégations de prise en compte et de minimisation du risque mycotoxique. Cela contribuera à la valorisation de cette filière et à la qualité sanitaire globale des produits.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Gwénaëlle JARD : https://orcid.org/0000-0003-0578-2438

Marie Hélène ROBIN : https://orcid.org/0000-0002-3108-3908

Jean-Michel SAVOIE : https://orcid.org/0000-0002-1427-0293

Delphine SICARD : https://orcid.org/0000-0002-6570-3212

Rodolphe VIDAL : https://orcid.org/0000-0002-3407-1646

Contributions des auteurs

RV, M-HR, GJ, J-MS, CV ont tous contribué significativement à l'animation et la réalisation pratique du projet Myco3C. DS a contribué principalement à la partie caractérisation microbiologique et panification. Jean-Michel Savoie était à l'origine de la conceptualisation du projet et a initié la rédaction de cet article qui a été complété et amendé par chacun des auteurs.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient tous les acteurs du projet Myco3C qui ont participé activement à ces travaux : François BRIONNET, Arnaud OBLE et Pierrick PRANGER (ENILIA-ENSMIC) pour la réalisation des tests de mouture et de panification ; Solène MALPEL (Ineopole Formation), Othman MERA et Yassine NAIT-CHABANE (Université Toulouse 3, IUT Auch), pour les travaux tutorés avec les étudiants ; Élodie GRAS, Lorrain MONLYADE, Geoffroy ESTINGOY (AgroBio Périgord), Clémence RIVOIRE, Damien FORNENGO (Agribio04), Julie GRIGNION (Haute-Loire Bio), Hélène PROIX, Manon MERCIER (B.L.E.) pour la collecte des échantillons et des données des pratiques et leur participation aux réflexions et pilotages tout au long du projet. Les analyses de laboratoire et le traitement des données ont été réalisées avec l'aide de nos stagiaires de fin d'étude (Maria ARIAS BENAVIDES, Thomas BONNET, Gabriel DOMENECH, Laurène VERCELLONE) et une stagiaire de l'IUT de Montpellier/Sète (Ella Vannieuwenhuyse) que nous remercions grandement. Ils et elles ont été aidés par des membres des équipes de recherches à qui nous adressons toute notre reconnaissance : Nathalie GALLEGOS, Christine DUCOS, Laetitia PINSON GADAIS (INRAE MycSA), Lucie ARNOUD, Frédéric BIGEY (INRAE SPO). Enfin un grand merci à Bruno TAUPIER-LETAGE qui a imaginé et porté la préparation du projet Myco3C avec Jean-Michel SAVOIE jusqu'à son démarrage.

Déclaration de soutien financier

Le projet Myco3C a été financé par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire via l'appel à projet du Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural (CASDAR) Innovation et Partenariat 2019 (N°19AIP5914)

Références bibliographiques

Arias Benavides M. P. 2021. Caractérisation de l'évolution des teneurs en mycotoxines dans le blé, du champ au pain. Mémoire de fin d'études Master 2 Biotechnologies, Parcours Génie Biotechnologique et Management des Agro-Industries. Université La Rochelle, 25 pages. https://hal.inrae.fr/hal-04804561

Bonnet T., Jard G., Vercellone L., Vindras C., Savoie J.-M., Robin M.-H. 2022. From field to storage: which factors favour the presence of mycotoxins in ancient cereal varieties in organic systems? Poster présenté au 43rd Mycotoxin Workshop, Mai 2022, Toulouse, France. https://hal.inrae.fr/hal-04673881

Delgado R. M., Sulyo, M., Jirsa O., Spitzer T., Krska R., Polišenská, I. 2014. Relationship between lutein and mycotoxin content in durum wheat. Food Additives & Contaminants: Part A, 31(7), 1274–1283. https://doi.org/10.1080/19440049.2014.925589

Domenech G. 2022. Changes in mycotoxins during wheat grain storage. Mémoire fin d'études Master 2 Biologie Agro-sciences, Parcours Phytopathologie et Mycologie Université de Bordeaux, 25 pages. https://hal.inrae.fr/hal-04804510

Eskola M., Kos G., Elliott C. T., Hajšlová J., Mayar S., Krska, R. 2020. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25%. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 60(16), 2773-2789. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570

Fleurat-Lessard F. 2017. Integrated management of the risks of stored grain spoilage by seedborne fungi and contamination by storage mould mycotoxins–An update. *Journal of Stored Products Research*, 71, 22-40. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.10.002

Lhomme E., Urien C., Legrand J., Dousset X., Onno B., Sicard D. 2016. Sourdough microbial community dynamics: An analysis during French organic bread-making processes. Food Microbiology 53, 41-50. https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.11.014

Mietton L., Samson M. F., Marlin T., Godet T., Nolleau V., Guezenec, S., Segond D., Nidelet T., Desclaux D., Sicard D. 2022. Impact of leavening agent and wheat variety on bread organoleptic and nutritional quality. Microorganisms, 10(7), 1416. https://doi.org/10.3390/microorganisms10071416

Mietton L., Mata-Orozco J., Devillers H., Guillerminet T., Guezenec S., Marlin T., Segond D., Bigey F., von Gastrow L., Sicard D., Nidelet T. 2023. Yeast dispersion is the main driver of microbial community diversity in sourdough bread-making. Poster présenté à 8th Conference on Physiology of Yeasts and Filamentous Fungi (PYFF8), Juin 2023, Cork, Ireland. https://hal.science/hal-04237767v1

Mietton L., Mata-Orozco J., Guezenec S., Marlin T., Samson M.-F, Canaguier E., Godet T., Nolleau V., Segond D., Cassan D., Baylet M., Bedouelle P., Bonnel L., Bouquin H., Christin G., Courteau M., Doucoure M., Hazard V, Kober T., Montard A., Nodet M., Parent M., Dalmasso C., Gainon A., Jouve O., Pichard S., Puel J, Simon R., Nidelet T., Sicard D. 2024. Minimal influence of milling technique in contrast to sourdough on the nutritional and organoleptic quality of bread. Food Microbiology. 118:104426. doi: 10.1016/j.fm.2023.104426. Epub 2023 Nov 19. PMID: 38049266.

Nasrollahzadeh A., Mokhtari S., Khomeiri M., Saris P. 2022. Mycotoxin detoxification of food by lactic acid bacteria. International Journal of Food contamination 9, 1. https://doi.org/10.1186/s40550-021-00087

Oswald I., Forget F., Puel O. 2024. Les mycotoxines : connaissances actuelles et futurs enjeux. Ed Quae, Paris, 272 p. EAN : 9782759239764. https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3976-4

Pinson-Gadais L., Barreau C., Chaurand M., Gregoire S., Monmarson M., Richard-Forget F. 2007. Distribution of toxigenic *Fusarium* spp. and mycotoxin production in milling fractions of durum wheat. Food Additives & Contaminants, 24(1), 53–62. https://doi.org/10.1080/02652030600892958

Savoie J.-M., Gallegos N., Ducos C. 2023. Case studies of mycotoxin contamination in organic maize stored and milled by smallholder farmers in southwest France. Poster présenté au 12th International Congress of Plant Pathology, Aout 2023 – Lyon, France. https://hal.inrae.fr/hal-04594180v1

Savoie J.-M., Robin M.-H., Forget F. 2024. L'exposition aux mycotoxines dans un contexte de changements climatiques et de pratiques. Pp. 258-267. Dans Oswald I., Forget F., Puel O. 2024. Les mycotoxines : connaissances actuelles et futurs enjeux. Ed Quae, Paris, 272 p. EAN : 9782759239764. https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3976-4

Schaarschmidt S., Fauhl-Hassek C. 2018. The fate of mycotoxins during the processing of wheat for human consumption. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 17(3), 556–593. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12338

Schaarschmidt S., Fauhl-Hassek C. 2021. The fate of mycotoxins during the primary food processing of maize. Food control 121, 107651. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107651

Schaafsma A., Hoocker D.C. 2007. Climatic models to predict occurrence of *Fusarium* toxins in wheat and maize. International Journal of Food Microbiology. 119, 116-125. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.08.006

Houssni I. E., Khedid K., Zahidi A., Hassikou R. 2023. The inhibitory effects of lactic acid bacteria isolated from sourdough on the mycotoxigenic fungi growth and mycotoxins from wheat bread. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 50, 102702. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102702

Vidal A., Marín S, Morales H., Ramos A. J., Sanchis V. 2014. The fate of deoxynivalenol and ochratoxin A during the breadmaking process, effects of sourdough use and bran content. Food Chemistry and Toxicology. 68:53-60. https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.03.006

Vidal A., Bendicho J., Sanchis V., Ramos A. J., Marín S. 2016. Stability and Kinetics of Leaching of Deoxynivalenol, Deoxynivalenol-3-Glucoside and Ochratoxin A during Boiling of Wheat Spaghettis. Food Research International. 85:182-90. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.037

Vidal R., Savoie J.-M., Brionnet F., Jard G. 2023. Bonnes pratiques pour identifier et limiter les risques mycotoxines dans les céréales. Conférence invitée aux 73èmes Journées Techniques des Industries de céréales (JTIC), Novembre 2023, Auxerre, France. https://hal.inrae.fr/hal-04673908v1

von Gastrow L., Michel E., Legrand J., Amelot R., Segond D., Guezenec S., Rué O., Chable V., Goldringer I., Dousset X., Serpolay-Bessoni E., Taupier-Letage B., Vindras-Fouillet C., Onno B., Valence F., Sicard, D. (2023). Microbial community dispersal from wheat grains to sourdoughs: A contribution of participatory research. Molecular Ecology, 32(10), 2413-2427. https://doi.org/10.1111/mec.16630

Wang J., Sufar E. K., Bernhoft A., Seal C., Rempelos L., Hasanaliyeva G., Zhao B., Iversen P. O., Baranski M., Volakakis N., Leifert C. 2024. Mycotoxin contamination in organic and conventional cereal grain and products: A systematic literature review and meta-analysis. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 23, e13363. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13363

Pour citer cet article : Jean-Michel Savoie, Rodolphe Vidal, Camille Vindras, Marie-Hélène Robin, Gwenaëlle Jard, *et al*.. Myco3C : Identifier et limiter les risques de mycotoxines dans les céréales produites, stockées et transformées en circuit court. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.242-257. 10.17180/ciag-2025-vol107-art18

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

NOROSTAN : potentiel d'indicateurs viraux pour estimer le caractère infectieux des norovirus humains dans les salades 1ère et 4ème gammes

Stéphanie LA CARBONA[1], Maëlle ROBIN[1], Julie CHALLANT[2], Marion BICHET[1], Maxime LE BLOND[1], Sébastien MASSIER[1], Marion GARDETTE[1], Christophe GANTZER[2], Isabelle BERTRAND[2*], Nicolas BOUDAUD[1*]

Avec la collaboration du syndicat des fabricants de produits végétaux prêts à l'emploi.

[1] ACTALIA, F- 50000 Saint Lo, France

[2] Université de Lorraine, CNRS, LCPME, F-54000 Nancy, France

Correspondance : s.lacarbona@actalia.eu

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art19

Résumé

Cette étude avait pour ambition de fournir des outils aux professionnels afin d'améliorer les mesures de maîtrise du danger à norovirus (NoVs) humains dans les salades 1ère et 4ème gammes. A terme, il s'agit de limiter les retraits et/ou rappels injustifiés de lots du marché par application du principe de précaution lorsque du génome viral est détecté alors même que le risque sanitaire pour le consommateur n'est pas prouvé (*i.e.* génome viral détecté malgré l'absence de virus infectieux). A ce jour, les méthodes disponibles ne permettent pas de déterminer le caractère infectieux des NoVs en routine au laboratoire. Dans ce contexte, l'objectif de ce projet était de proposer une méthode sensible et économiquement compétitive permettant de discriminer les NoVs infectieux et non infectieux dans les salades, en utilisant les bactériophages ARN-F spécifiques (FRNAPH) et les coliphages fécaux, des indicateurs viraux de contamination virale d'origine fécale. Les résultats montrent que les FRNAPH ne semblent pas être de bons indicateurs du danger à NoVs infectieux dans les salades. En revanche, les coliphages apparaissent plus prometteurs mais leur intérêt doit encore être validé par des travaux complémentaires. Cette étude suggère également que les mesures de maîtrise appliquées à l'heure actuelle dans l'industrie 4ème gamme permettent de limiter la contamination en NoVs dans les produits finis.

Mots-clés : sécurité sanitaire, salades, norovirus, coliphages, virus infectieux

Abstract:

This study aimed to provide tools to professionals to improve control measures against human norovirus (NoVs) in raw and ready-to-eat (RTE) salads. Ultimately, the goal is to limit unjustified product withdrawals and/or recalls from the market by applying the precautionary principle when the viral genome is detected even though the risk for the consumer has not been proven (i.e. viral genome detected despite the absence of infective virus). To date, the available methods do not allow the infective nature of NoVs to be determined routinely in laboratories. In this context, the objective of this project was to propose a sensitive and economically competitive method for discriminating between infectious and non-infectious NoVs in salads, using F-RNA-specific bacteriophages (FRNAPHs) and fecal coliphages, viral indicators of viral contamination of fecal origin. The results showed that FRNAPHs do not seem relevant indicators of infectious NoV hazard in salads. On the other hand, coliphages appear more promising, but their interest has still to be validated by complementary works. This study also suggest that control measures currently applied in minimally-processed vegetables industries allow to limit Nov contamination in RTE salads.

Keywords: food safety, salads, norovirus, coliphages, infective virus

1. Introduction

En 2020, le secteur légumier représentait près de 150 000 emplois en France (FranceAgrimer, 2022). La France est le 3ème producteur européen de salades (laitue + chicorée) avec 257 095 tonnes récoltées en 2020 (4,5 % de la production totale de légumes). Un Français consomme en moyenne 5,3 kg de salades par an dont 4,2 kg de laitues en vrac (Planetoscope) ; ceci en fait le 4ème légume le plus consommé en France (Interfel). Ainsi, entre 2019 et 2020, les quantités de salades fraîches achetées par les ménages ont augmenté de 9,4 %. La sécurité sanitaire de ces produits constitue donc un enjeu majeur pour répondre aux exigences du marché et des consommateurs de plus en plus soucieux de l'impact de l'alimentation sur leur santé. La gestion des dangers microbiologiques dans ces produits est essentielle pour la compétitivité et la durabilité de cette filière.

Au moment de leur production, les salades peuvent être soumises à des pollutions d'origine fécale (humaines et animales), potentiellement vectrices de pathogènes pour l'homme. Entre autres, l'exposition à de l'eau contaminée (irrigation ou lessivage) et l'utilisation de fumiers/lisiers bruts ou insuffisamment traités, représentent des voies majeures sources de pathogènes (Alegbeleye *et al*., 2018). Les salades 4e gamme sont également concernées car la contamination peut se produire au moment de la préparation et du conditionnement via des opérateurs infectés ou au cours du lavage (eau contaminée ou contamination croisée entre lots) (Julien-Javaux *et al*., 2019 ; Machado-Moreira *et al*., 2019).

Parmi les pathogènes, les norovirus (NoVs) sont considérés comme des dangers importants dans la filière. Ils sont responsables de nombreuses épidémies liées à la consommation de produits frais prêts à l'emploi et associés à de nombreux cas humains (Machado-Moreira *et al*., 2019). Par exemple, en Europe en 2022, 8 épidémies ont été recensées, associées à 244 cas (EFSA and ECDC (European Food Safety Authority and European Centre for Disease Prevention and Control), 2023).

A ce jour, l'indicateur bactérien de contamination fécale *E. coli* est utilisé pour évaluer et surveiller la qualité microbiologique des salades et de l'eau d'irrigation. Selon les teneurs retrouvées, des actions correctives peuvent être mises en place. Cependant, la pertinence de cet indicateur pour suivre la pollution virale dans les salades est discutable et il apparaît donc nécessaire de mettre à disposition un outil pertinent pour évaluer l'exposition au danger à NoVs infectieux dans les salades destinées aux marchés de la 1re et de la 4e gammes.

L'objectif de cette étude était donc de développer une méthode sensible et rapide pour estimer la présence de NoVs infectieux dans les salades et économiquement compatible avec les contraintes des producteurs (1ère gamme) et des industriels (4ème gamme). L'approche envisagée est basée sur l'utilisation d'indicateurs viraux de contamination virale d'origine fécale, les bactériophages ARN-F spécifiques (FRNAPH) et coliphages somatiques (CS), telle que proposée pour la gestion du danger viral dans les coquillages avec les FRNAPH (Hartard *et al*., 2018, 2017, 2016, 2015). Le principe de cette approche est que la présence concomitante de phages infectieux et de génome de NoVs humains dans un même échantillon traduirait un risque à NoVs infectieux significatif pour le consommateur. Pour évaluer le potentiel de cette approche dans les salades, la première étape a donc consisté à rechercher les coliphages fécaux et les NoVs dans des échantillons de salades (matières premières et produits finis 4ème gamme) par des méthodes permettant de détecter les génomes (phages et NoVs) et les particules infectieuses (phages). La stratégie est pertinente si *a minima*, une corrélation peut être démontrée entre les génomes de phages et de NoVs. Un tel outil devrait permettre de faire évoluer les guides de bonnes pratiques d'hygiène et les plans de maîtrise sanitaire pour une gestion efficace du danger à NoVs par les professionnels.

1.1. Les NoVs humains

Les NoVs humains représentent l'une des principales causes de gastroentérite aiguë (GEA) dans le monde, causant environ 685 millions de cas par an. Ces GEA sont associées à une morbidité et une mortalité importantes dans les pays quel que soit le niveau de revenu, en particulier chez les jeunes enfants et les personnes âgées. Les GEA à NoVs représentent également un fardeau économique important avec des coûts directs annuels liés au système de santé estimés par l'OMS à 4,2 milliards $ et à 60,3 milliards $ pour les coûts sociétaux (Bartsch *et al*., 2016).

Les NoVs sont classés en 10 génogroupes (GI à GX), GI et GII étant les plus fréquents et représentant 90 % des cas humains. Ce sont des virus nus appartenant à la famille des *Caliciviridae*, constitués d'un génome à ARN simple brin (7,6 kb) et d'une capside protéique icosaédrique d'environ 40 nm de diamètre maximum. Les virus néo-formés dans les cellules épithéliales intestinales sont rejetés en grande quantité dans l'environnement par les individus infectés via les selles et vomissures (de l'ordre du milliard de particules virales / gramme pour le pic d'excrétion) et l'excrétion virale perdure pendant plusieurs semaines après l'arrêt des symptômes. La dose infectieuse est très faible par rapport au nombre de virus excrétés, estimée entre 18 et 1000 particules virales. La transmission des NoVs humains à l'homme se fait par voie féco-orale directe par contact interindividuel, ou indirecte via l'ingestion d'eau ou d'aliments contaminés (Carlson *et al*., 2024).

Ainsi, les NoVs humains (GI et GII) sont significativement impliqués dans les épidémies alimentaires en en Europe, où ils se classent en 2022, en 4e position des agents étiologiques responsables d'épidémies d'origine alimentaire (n=347) avec le plus grand nombre de cas humains (n=7717) (EFSA and ECDC, 2023). Les aliments principalement impliqués sont les coquillages, aliments composés et produits végétaux. Parmi les végétaux, plusieurs épidémies liées à la consommation de salades ont été rapportées dans la littérature (Machado-Moreira *et al*., 2019 ; Yang and Scharff, 2024), soulignant l'importance des végétaux à feuilles dans la transmission des NoVs.

1.2. Le danger NoVs dans les salades

Les fruits frais et les légumes (en particulier à feuilles vertes) sont considérés comme des aliments à risque vis-à-vis du danger à NoVs car ils peuvent être exposés à diverses sources de contamination dans leur environnement de production. Des fréquences de contamination de salades « matières premières » par du génome de NoVs humain se situant entre 5,0 et 28,2 % ont ainsi été rapportées (Boudaud and Gantzer, 2015). Pour des salades 4e gamme de différentes variétés, une prévalence en génome de NoVs de 5,3 % a été mise en évidence (données personnelles). Les principaux facteurs de risque de contamination au moment de la production primaire incluent les facteurs environnementaux (*e.g.* fortes pluies ou inondations) qui favorisent le transfert des NoVs humains des eaux usées ou des effluents d'eaux usées vers les sources d'eau d'irrigation ou les champs ; l'irrigation avec des eaux de qualité sanitaire insuffisante ; le stockage des salades dans des contenants contaminés ; la contamination par des opérateurs infectés ou des équipements contaminés au moment ou après la récolte (Alegbeleye *et al*., 2018 ; EFSA, 2014). Il semblerait que certains itinéraires de production et certaines variétés de salades soient plus à risque que d'autres vis-à-vis du danger viral. Sur le terrain, la maîtrise de la contamination virale reste complexe, d'autant plus que les NoVs peuvent persister dans l'eau et les aliments pendant de longues périodes (Rzeżutka and Cook, 2004).

1.3. Les NoVs dans les aliments : contexte réglementaire et normatif

Aucun critère réglementaire n'est établi à ce jour en France et en Europe concernant la gestion des NoVs dans les aliments. Depuis 2013, des méthodes normalisées permettant la recherche qualitative et quantitative du génome des NoVs (GI et GII) dans les aliments à risque (végétaux, coquillages, eau) ont été publiées (NF EN ISO 15216-1, 2017 ; PR NF EN ISO 15216-2, 2018). Le principal point faible de

cette norme concerne l'absence d'information sur le caractère infectieux des NoVs lorsque leur génome est détecté. En effet, le génome viral détecté par RT-qPCR peut être le reflet de la présence de virus infectieux et/ou de virus non infectieux (capsides altérées, non-fonctionnelles). Ce biais majeur a pour conséquence d'entrainer le retrait et/ou le rappel potentiellement injustifiés de lots du marché par application du principe de précaution dès lors que du génome de NoVs est détecté, alors même que le risque sanitaire pour le consommateur n'est pas prouvé. Un résultat positif en RT-qPCR ne peut en aucun cas témoigner de l'intégrité de la capside, ni même de celle du génome, et ne renseigne donc pas sur le caractère infectieux du virus. Il faut aussi souligner que l'absence de détection de génome de NoVs dans les aliments ne garantit pas l'absence de danger infectieux. En effet, le faible volume analysé, le rendement d'extraction des virus des aliments souvent faible (< 10 %) et la présence d'inhibiteurs de RT-qPCR contribuent à augmenter la limite de détection (≈ 10 à 100 fois supérieure à la dose infectieuse pour l'homme), conduisant ainsi à de faux négatifs. Cela se traduit d'ailleurs souvent par l'impossibilité de détecter du génome viral dans les aliments suspectés lors d'épidémies à NoVs. L'utilisation de cette norme ISO en routine pour la gestion du danger à NoVs dans les aliments est donc discutable puisqu'elle ne garantit ni l'absence ni la présence de virus infectieux. Le choix d'une détection du génome viral par RT-qPCR est lié au fait qu'aucune lignée cellulaire permissive ne permet la réplication *in vitro* de tous les NoVs humains en routine. De nouvelles approches basées sur la culture du NoV humain dans des entéroïdes intestinaux humains ou l'infection de larves de poisson-zèbre (Zebrafish) ont permis de lever un verrou majeur pour l'étude fondamentale de la réplication et de la pathogénicité des NoVs ou encore la recherche d'antiviraux (Chandran and Gibson, 2024 ; Ettayebi *et al*., 2024 ; Hayashi *et al*., 2024). Le modèle d'entéroïde a également été récemment utilisé pour évaluer l'inactivation thermique du NoV dans la palourde (Hayashi *et al*., 2022). Toutefois, ces méthodes de culture *in vitro* restent inapplicables pour des analyses de routine dans les aliments, car trop lourdes à mettre en place, coûteuses et longues pour l'obtention d'un résultat compatible avec les contraintes des producteurs et des industriels.

1.4. Indicateurs viraux pour évaluer le danger viral à NoVs

Les bactéries indicatrices de pollution fécale (*E. coli*, entérocoques) sont utilisées depuis plus d'un siècle pour prévenir la présence de bactéries pathogènes d'origine fécale. Cependant, il est établi que *E. coli* est moins résistante que les NoVs dans l'environnement, ce qui se traduit par une absence de corrélation entre la présence d'*E. coli* et du génome de NoVs dans les échantillons environnementaux, notamment en cas de contamination fécale ancienne (Julien-Javaux *et al*., 2019 ; Victor *et al*., 2021). Toutefois, il est important de noter que dans un cas, des bactéries cultivables sont quantifiées et dans l'autre des acides nucléiques qui peuvent persister plus longtemps dans l'environnement sous forme encapsidée.

Les bactériophages ARN-F spécifiques (FRNAPH) et les coliphages somatiques (CS) ont été inclus dans les réglementations ou les lignes directrices de nombreux pays développés comme indicateurs pour surveiller la qualité virale de l'eau (Directive 2020/2184, 2020 ; EPA, 2006 ; Health Canada and Water and Air Quality Bureau, 2019 ; Jofre *et al*., 2021). Par ailleurs, l'intérêt des FRNAPH pour la gestion du danger à NoVs dans les coquillages est désormais établi (ASQAP, 2022 ; Hartard *et al*., 2018, 2016). Les principaux avantages des FRNAPH et des CS sont leur prévalence et leur concentration élevées dans les eaux usées urbaines –entre 5 et 8 Log_{10} unités formant des plages de lyse (UFP)/L (Bichet *et al*., 2024 ; Farkas *et al*., 2020 ; Hartard *et al*., 2015 ; Korajkic *et al*., 2020). De plus, l'efficacité de l'élimination des CS et des FRNAPH pendant les traitements d'eaux usées est similaire à celle des virus entériques pathogènes (Carducci *et al*., 2009 ; Martín-Díaz *et al*., 2016). Enfin, des méthodes standardisées faciles à mettre en œuvre en routine sont disponibles pour quantifier les particules infectieuses de ces deux indicateurs (ISO 10705-1, 2001 ; ISO 10705-2, 2000).

2. Matériels et méthodes

2.1. Echantillonnage

La collecte des salades s'est restreinte à trois variétés, jeunes pousses, roquette et/ou mâche, du fait de leur plus grande vulnérabilité vis-à-vis de la contamination virale (Boudaud, 2014). Deux stratégies d'échantillonnage ont été mises en œuvre : (1) collecte de salades matières premières ou 4ème gamme positives en *E. coli* afin de cibler des échantillons influencés par une pollution fécale récente ; (2) collecte de salades matières premières de manière aléatoire sans à priori sur la présence d'*E. coli*.

Les analyses *E. coli* ont été réalisées par les industriels dans le cadre d'autocontrôles, via les méthodes de référence (ISO 16649-1, 2018 ; ISO 16649-2, 2001). Dès lors qu'*E. coli* était détectée dans des échantillons, entre 100 et 400 grammes de ces mêmes échantillons positifs étaient envoyés aux laboratoires partenaires pour les analyses de virologie. Au total, entre le 04/06/2021 et le 27/09/2023, 66 échantillons ont été collectés sur cinq sites répartis sur le territoire français. Dans le cas de l'échantillonnage aléatoire, quatre lots (100 à 400 grammes de salade / lot) ont été collectés, répartis sur deux sites différents chaque semaine. Un lot correspondait à un type de salade prélevé sur un site. Au total, entre le 19/10/2021 et le 25/07/2023, 150 lots ont été collectés sur quatre sites répartis sur le territoire français. Pour ces échantillons, la recherche d'*E. coli* n'était pas obligatoire avant envoi.

Les échantillons de salade ont été collectés par les professionnels sur site à l'aide de gants stériles et placés dans un contenant propre et stérile pour les matières premières, ou envoyés dans leur sachet d'emballage pour les salades 4ème gamme. Chaque échantillon a été codifié selon une nomenclature préalablement définie. Pour chaque échantillon, dans la mesure du possible, les informations sur la production primaire (i.e. date de récolte, lieu de production, typologie de culture, système et type d'irrigation, méthode de fertilisation, influence des bassins versants, données météorologiques, concentration en *E. coli* si analyse effectuée) étaient consignées dans la fiche de traçabilité. Tous les échantillons collectés ont été envoyés sous 24h aux laboratoires d'analyse en froid positif. Les analyses ont été réalisées dans les 48h à réception des échantillons.

2.2. Analyse virale des salades

Pour chaque lot de salade, les analyses ont été réalisées à partir de deux échantillons de 25 g ± 0,3 g de salade : un échantillon pour la détection des génomes viraux et un autre pour la détection des phages infectieux. Le protocole retenu après optimisations est décrit ci-dessous.

2.2.1. Extraction des particules virales des salades

L'élution-concentration des particules virales de la surface des salades est réalisée de la même manière pour les deux échantillons. Chaque échantillon de 25 g est placé dans un sac à filtre, puis immergé dans 90 mL de tampon Tris Glycine (Sigma) – extrait de bœuf (Oxoid) 1 % (TGEB) pH 9,5 et incubé 20 min à 60 oscillations.min^{-1} à température ambiante. Le filtrat est ensuite collecté et son volume V mesuré, puis centrifugé 30 min à 10 000 g à 5°C. Le surnageant ainsi obtenu est transféré dans un pot de 200 mL contenant une quantité de NaCl (Grosseron) et d'extrait de bœuf permettant d'atteindre des concentrations finales de 30g/L et 20g/L respectivement dans le volume V. Après ajustement du pH à 7,0, du polyéthylène glycol (PEG) en poudre (Sigma 81268) est ajouté pour une concentration finale de 100 g/L. La solution est mélangée manuellement par rotation pendant une minute puis une nuit (environ 18h) sous agitation magnétique à 4°C ± 3°C. Après centrifugation 45 min à 4 500 g à 5°C, le surnageant est éliminé. Deux culots sont finalement obtenus après traitement des deux échantillons de 25 g. Pour l'échantillon dédié à l'analyse des génomes, 10 µL de virus témoin ECBO-1 à une concentration de 1.10^4 TCID50/mL sont ajoutés au moment de l'immersion dans le TGEB. Le virus est cultivé et titré selon la méthode de Jiménez-Clavero *et al*. (2005) et Taylor *et al*. (1974).

2.2.2. Extraction et détection des génomes viraux

Le culot contenant le virus témoin ECBO-1 obtenu ci-dessus est remis en suspension dans 1 mL de PBS 1X (FisherScientific) puis transféré dans 2 mL de tampon de lyse du kit d'extraction Nuclisens® (Biomérieux) afin d'extraire les acides nucléiques viraux (ADN et ARN). Ces derniers sont ensuite purifiés selon les recommandations du fournisseur, élués à 60°C pendant 5 min et soumis à une ultime étape de purification avec le kit OneStep PCR Inhibitor Removal tel que préconisé par le fournisseur (Ozyme). En parallèle de l'échantillon de salade, 10 µL du virus témoin ECBO-1 à 1.10^4 TCID50/mL sont directement ajoutés dans 2 mL de tampon de lyse Nuclisens puis traités comme indiqué ci-dessus.

Les génomes des NoVs et des FRNAPH-I et -II sont détectés par RT-qPCR selon des méthodes normatives (ISO 15216-1, 2017a) ou publiées (Jiménez-Clavero *et al*., 2005 ; Ogorzaly and Gantzer, 2006 ; Wolf *et al*., 2010). La recherche des génomes de CS est réalisée en ciblant spécifiquement les trois genres constituant la famille des *Microviridae* selon la méthode développée dans le cadre de ce projet (Bichet *et al*., 2024). Les limites de détection (LD) et quantification (LQ) théoriques pour les génomes viraux sont de 20 copies de génome (cg) / 25 g et 100 cg / 25 g, respectivement. Un échantillon est considéré négatif si < LD.

2.2.3. Détection des phages infectieux

Le deuxième culot obtenu suite à l'élution-concentration des particules virales de la salade (cf ci-dessus) est resuspendu dans du PBS 1X dans un volume à ajuster afin d'obtenir un liquide limpide (environ 3-4 mL). Le volume finalement obtenu est divisé en deux pour la détection et la quantification des UFP des FRNAPH et des CS infectieux selon les méthodes standardisées (ISO 10705-1, 2001 ; ISO 10705-2, 2000). Les limites de détection et quantification théoriques pour les FRNAPH et les CS infectieux sont respectivement de 2 UFP / 25 g et 20 UFP / 25 g. Un échantillon est considéré négatif si < LD.

2.3. Analyse statistique

Tous les échantillons ont été anonymisés pour le traitement des données. Une analyse en composante principale (ACP) a été appliquée afin d'évaluer les relations entre les différentes variables. Dès lors qu'une relation était mise en évidence entre deux variables, un test du Khi² était utilisé pour évaluer la corrélation statistique entre ces deux variables. Le seuil de significativité α a été fixé à 5 %.

3. Résultats / Discussion

L'objectif étant de pouvoir quantifier à la fois les génomes viraux et les FRNAPH et CS infectieux dans un échantillon de salade, des travaux d'optimisation ont d'abord été menés sur la base de la méthode ISO 15216-1 (2017) qui permet la quantification du génome de NoV dans les végétaux. Le protocole optimisé a permis d'atteindre des rendements moyens de récupération des FRNAPH et CS de 14,4% et 21,5% respectivement (données non montrées). Ce protocole a ensuite été utilisé pour évaluer l'intérêt des FRNAPH et des CS comme indicateurs du danger à NoVs infectieux dans les salades.

L'approche basée sur des indicateurs viraux repose sur le postulat suivant : la présence concomitante de phages infectieux et de génome de NoVs humains dans un même échantillon serait la signature d'un risque à NoVs infectieux significatif pour le consommateur. Sur la base des résultats démontrés dans les coquillages, les FRNAPH ont été retenus comme indicateur potentiel. Les CS, et en particulier la famille des *Microviridae* qui regroupe des bactériophages ayant une capside de forme (icosaédrique) et de diamètre similaire aux NoVs (25 nm), ont également été inclus dans cette évaluation. Parmi les CS, la quantification des génomes n'est possible que pour les *Microviridae* en raison de la très forte diversité génétique des autres CS. Les travaux menés dans le projet ont permis de confirmer que les CS se retrouvaient en quantité non négligeable dans les effluents de stations d'épuration et ont mis en évidence que les *Microviridae* représentaient une part élevée des CS infectieux (Bichet *et al*., 2024).

Ces effluents pouvant contaminer les eaux environnementales destinées à l'irrigation des salades, les CS et les *Microviridae* s'avèrent être de potentiels indicateurs d'une pollution virale d'origine fécale et donc du danger à NoVs dans les salades. L'intérêt des FRNAPH et des CS comme indicateurs de la présence de NoVs infectieux dans les salades a donc été évalué dans des études prospectives sur des salades (jeunes pousses, roquette et mâche), selon deux stratégies d'échantillonnage.

La première a consisté à analyser des échantillons de salades matières premières ou 4e gamme influencés par une pollution fécale récente mise en évidence par la présence d'*E. coli*. Au total, 66 lots de salades ont été analysés incluant 57 salades 4e gamme (86 %) et 9 matières premières (14 %). Pour chaque échantillon, ont été recherchés : i) les génomes de NoVs, FRNAPH-I et II, et des bactériophages des trois genres de *Microviridae* (α3, G4 et PhiX174) ; ii) les FRNAPH et CS infectieux. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 1**.

Tableau 4 : Détection des génomes viraux et des particules infectieuses dans les salades matières premières (MP, n=9) et 4ème gamme (4G, n=57) influencées par une pollution fécale récente (ntotal=66). NR : non renseigné car non pertinent.

		Nombre d'échantillons positifs tous types / nombre total (%)	Nombre échantillons positifs par type (MP ou 4G) / nombre total (%)
Génomes	**NoV**	11 / 66 (16,7 %)	4G : 7/57 (12,3 %) MP : 4/9 (44,4 %)
	FRNAPH	1 / 66 (1,5 %)	4G : 0/57 (0,0 %) MP : 1/9 (11,1 %)
	Microviridae	7 / 66 (10,6 %)	4G : 5/57 (8,8 %) MP : 2/9 (22,2 %)
Particules infectieuses	**FRNAPH**	0 / 66 (0,0 %)	NR
	CS	30 / 66 (45,5 %)	4G : 27/57 (47,4 %) MP : 3/9 (33,3 %)

Les résultats montrent que 16,7 % (11/66) des échantillons de salades étaient positifs en génome de NoVs (GI et/ou GII). Sur l'ensemble des échantillons analysés, très peu de génome de FRNAPH a été détecté (1,5 %) et les FRNAPH infectieux n'ont pas été détectés. Les génomes de *Microviridae* ont été détectés dans 7/66 échantillons (10,6 %). Les CS infectieux ont, quant à eux, été retrouvés dans 45,5 % des échantillons. Cette différence de résultats entre les génomes de *Microviridae* et les CS infectieux peut s'expliquer : i) d'une part, par la plus grande sensibilité de la méthode de détection des particules infectieuses par rapport à la détection des génomes viraux par qPCR ; ii) d'autre part, par le fait que les *Microviridae* détectés par qPCR ne représentent que 10 à 30 % de tous les CS dénombrés par la norme ISO 10705-2 (2000).

Tous les échantillons de salades positifs en génome de NoVs sont négatifs en phages FRNAPH (génomes et infectieux) suggérant que les FRNAPH ne sont pas des indicateurs de NoVs infectieux pertinents (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Détection des génomes de phages et des phages infectieux dans les salades influencées par une pollution fécale récente, positives (génome détecté) ou négatives (génome non détecté) en NoVs. ntotal=66 échantillons tous types (i.e. salades matières premières et 4ème gamme).

		Génome NoV	
Nombre d'échantillons tous types / nombre total (%)		**Non détecté**	**Détecté**
Génome FRNAPH	**Don détecté**	54 / 66 (81,8 %)	11 / 66 (16,7 %)
	Détecté	1 / 66 (1,5 %)	0 / 66 (0,0 %)
Génome *Microviridae*	**Don détecté**	48 / 66 (72,7 %)	11 / 66 (16,7 %)
	Détecté	7 / 66 (10,6 %)	0 / 66 (0,0 %)
FRNAPH infectieux	**Don détecté**	55 / 66 (83,3 %)	11 / 66 (16,7 %)
	Détecté	0 / 66 (0,0 %)	0 / 66 (0,0 %)
CS infectieux	**Non détecté**	32 / 66 (48,5%)	4 / 66 (6,1 %)
	Détecté	23 / 66 (34,8 %)	7 / 66 (10,6 %)

De même, aucun des échantillons positifs en NoVs n'est positif en génome de *Microviridae*. En revanche, les CS infectieux pourraient être des indicateurs plus appropriés car 7/11 échantillons positifs en génome de NoVs étaient également positifs en CS infectieux. Pour les échantillons pour lesquels une traçabilité complète a pu être obtenue (n=21/66), il ressort que les échantillons ont été cultivés principalement en plein champs (28,8 % vs. 3,0 % sous serre). L'irrigation a été réalisée par aspersion majoritairement avec des eaux de surface (25,8 %), et dans une moindre mesure avec des eaux souterraines (4,5 %). Sur les 21 échantillons ayant une traçabilité connue, 27,3 % ont subi un épisode pluvieux avant l'analyse. Cependant, l'absence de traçabilité pour 68 % des échantillons et le peu d'échantillons positifs en génome de NoV ne permet pas de conclure quant à d'éventuelles pratiques à risque.

La seconde stratégie a consisté à procéder à un échantillonnage aléatoire de salades matières premières, c'est-à-dire sans *a priori* sur la présence/concentration en *E. coli*. Au total, 150 échantillons de salades matières premières ont été analysés (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Détection des génomes viraux et des particules infectieuses dans les salades matières premières collectées de manière aléatoire (ntotal=150).

		Nombre d'échantillons positifs / nombre total (%)
Génomes	**Norovirus**	0 / 150 (0,0 %)
	FRNAPH	56 / 150 (37,3 %)
	Microviridae	42 / 150 (28,0 %)
Particules infectieuses	**FRNAPH**	0 / 150 (0,0 %)
	CS	17 / 150 (11,3 %)

Tous les échantillons analysés se sont avérés négatifs en génome de NoVs. Concernant les FRNAPH, les génomes ont été détectés dans 56 échantillons (37,3 %) mais les FRNAPH infectieux totaux n'ont pas été détectés. Les génomes de *Microviridae* ont été retrouvés dans 28,0 % des échantillons (n=42/150) et les CS infectieux dans 17 échantillons (11,3 %). Etant donné l'absence de détection de

génome de NoVs dans cet échantillonnage, il n'est pas possible d'évaluer la pertinence des bactériophages fécaux comme indicateurs des NoVs dans les salades.

Les informations de traçabilité ont été fournies pour 125 échantillons sur 150 (83 %). Les échantillons ont été cultivés en plein champs (36,0 %) ou sous serre (44,7 %). L'irrigation a été faite par aspersion avec des eaux de surface (38,7 %), des eaux souterraines (25,3 %) ou des eaux pluviales (4,0 %). Peu d'échantillons de salades ont subi un épisode pluvieux avant l'analyse (16,7 %). Toutefois, comme précédemment, l'absence d'échantillons positifs en génome de NoVs ne permet pas d'évaluer l'impact des pratiques sur la contamination virale au champ.

4. Conclusion

Les génomes de NoVs ont été détectés uniquement dans les échantillons de salades (jeunes pousses, roquette et mâche) matières premières ou 4ème gamme, influencés par une pollution fécale récente (i.e. présence d'*E. coli*). Aucun échantillon de salades matières premières analysés de manière aléatoire ne s'est avéré positif en génomes de NoVs.

Les génomes de FRNAPH ont été détectés principalement dans les échantillons de salades matières premières analysés aléatoirement (37,3 %). Pour les salades influencées par une pollution fécale récente, le seul échantillon positif en génome de FRNAPH s'est avéré être une salade matière première. Ainsi, le génome de FRNAPH pourrait être préférentiellement détecté dans les matières premières et la très faible prévalence en génome de FRNAPH observée pour les échantillons influencés (1,5 %) pourrait être liée au nombre restreint de salades matières premières analysées (n=9/66). Etant donné que les génomes de NoVs et FRNAPH n'ont jamais été détectés de manière concomitante (quel que soit le type d'échantillon), aucune relation n'a pu être démontrée par les analyses statistiques. De plus, tous les échantillons se sont avérés négatifs en FRNAPH infectieux totaux. Par conséquent, dans les conditions testées, les FRNAPH ne semblent pas de bons indicateurs du danger à NoVs dans les salades, quel que soit leur statut vis-à-vis d'une pollution d'origine fécale.

Les génomes de *Microviridae* ont été détectés dans les échantillons de salades analysés aléatoirement (28 %) et influencés par une pollution fécale récente (10,6 %), mais dans aucun des échantillons positifs en génome de NoVs. Par conséquent, comme pour les FRNAPH, aucune relation entre les génomes de NoVs et de *Microviridae* n'a pu être mise en évidence. Les *Microviridae* n'apparaissent donc pas non plus comme de bons indicateurs du danger à NoVs dans les salades. En revanche, les CS infectieux ont été détectés dans des échantillons de matières premières analysés de manière aléatoire (11,3 %) et influencés par une pollution fécale récente (33,3 % matières premières et 47,4 % échantillons 4ème gamme). Ils ont été également détectés dans 64 % des échantillons positifs en génome de NoV. Par conséquent, les CS infectieux étant plus fréquemment retrouvés dans les salades et pouvant être détectés de manière concomitante avec le génome de NoVs, ils constituent des indicateurs potentiels prometteurs pour évaluer le danger à NoVs infectieux dans les salades. Cependant, pour valider cette approche, il est nécessaire d'analyser plus d'échantillons de salades matières premières positifs en génomes de NoVs dans lesquels seraient recherchés les CS infectieux. Par ailleurs, la pertinence des CS infectieux pour distinguer les NoVs infectieux et non infectieux devrait également être validée par leur détection dans des échantillons de végétaux frais incriminés dans des épidémies à NoVs (traduisant donc la présence de NoVs infectieux *stricto sensu*).

Ces travaux suggèrent que les mesures de maîtrise appliquées à l'heure actuelle dans l'industrie 4ème gamme sont suffisantes et permettent de limiter la contamination en NoVs dans les produits finis. Dans les conditions testées, la contamination des salades 4ème gamme par du génome de NoVs est probablement majoritairement d'origine manuportée et récente. Par conséquent, l'indicateur *E. coli,* critère d'hygiène des procédés permettant de mettre en évidence une contamination fécale récente, semble être adapté pour piloter la qualité microbiologique globale (bactérienne et virale) des salades 4ème gamme. La contamination au champ est en revanche plus difficilement maîtrisable et d'autres

outils sont nécessaires pour pouvoir caractériser le risque lié à la présence de NoVs dans les matières premières. Les CS infectieux apparaissent comme des indicateurs prometteurs qui nécessitent des travaux complémentaires pour être validés.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

La Carbona Stéphanie : https://orcid.org/0000-0002-3408-1369

Robin Maëlle : https://orcid.org/0009-0006-8293-0915

Bertrand Isabelle : https://orcid.org/0000-0003-0743-4402

Gantzer Christophe : https://orcid.org/0000-0003-2287-4852

Bichet Marion : https://orcid.org/0000-0003-0046-7754

Contributions des auteurs

Conceptualisation : BERTRAND I., BOUDAUD N., GANTZER C.

Méthodologie : BERTRAND I., BOUDAUD N., ROBIN M., GARDETTE M.

Validation : BERTRAND I., BOUDAUD N., ROBIN M., LA CARBONA S.

Investigation : ROBIN M., LE BLOND M., CHALLANT J., GARDETTE M., MASSIER S., BICHET M.

Préparation du manuscrit : ROBIN M., LA CARBONA S., BERTRAND I.

Supervision : BERTRAND I., BOUDAUD N., ROBIN M., LA CARBONA S.

Obtention du financement : BERTRAND I., BOUDAUD N., GANTZER C.

Tous les auteurs ont lu et adhèrent à la version publiée du manuscrit.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient les partenaires industriels qui se sont impliqués dans ce projet, ainsi que Sonia LITMAN, Directrice du service Réglementation - Qualité - Nutrition chez Pact'Alim, qui a œuvré à la

mise en place du plan d'échantillonnage avec les professionnels, à la collecte des données de traçabilité et à la relecture de ce document.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a bénéficié du soutien de l'UMT ACTIA VIROcontrol (Ministère de l'agriculture, de la souveraineté alimentaire et de la forêt) et du CASDAR (avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural).

Références bibliographiques

Alegbeleye, O.O., Singleton, I., Sant'Ana, A.S., 2018. Sources and contamination routes of microbial pathogens to fresh produce during field cultivation: A review. Food Microbiol. 73, 177. https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.01.003

ASQAP, 2022. Australian Shellfish Quality Assurance Program. Operations Manual, Version 6.

Bartsch, S.M., Lopman, B.A., Ozawa, S., Hall, A.J., Lee, B.Y., 2016. Global Economic Burden of Norovirus Gastroenteritis. PloS One 11, e0151219. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151219

Bichet, M.C., Gardette, M., Das Neves, B., Challant, J., Erbs, A., Roman, V., Robin, M., La Carbona, S., Gantzer, C., Boudaud, N., Bertrand, I., 2024. A new understanding of somatic coliphages belonging to the Microviridae family in urban wastewater. Water Res. 249, 120916. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120916

Boudaud, N., 2014. Etude de prévalence virale (norovirus et VHA) sur des salades 4ème gamme. Projet privé VIRALENCE.

Boudaud, N., Gantzer, C., 2015. Évaluation du danger viral dans les matrices alimentaires. Bull. Épidémiologique Santé Anim. Aliment. 68, 26–30.

Carducci, A., Battistini, R., Rovini, E., Verani, M., 2009. Viral Removal by Wastewater Treatment: Monitoring of Indicators and Pathogens. Food Environ. Virol. 1, 85–91. https://doi.org/10.1007/s12560-009-9013-x

Carlson, K.B., Dilley, A., O'Grady, T., Johnson, J.A., Lopman, B., Viscidi, E., 2024. A narrative review of norovirus epidemiology, biology, and challenges to vaccine development. Npj Vaccines 9, 1–9. https://doi.org/10.1038/s41541-024-00884-2

Chandran, S., Gibson, K.E., 2024. Improving the Detection and Understanding of Infectious Human Norovirus in Food and Water Matrices: A Review of Methods and Emerging Models. Viruses 16, 776. https://doi.org/10.3390/v16050776

Directive 2020/2184, 2020. Directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (refonte).

EFSA, 2014. Scientific opinion on the risk posed by pathogens in food of non-animal origin. Part 2 (Salmonella and Norovirus in leafy greens eaten raw as salads). EFSA Journal, 12(3): 3600, 118p. 118.

EFSA and ECDC, 2023. The European Union One Health 2022 Zoonoses Report. EFSA J. 2023, EFSA Journal 21(12), e8442, 222 pp.

EPA, 2006. 40 CFR Parts 9, 141, and 142. National primary drinking water regulations: ground water rule. Fed. Regist., Rules and regulations 71 (216).

Ettayebi, K., Kaur, G., Patil, K., Dave, J., Ayyar, B.V., Tenge, V.R., Neill, F.H., Zeng, X.-L., Speer, A.L., Di Rienzi, S.C., Britton, R.A., Blutt, S.E., Crawford, S.E., Ramani, S., Atmar, R.L., Estes, M.K., 2024. Insights into human norovirus cultivation in human intestinal enteroids. mSphere e0044824. https://doi.org/10.1128/msphere.00448-24

Farkas, K., Walker, D.I., Adriaenssens, E.M., McDonald, J.E., Hillary, L.S., Malham, S.K., Jones, D.L., 2020. Viral indicators for tracking domestic wastewater contamination in the aquatic environment. Water Res. 181, 115926. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115926

FranceAgrimer, 2022. Les chiffres-clés de la filière Fruits & Légumes frais et transformés en 2020.

Hartard, C., Banas, S., Loutreul, J., Rincé, A., Benoit, F., Boudaud, N., Gantzer, C., 2016. Relevance of F-Specific RNA Bacteriophages in Assessing Human Norovirus Risk in Shellfish and Environmental Waters. Appl. Environ. Microbiol. 82, 5709–5719. https://doi.org/10.1128/AEM.01528-16

Hartard, C., Banas, S., Rivet, R., Boudaud, N., Gantzer, C., 2017. Rapid and sensitive method to assess human viral pollution in shellfish using infectious F-specific RNA bacteriophages: Application to marketed products. Food Microbiol. 63, 248–254. https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.12.002

Hartard, C., Leclerc, M., Rivet, R., Maul, A., Loutreul, J., Banas, S., Boudaud, N., Gantzer, C., 2018. F-Specific RNA Bacteriophages, Especially Members of Subgroup II, Should Be Reconsidered as Good Indicators of Viral Pollution of Oysters. Appl. Environ. Microbiol. 84, e01866-17. https://doi.org/10.1128/AEM.01866-17

Hartard, C., Rivet, R., Banas, S., Gantzer, C., 2015. Occurrence of and Sequence Variation among F-Specific RNA Bacteriophage Subgroups in Feces and Wastewater of Urban and Animal Origins. Appl. Environ. Microbiol. 81, 6505–6515. https://doi.org/10.1128/AEM.01905-15

Hayashi, T., Kobayashi, S., Hirano, J., Murakami, K., 2024. Human norovirus cultivation systems and their use in antiviral research. J. Virol. 98, e0166323. https://doi.org/10.1128/jvi.01663-23

Hayashi, T., Yamaoka, Y., Ito, A., Kamaishi, T., Sugiyama, R., Estes, M.K., Muramatsu, M., Murakami, K., 2022. Evaluation of Heat Inactivation of Human Norovirus in Freshwater Clams Using Human Intestinal Enteroids. Viruses 14, 1014. https://doi.org/10.3390/v14051014

Health Canada, Water and Air Quality Bureau, 2019. Guidelines for Canadian drinking water quality – Enteric viruses. Guidelines Technical Document. Ottawa, Ontario.

ISO 10705-1, 2001. Water quality. Detection and enumeration of bacteriophages - Part1: enumeration of specific F-RNA bacteriophages.

ISO 10705-2, 2000. Water quality. Detection and enumeration of bacteriophages - Part2: enumeration of somatic coliphages.

ISO 15216-1, 2017a. Microbiology of the food chain — Horizontal method for determination of hepatitis A virus and norovirus using real-time RT-PCR Part 1: Method for quantification.

ISO 15216-1, 2017b. Microbiology of food and animal feed -- Horizontal method for determination of hepatitis A virus and norovirus in food using real-time RT-PCR -- Part 1: Method for quantification. Int. Organ. Stand. Geneva Switz. 63.

Jiménez-Clavero, M.A., Escribano-Romero, E., Mansilla, C., Gómez, N., Córdoba, L., Roblas, N., Ponz, F., Ley, V., Sáiz, J.-C., 2005. Survey of Bovine Enterovirus in Biological and Environmental Samples by a Highly Sensitive Real-Time Reverse Transcription-PCR. Appl. Environ. Microbiol. 71, 3536–3543. https://doi.org/10.1128/AEM.71.7.3536-3543.2005

Jofre, J., Lucena, F., Blanch, A.R., 2021. Coliphages as a Complementary Tool to Improve the Management of Urban Wastewater Treatments and Minimize Health Risks in Receiving Waters. Water 13, 1110. https://doi.org/10.3390/w13081110

Julien-Javaux, F., Gérard, C., Campagnoli, M., Zuber, S., 2019. Strategies for the safety management of fresh produce from farm to fork. Curr. Opin. Food Sci. 24, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.01.004

Korajkic, A., McMinn, B., Herrmann, M.P., Sivaganesan, M., Kelty, C.A., Clinton, P., Nash, M.S., Shanks, O.C., 2020. Viral and Bacterial Fecal Indicators in Untreated Wastewater across the Contiguous United States Exhibit Geospatial Trends. Appl. Environ. Microbiol. 86, e02967-19. https://doi.org/10.1128/AEM.02967-19

Machado-Moreira, B., Richards, K., Brennan, F., Abram, F., Burgess, C.M., 2019. Microbial Contamination of Fresh Produce: What, Where, and How? Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 18, 1727–1750. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12487

Martín-Díaz, J., Casas-Mangas, R., García-Aljaro, C., Blanch, A.R., Lucena, F., 2016. Somatic coliphages as surrogates for enteroviruses in sludge hygienization treatments. Water Sci. Technol. 73, 2182–2188. https://doi.org/10.2166/wst.2016.066

NF EN ISO 15216-1, 2017. Microbiology of food and animal feed -- Horizontal method for determination of hepatitis A virus and norovirus in food using real-time RT-PCR -- Part 1: Method for quantification. Int. Organ. Stand. Geneva Switz. 63.

Ogorzaly, L., Gantzer, C., 2006. Development of real-time RT-PCR methods for specific detection of F-specific RNA bacteriophage genogroups: application to urban raw wastewater. J. Virol. Methods 138, 131–139. https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2006.08.004

PR NF EN ISO 15216-2, 2018. Microbiology of food and animal feed -- Horizontal method for determination of hepatitis A virus and norovirus in food using real-time RT-PCR -- Part 2: Method for qualitative detection. Int. Organ. Stand. Geneva Switz. 28.

Rzeżutka, A., Cook, N., 2004. Survival of human enteric viruses in the environment and food. FEMS Microbiol. Rev. 28, 441–453. https://doi.org/10.1016/j.femsre.2004.02.001

Taylor, M.W., Su, R., Cordell-Stewart, B., Morgan, S., Crisp, M., Hodes, M.E., 1974. Bovine Enterovirus-1: characterization, Replication and Cytopathogenic Effects. J. Gen. Virol. 23, 173–178. https://doi.org/10.1099/0022-1317-23-2-173

Victor, C.P., Ellis, K., Lamar, F., Leon, J.S., 2021. Agricultural Detection of Norovirus and Hepatitis A Using Fecal Indicators: A Systematic Review. Int. J. Microbiol. 2021, 6631920. https://doi.org/10.1155/2021/6631920

Wolf, S., Hewitt, J., Greening, G.E., 2010. Viral multiplex quantitative PCR assays for tracking sources of fecal contamination. Appl. Environ. Microbiol. 76, 1388–1394. https://doi.org/10.1128/AEM.02249-09

Yang, X., Scharff, R., 2024. Foodborne Illnesses from Leafy Greens in the United States: Attribution, Burden, and Cost. J. Food Prot. 87, 100275. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100275

Pour citer cet article : Stéphanie La Carbona, Maëlle Robin, Julie Challant, Marion Bichet, Maxime Le Blond, *et al*.. NOROSTAN : potentiel d'indicateurs viraux pour estimer le caractère infectieux des norovirus humains dans les salades 1ère et 4ème gammes. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.258-270. 10.17180/ciag-2025-vol107-art19

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

CapriMam3D : les technologies 3D au service de la traite caprine de demain

Alice ROUSSEAU[1], Gaëlle COQUEREAU[1], Marine MINIER[1], Alice HUBERT[1], Cécile LAITHIER[1], Jean-Louis POULET[1], Renée DE CREMOUX[1], Claire BOYER[1], Christophe HUAU[2], Laurent DELATTRE[3], Pierre MARTIN[4], Apolline BAILLYS SALINS[4], Pierre-Guy MARNET[5]

[1] Institut de l'Elevage, 149 Rue de Bercy, 75 595 Paris Cedex 12, France

[2] Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, 147 rue de l'Université 75338 Paris Cedex 07, France

[3] 3D Ouest, 5 Rue Louis de Broglie, 22300 Lannion, France

[4] CapGènes, 2135 Route de Chauvigny, 86550 Mignaloux-Beauvoir, France

[5] UMR SELMET, CIRAD, INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, 65 Rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes, France

Correspondance : alice.rousseau@idele.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art20

Résumé

La mamelle caprine est au centre de nombreux enjeux : santé et bien-être animal, qualité du lait, performances zootechniques et bien-être des éleveurs. La diversité des mamelles implique une adaptation des équipements de traite et une amélioration de la sélection génétique sur la morphologie des mamelles. CapriMam3D a permis de développer un scanner 3D des mamelles caprines avec des images obtenues plus précises et répétables que celles obtenues via un pointage classique manuel. La norme des tests des manchons trayeurs *in vitro* impose des trayons en plastique dur, mais grâce aux technologies 3D, des trayons artificiels souples et anatomiques ont été créés, aux comportements proches de ceux observés en ferme à la traite. Les méthodes comme la thermographie ou la mesure de congestion par cutimètre permettent de mesurer *In vivo* l'impact sur l'animal objectivant les couples manchons/trayons les plus efficaces et respectueux des animaux.

Mots-clés : caprin, mamelle, trayons, manchon trayeur, technologies tridimensionnelles

Abstract: CapriMam3D: 3D technologies to support goat milking tomorrow

The goat udder is at the heart of many issues: animal health and welfare, milk quality, zootechnical performance and well-being of farmers. The diversity of the udders involves adapting milking equipment and improving genetic selection on the morphology of the teats. CapriMam3D has developed a 3D scanner of the caprine udders which generates more precise and repeatable images than those obtained via conventional manual pointing. The standard for in vitro teat cup testing requires teats made of hard plastic, but thanks to 3D technologies, flexible and anatomical artificial teats have been created, with behaviors similar to those observed on milking farms. Thermography or congestion measurement of teat tissues with cutimeter allow *in vivo* tests to complete these approaches to measure the impact of milking equipment on teats and thus define the most suitable liner/teat combinations.

Keywords: goat, udder, teat, liners, three-dimensional technologies

1. Introduction

Dans les exploitations laitières, la traite constitue un pivot, tant sur le plan de la relation homme-animal, que d'un point de vue zootechnique et sanitaire. Elle intervient notamment dans l'expression des

performances zootechniques des animaux (niveau de production laitière, qualité du lait). En corollaire, des conditions de traite délétères (ambiance défavorable, agressivité de la traite, présence d'incidents de traite) peuvent dégrader durablement la santé des mamelles et des trayons et à terme la situation sanitaire des cheptels. En termes de travail, la traite représente 47 % du travail d'astreinte en élevages caprins livreur (Guinamard *et al*., 2010). Souvent vécue comme une contrainte, elle nécessite d'être optimisée dans ses trois dimensions animal-machine-trayeur. Ce projet s'intéresse plus particulièrement à l'interface animal-machine, dont l'étude relève d'approches technologiques et méthodologiques novatrices. Les objectifs du projet CapriMam3D étaient donc de : mettre au point un dispositif mobile de phénotypage tridimensionnel de la mamelle chez la chèvre permettant de i) se substituer au pointage visuel (mesure et observation d'un technicien agréé) et d'automatiser l'acquisition objective et en routine de phénotypes relatifs à la mamelle et au trayon incluant de nouvelles mesures de dimensions et de volumes, ii) disposer à des fins expérimentales, d'un outil d'évaluation des modifications de forme de la mamelle et du trayon notamment entre avant et après traite, suspectées d'être à l'origine de la survenue d'incidents (entrées d'air notamment) et de la transmission des infections. En parallèle le projet visait aussi à élaborer un modèle d'étude des interactions trayon – manchon trayeur par la technologie 3D en i) concevant des trayons artificiels souples plus représentatifs des conformations mammaires caprines, ii) adaptant les méthodes de caractérisation des manchons trayeurs bovins aux spécificités (forme, fonctionnement) de ceux des caprins, iii) proposant un protocole d'étude en laboratoire et *in vivo* de l'interface trayon – manchon trayeur en tant que première étape de comparaison et d'adaptation des matériels de traite aux caractéristiques animales.

2. Matériel et méthodes

2.1. Mise au point d'un dispositif mobile de phénotypage tridimensionnel de la mamelle chez la chèvre

2.1.1. Cahier des charges du dispositif

L'enjeu principal du cahier des charges a été de définir des contraintes et attentes qui puissent répondre aux aspirations des chercheurs, mais aussi des pointeurs de CapGènes. Il a été basé sur les premières observations et conclusions obtenues par le premier prototype.

Plusieurs partenaires du projet CapriMam3D avaient travaillé ensemble dans le cadre du projet Morpho3D dans lequel un dispositif de caméras a permis de modéliser et analyser la morphologie des bovins (Allain *et al*., 2021). Forts de cette expérience, un premier prototype de scanner 3D pour étudier les mamelles caprines a été développé. Il était composé d'un cadre au ras du sol, réglable, sur lequel 4 capteurs Intel Realsense D455 ont pu être placés et combinés. Les capteurs étaient intégrés dans des boitiers réglables étanches. L'essai de ce prototype (Photo 1) a été réalisé sur une chèvre factice.

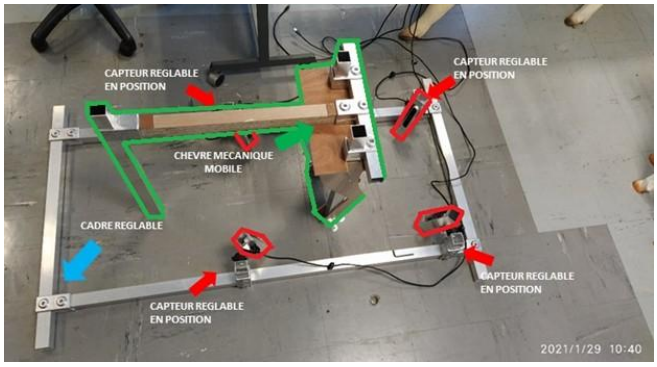


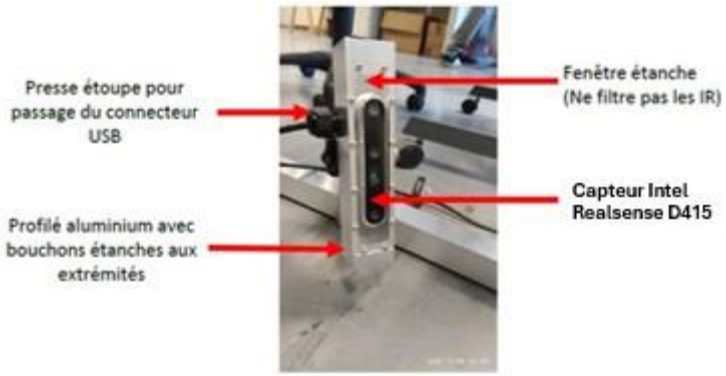
Photo 1 : Premier prototype du dispositif de phénotypage tridimensionnel de la mamelle chez la chèvre ; crédit : Laurent Delattre

Les images générées par le dispositif final devaient permettre de réaliser des mesures suffisamment précises, soit un objectif de précision de +/- 5 mm par rapport à la surface de la mamelle. Pour cela, il a été décidé que plusieurs capteurs (4 à 6) à prise de données rapide, voire instantanée, seraient

nécessaires pour couvrir l'ensemble de la mamelle, et que la chèvre devrait être immobile pendant l'acquisition des images. Deux possibilités de dispositif étaient envisagées à ce stade :

- soit un dispositif avec capteurs fixes ;
- soit un dispositif avec capteurs mobiles (sur rails).

D'autre part les capteurs d'images devaient représenter un faible encombrement sur le futur dispositif, être adaptés à la prise d'images sur une distance réduite, être étanches à l'eau et aux poussières, mais également non sujets à une obsolescence trop rapide. Le modèle qui répondait le mieux à l'ensemble des critères était le capteur Intel Realsense D415, car le capteur Intel Realsense D455 employé auparavant était moins compatible avec une prise de vue mobile et était plus onéreux (Photo 2).



De plus, le dispositif devait pouvoir être transportable (en véhicule utilitaire, puis sur place) et facilement mis en place dans différents élevages.

Photo 2 : Détails de la caméra Intel Realsense D415 retenue pour le scanner 3D des mamelles caprines ; crédit : Laurent Delattre

2.1.2. Evolution du prototype de scanner 3D des mamelles caprines

Grâce aux apports du premier prototype et les conclusions du cahier des charges, il a été décidé que la structure se présenterait sous forme d'une cage de contention. Cela devait permettre de stabiliser l'animal afin d'obtenir des images nettes et précises avec le scanner.

Les images obtenues par le premier prototype n'ayant pas été satisfaisantes en raison de la gestion de bruits trop importants, le deuxième prototype a été développé autour de capteurs mobiles.

La fréquence d'acquisition d'images a également été accrue. Les capteurs effectuaient un mouvement d'avant en arrière par rapport à l'animal en moins de 10 secondes. Le débit permis par ce dispositif est de 12 chèvres à l'heure (5 minutes par chèvre).

Deux capteurs étaient positionnés sur les côtés et deux capteurs étaient placés en dessous du dispositif (Photo 3). La translation permettait de couvrir une zone plus importante et, le déplacement se faisant automatiquement, d'adapter la zone de capture par rapport à la taille de l'animal.

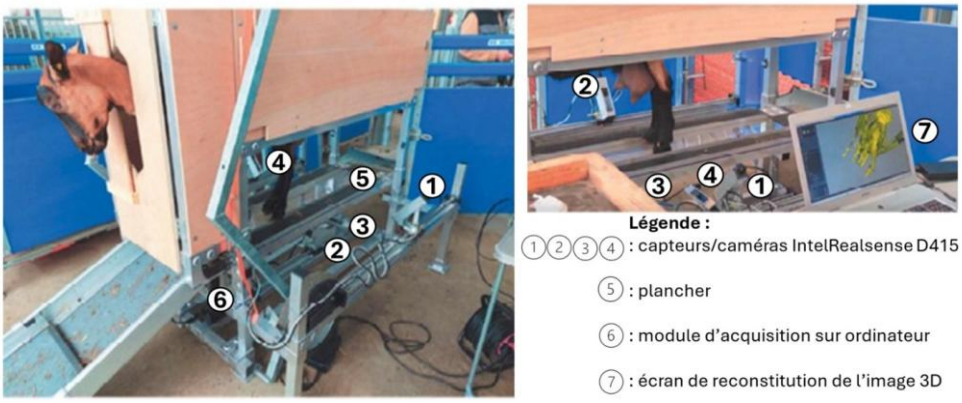


Photo 3 : Second prototype du dispositif de phénotypage tridimensionnel de la mamelle chez la chèvre ; crédit : Gaëlle Coquereau

2.1.3. Tests de validation du scanner 3D des mamelles caprines

Plusieurs expérimentations ont été menées, afin de vérifier la pertinence de ce prototype de scanner :

- validation de la méthode de mesure des principaux points anatomiques des mamelles caprines (angle de l'attache avant de la mamelle, hauteur de la mamelle sous l'attache des trayons, distance entre le plancher de la mamelle et le jarret, hauteur du ligament suspenseur médian, fixation de l'attache arrière de la mamelle, forme, longueur et orientation des trayons) à partir des images 3D, par rapport aux mesures manuelles à l'aide d'un vernier et d'un ruban mesureur. Cela a été réalisé sur 10 chèvres hautes productrices multipares de race Alpine de la ferme expérimentale de Méjusseaume (Marnet *et al*., 2024a) ;
- validation du fonctionnement du prototype sur une diversité de morphologies mammaires, sur 260 chèvres hautes productrices multipares de race Alpine, entre les deux traites journalières. Ces chèvres étaient réparties dans les fermes expérimentales INRAe de Bourges et Méjusseaume (Rennes), ainsi que dans 3 élevages commerciaux.

2.1.4. Traitement des images issues des scans 3D des mamelles caprines

Les images prises par les différents capteurs 3D sont ensuite fusionnées via le logiciel RecFusion, développé par l'entreprise 3DOuest.

Puis, le logiciel Metrux 2α, développé par 3DOuest, permet de pointer successivement les points nécessaires à l'analyse morphométrique sur les images 3D obtenues grâce au logiciel RecFusion. Une fois les points validés, le logiciel génère une feuille de synthèse, contenant toutes les mesures exploitables. L'utilisateur peut également visualiser chaque point et ajuster manuellement sa position si nécessaire, offrant une précision accrue et une correction des éventuelles erreurs. Cette fonctionnalité, bien que manuelle, est essentielle pour garantir une qualité de mesure élevée. Pour répondre aux exigences du projet, 17 mesures morphométriques spécifiques ont été définies pour les mamelles caprines et ont été calculées à partir de 19 points distincts identifiés sur les surfaces 3D.

2.2. Caractériser les interactions entre manchons trayeurs et trayons

En étape préalable aux études d'interactions *in vitro,* devaient être développés des trayons artificiels caprins, ainsi qu'un protocole d'évaluation de l'interface entre le trayon et le manchon trayeur.

Les essais ont été menés sur la plateforme TRET (Transfert, Recherche, Expertise sur la Traite) située à Derval (44), qui est un outil de recherche et d'innovation dédié à l'amélioration des matériels et pratiques de traite et de la qualité du lait pour les bovins, ovins, et caprins. Elle comprend un laboratoire d'essais, une installation de traite expérimentale modulable et une mamelle artificielle qui mime celles des vaches, brebis ou chèvres (Photo 4).

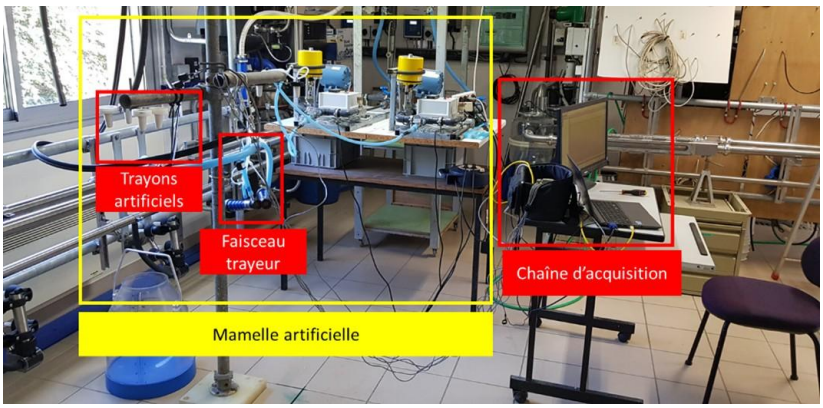


Photo 4 : Dispositif de mamelle artificielle et sa chaîne d'acquisition, plateforme TRET à Derval ; crédit : Jean-Louis Poulet

Le matériel de traite testé est équipé de capteurs de vide et de débit, gérés par une chaine d'acquisition, qui enregistre leurs variations au niveau du faisceau trayeur (embouchure, tuyaux courts à lait et de pulsation et tuyau long à lait en général).

2.2.1. Etat des lieux des faisceaux trayeurs caprins et de leurs propriétés

Un état des lieux des gobelets trayeurs et manchons trayeurs utilisés en traite caprine a été réalisé à partir des données du logiciel de saisie et de suivi des contrôles des machines à traire Logimat, développé par le COmité Français Interprofessionnel pour les Techniques de production du lait (COFIT). Les données ont été analysées sur la campagne 2018, avec plus de 2 700 élevages représentés. Cela a permis de retenir deux gobelets trayeurs pour la suite du projet, selon les critères suivants :

- être parmi les plus employés en élevages caprins français ;
- caractéristiques techniques ou mécaniques les plus contrastées possible (manchons silicone vs. manchons caoutchouc, avec et sans valves automatiques) ;
- être présents ou avec possibilité d'être installés sur les élevages caprins expérimentaux partenaires.

Ainsi, les 2 gobelets trayeurs qui ont été retenus sont :

- le modèle 703627225170, TopFlow avec manchons trayeurs en silicone, de marque GEA ;
- le modèle 988513, G50+ avec manchons trayeurs en caoutchouc (nitrile), de marque DeLaval.

2.2.2. Etat des lieux de la diversité des trayons et création de trayons artificiels souples

Il existait avant le projet un modèle conique en plastique dur de « Trayon Artificiel Normé » (TAN, norme ISO 6690:2007) permettant de tester les différents matériels de traite en laboratoire. Cependant, l'étude Mamovicap (CASDAR RT) a permis de décrire des morphologies de trayons caprins très diverses et très éloignées et de ce trayon modèle (De Cremoux *et al*., 2018).

Un cahier des charges a été établi pour développer des trayons artificiels plus représentatifs de cette diversité anatomique, à partir des données de pointage de mamelles pour la race Alpine fournies par CapGènes.

Cela a été complété par des mesures anatomiques des trayons (longueur, épaisseur et épaisseur réactive), réalisées sur 480 chèvres, dans les élevages caprins expérimentaux de la Ferme du Pradel et de l'INRAe de Bourges.

La comparaison aux pointages réalisés par les techniciens CapGènes a permis de définir les caractéristiques d'un trayon moyen, ainsi que de trayons extrêmes de petites (extrême bas) et grandes dimensions (extrême haut) (Photo 5). La résistance des tissus étant elle aussi très variable chez les caprins, 2 variantes de souplesse de chacun de ces modèles ont été conçues avec des « trayons artificiels souples pleins » plus résistants, des « trayons artificiels souples anatomiques » beaucoup plus souples. Tous ces modèles ont été fabriqués par coulage de silicone dans des moules (et des contre-moules pour les « trayons artificiels souples anatomiques ») imprimés en 3D :

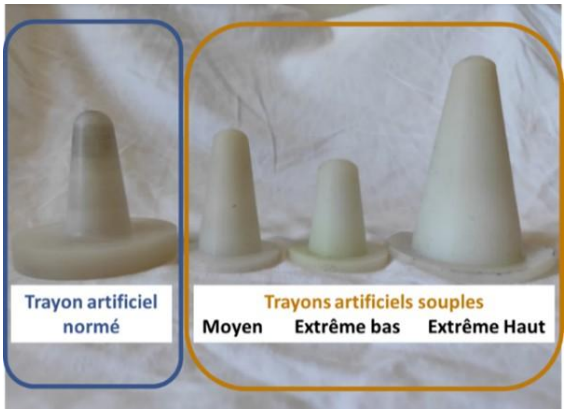


Photo 5 : Comparaison du trayon artificiel normé face aux 3 trayons artificiels souples pleins ; crédit : Jean-Louis Poulet

Les trayons artificiels souples anatomiques avaient pour objectif de se rapprocher au mieux des trayons des chèvres, avec la reproduction d'une citerne de trayon, permettant une interaction entre cette citerne et son contenu et le manchon trayeur en mouvement pendant la pulsation. Les coupes frontales des différents trayons artificiels évoqués sont présentées en Figure 1.



Figure 1 : Schémas des différents trayons artificiels, normé, souple et souple anatomique (de gauche à droite) ; crédit : Jean-Louis Poulet

2.2.3. Caractérisation des manchons trayeurs en 3 étapes

Tout d'abord, les manchons trayeurs ont été caractérisés à sec (sans circulation de liquide) et hors fonctionnement de la mamelle artificielle. Cela a été fait en « sortie de sachet », avec le relevé des principales côtes (longueurs, diamètres, épaisseurs, …). Le but était d'observer si les manchons trayeurs présentaient une diversité au sein de l'échantillon et s'ils différaient éventuellement des mesures fournies par les fabricants.

Des mesures ont également été effectuées sur des manchons trayeurs usagés, quand cela était possible, pour voir l'impact du vieillissement sur les caractéristiques des manchons trayeurs. Les 3 étapes de caractérisation des manchons trayeurs ont été les suivantes :

Première étape : Mesures sur manchons trayeurs entiers ou découpés en 2 dans la longueur ou en 3 dans la largeur des :

- longueurs et diamètres des différentes parties ;
  - totale,
  - embouchure et chambre d'embouchure,
  - corps de manchon trayeur, corps de manchon trayeur à 75 mm, « en haut » et « en bas » du corps,
  - tuyau court à lait ou connexion du tuyau court à lait.
- épaisseurs et dureté à différents points (mesures réalisées sur les manchons trayeurs retenus, à sec et après fonctionnement) ;
  - lèvre d'embouchure,
  - corps de manchon trayeur à 75 mm de profondeur, "en haut" et "en bas" du corps,
  - haut, milieu et bas du plan de flambage,
  - connexion avec tuyau court à lait.

Seconde étape : Mesure de la pression de flambage, de la profondeur d'embouchure et de la longueur utile selon le protocole suivant :

- positionnement du manchon trayeur à tester dans son étui ;
- positionnement sur l'appareil de mesure des pressions de flambage ;
- mise sous vide progressive ;
- lecture de mesure de vide au moment du contact des parois du corps et mesure de la profondeur d'embouchure ;

- retournement du gobelet ;
- positionnement du dispositif de mesure de la profondeur ;
- mise sous vide dans les mêmes conditions ;
- lecture de la profondeur.

Troisième étape : Caractérisation des manchons trayeurs en fonctionnement selon les binômes manchon trayeur/trayon artificiel, avec circulation de liquide, en simulation de traite.

Le lien entre le vide au niveau du tuyau court à lait et le vide sous trayon a été redémontré. Il y a une corrélation très forte entre les 2 niveaux de vide (R = 0,9974). En effet, il est beaucoup plus complexe avec des trayons artificiels souples de mesurer le vide sous trayon. Les mesures ont donc été faites au niveau des tuyaux courts à lait, comme cela se fait également lors de tests pendant la traite en fermes.

La caractérisation des manchons trayeurs en fonctionnement s'est déroulée comme suit :

- paramétrage de la machine à traire : configuration (ligne basse vs ligne haute), vide (38 kPa en ligne basse et 40 kPa en ligne haute), pulsation (90, 60/40, simultanée), faisceau trayeur équipé du jeu de manchons trayeurs à tester ;
- connexion des points de mesure de la chaîne d'acquisition (chambre d'embouchure gauche, chambre d'embouchure droite, tuyau court à lait, tuyau court de pulsation) ;
- paramétrage de la chaîne d'acquisition (courbe de référence) ;
- montage des trayons artificiels à tester ;
- chargement de la cuve de stockage de la mamelle artificielle (pas besoin de lait étant donné que nous étudions seulement l'effet de la présence d'un liquide en circulation) ;
- réglage du débit de la mamelle artificielle (débit moyen 1,3, gamme : 0 - 0,5 - 0,7 - 1 - 1,3 - 1,5 - 2) ;
- relevé et analyse des données.

2.2.4. Tests in vitro des interactions trayon artificiel-manchon trayeur

La validation de la méthode d'étude des interactions trayons-manchons trayeurs a été réalisée à partir du trayon artificiel souple plein et 6 des 8 manchons trayeurs les plus employés d'après les données Logimat.

La configuration de la machine à traire du laboratoire était alors médiane :

- ligne basse ;
- niveau de vide de 38 kPa ;
- 90 pulsations/min, en simultané ;
- rapport de phases succion/massage de 60/40 ;
- variation du débit de liquide : 0 ; 0,8* ; 1 ; 1,3* ; 1,5 ; 2 l/min (* = débits utilisés par la norme ISO en caprins)

Puis, les interactions ont été mesurées entre les 2 manchons trayeurs retenus (Delaval G50+ et GEA TopFlow) et les différents trayons artificiels (normés, souples et souples anatomiques).

2.2.5. Tests in vivo des interactions trayon-manchon trayeur chez la chèvre

L'expérimentation *in vivo* s'est déroulée sur 2 semaines de mesures dans la ferme du Pradel. L'installation de traite de la ferme est composée de 2 installations en parallèle, équipées pour cet essai

de faisceaux trayeurs DeLaval G50+ (caoutchouc) habituels d'un côté et de faisceaux trayeurs GEA TopFlow (silicone) de l'autre côté, chacun connectés via un collecteur Y (sans griffe) au tuyau long à lait. Le modèle expérimental était de type « Split plot » : le lot 1 était trait sur le quai 1 la semaine 1, puis trait sur le quai 2 la semaine 2, en inversion avec le lot 2.

Les 12 chèvres alpines, de chacun des 2 groupes sur lesquels les tests ont été réalisés, ont été sélectionnées sur leurs conformations mammaires, selon 4 morphologies types dont les critères sont les suivants (Photo 5) :

- trayons globuleux/en poire (avec un étranglement à la base) ;
- trayons coniques larges avec zone d'attache entre mamelle et trayon peu marquée ;
- trayons coniques moyens et longs sur mamelle ronde ;
- trayons coniques plus étroits et plus courts sur mamelle ronde.

Ces morphologies et leurs particularités avaient été étudiées au cours du projet Mamovicap (Photo 6) mais la ferme du Pradel n'avait pas de 5ème classe d'animaux à trayons droits étroits.

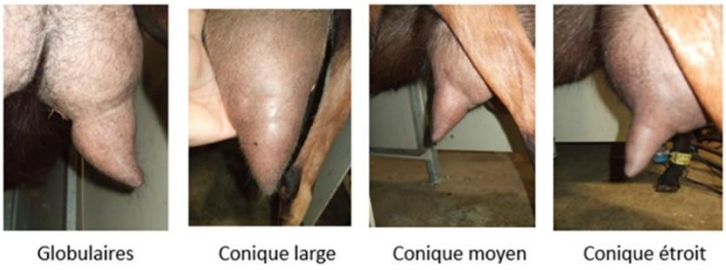


Photo 6 : Illustration des typologies de trayons rencontrées en élevages caprins ; crédit : Pierre-Guy Marnet

Finalement, quatre chèvres multipares par morphologie mammaire ont été sélectionnées. Les chèvres présentant de l'hyperkératose, une éversion de trayon, un sphincter abimé ou la présence d'anneau de compression avant la traite ont été écartées pour limiter les biais.

La méthode retenue intègre la mesure de plusieurs dimensions physiques avec :

- **l'analyse de la cinétique d'émission du lait** (débit de lait, durée de traite, durée de surtraite, production de lait), à partir des données collectées par des compteurs à lait portatifs (LactoCorder SG, de WMB) disposés sur les tuyaux longs à lait de l'installation de traite ;
- **l'analyse des niveaux de variation du vide** au niveau des chambres d'embouchure gauche et droite, des tuyaux à lait et de pulsation(VaDia de BioControl)) ;
- **l'observation des mouvements des manchons trayeurs** durant la traite (chutes, glissements sans chute, bruits d'entrée d'air, grimpages) ;
- **l'observation des trayons pour savoir s'ils étaient humides** (dans ce cas, traite qualifiée d'humide, causée par un souci d'évacuation du lait) ou non.

Ces observations ont été réalisées durant chaque traite de chaque chèvre expérimentale, sur les traites du matin, selon une grille prédéfinie.

La méthode retenue intègre aussi un certain nombre de mesure physiologiques de l'impact sur les trayons :

- **l'observation de l'état des trayons post traite** (anneaux de constriction, changement de couleur, extrémités pincées ou aplaties).

Ceci a été effectué sur toutes les chèvres de la ferme du Pradel, via photographies et observations/qualifications :

- **l'observation des réactions des chèvres à la traite** (coups de pied, piétinement, crispation, agitation générale) ;
- **les mesures de congestion de l'extrémité du trayon**, avant et après la traite, à l'aide d'un cutimètre (Photo 7) selon la méthode employée pour les travaux de Leila Le Caro (Le Caro, 2014).



Photo 7 : Positionnement et utilisation d'un cutimètre sur un trayon court de chèvre ; crédit : Pierre-Guy Marnet

Ces mesures ont été effectuées au niveau de l'extrémité des trayons, une fois par trayon (gauche et droite), juste avant et après la traite, sous une pression de 23 kPa. Cela a été effectué sur toutes les chèvres de la ferme du Pradel présentes à la traite :

- **Les mesures de thermographie des mamelles**, avant et après la traite, avec une caméra thermique FLIR E60 sur 5 zones de la mamelle : base de la citerne, intégralité de la surface du trayon, base du trayon, milieu du trayon et extrémité du trayon (Photo 8). Ceci a été effectué sur toutes les chèvres de la ferme du Pradel présentes à la traite. L'intérêt de cette méthode pour l'étude de l'impact de l'équipement de traite avait été démontré par Marnet *et al*. (Marnet *et al*., 2024b; Paulrud *et al*., 2005).

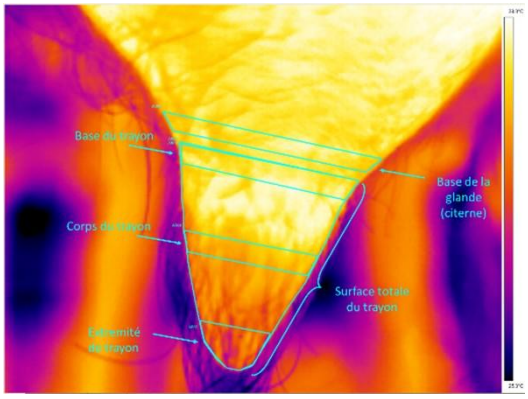


Photo 8 : Prise de vue des 5 zones du trayon caprin avec une caméra thermique ; crédit : Pierre-Guy Marnet

2.2.6. Comparaison des mesures de niveau de vide au niveau du tuyau court à lait in vitro et in vivo, pour les trayons et les manchons trayeurs retenus

Les réactions des trayons réels et des deux types de trayons artificiels souples et souples anatomiques utilisés sur les manchons trayeurs retenus, ont été comparées. Les mesures de variation de vide au niveau des tuyaux courts à lait des 24 chèvres sélectionnées en ferme expérimentale pour les tests *in vivo*, ont été comparées à celles de 6 types de trayons artificiels comparables aux morphologies de trayon suivis *in vivo* :

- trayon souple et trayon souple anatomique moyen ;
- trayon souple et trayon souple anatomique extrême bas ;
- trayon souple et trayon souple anatomique extrême haut.

3. Résultats et discussion

3.1. Mise au point d'un dispositif mobile de phénotypage tridimensionnel de la mamelle chez la chèvre

3.1.1. Prototype abouti du scanner 3D mobile en élevage caprin

Les différents essais menés en laboratoire, sur une chèvre factice, puis en fermes expérimentales et commerciales, ont permis de valider l'utilisation et d'obtenir un modèle de scanner 3D mobile des mamelles en accord avec les contraintes et attentes des différents acteurs du projet.

En effet, le dispositif est mobile (roues), transportable (taille adaptée à un transport en utilitaire léger), permet la contention d'une chèvre (système de cornadis), optimise le nombre de capteurs nécessaires (4 au total) et permet l'acquisition d'images de mamelles caprines à un débit d'environ 100 chèvres/heure. De plus, les mesures faites via le dispositif ont été comparées et validées par rapport à des mesures de pointages.

Le dispositif actuel répond davantage aux enjeux et contraintes de la recherche et développement qu'à celui du pointage en ferme, car il mériterait encore quelques adaptations afin d'être adopté sur le terrain lors de pointages de mamelles. En particulier, les rampes d'accès au dispositif pour la chèvre ont été jugées encore trop fragiles et difficiles à entretenir, mais aussi leur pente trop raide et l'absence de gardes fous inhibantes pour la circulation des animaux. Une évolution reste donc à faire pour améliorer ces points pour une meilleure durabilité du dispositif à l'avenir et limitation du stress des animaux.

Certaines images arrière étant parfois lacunaires en cas de mamelle très débordante sous la queue de l'animal masquant l'attache mammaire, une couverture la plus complète de la mamelle pourrait nécessiter un 5ème capteur fixé à l'arrière de la cage.

Lors de la validation du scanner, les résultats ont confirmé une bonne cohérence entre les mesures sur images 3D et mesures sur les animaux, bien que des écarts mineurs subsistent. Un défi majeur identifié concerne la complexité pour un utilisateur non expert de sélectionner correctement les points de référence nécessaires à l'analyse. Cette difficulté met en évidence la nécessité de développer un système automatisé de positionnement de ces points, basé sur l'intelligence artificielle. Ce développement, encore à l'état de projet, permettra à terme d'améliorer à la fois la précision et la répétabilité des mesures, tout en réduisant le temps d'intervention humaine.

3.2. Caractérisation des interactions entre manchons trayeurs et trayons

3.2.1. Résultats de la caractérisation des manchons trayeurs in vitro

Les mesures de caractérisation des manchons trayeurs retenus pour la suite de l'étude sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Résumé des mesures de pression de flambage et des profondeurs d'embouchure des manchons trayeurs G50+ et TopFlow

MANCHONS TRAYEURS	PRESSION DE FLAMBAGE AU MANOMETRE (N=3)	PRESSION DE FLAMBAGE SANS GOBELET (N=3)	PROFONDEUR D'EMBOUCHURE AVEC GOBELET A 38 KPA	PROFONDEUR D'EMBOUCHURE SANS GOBELET A 38 KPA

			(N=3)	(N=3)
DELAVAL G50+	13,86 kPa	10,14 kPa	3,94 cm	1,12 cm
GEA TOPFLOW	11,44 kPa	9,55 kPa	3,06 cm	1,48 cm

La méthode d'étude des interactions entre trayons artificiels souples et différents types de faisceaux trayeurs, dans une configuration de machine à traire médiane, a été validée. La Figure 2 illustre la diversité de comportement des faisceaux trayeurs.

Nous pouvons constater qu'il y a autant de courbes de niveau de vide du tuyau court à lait que de modèles de faisceau trayeur. Par ailleurs, les trayons artificiels souples amènent à des résultats plus proches des constats et remontées issus du terrain (retours des conseillers traite et des interlocuteurs des fabricants) que les autres trayons artificiels.

Les faisceaux trayeurs pour lesquels on observe une chute rapide du niveau de vide dans le tuyau court à lait peuvent amener à une mauvaise tenue des gobelets trayeurs sur les trayons, qui *in vivo* engendrerait des incidents de traite. Cela laisse supposer que certains faisceaux trayeurs sont plus adaptés à accepter des débits de lait élevés (>1,5 l/min), tandis que d'autres sont plus adaptés à accepter de faibles débits (<1 l/min).

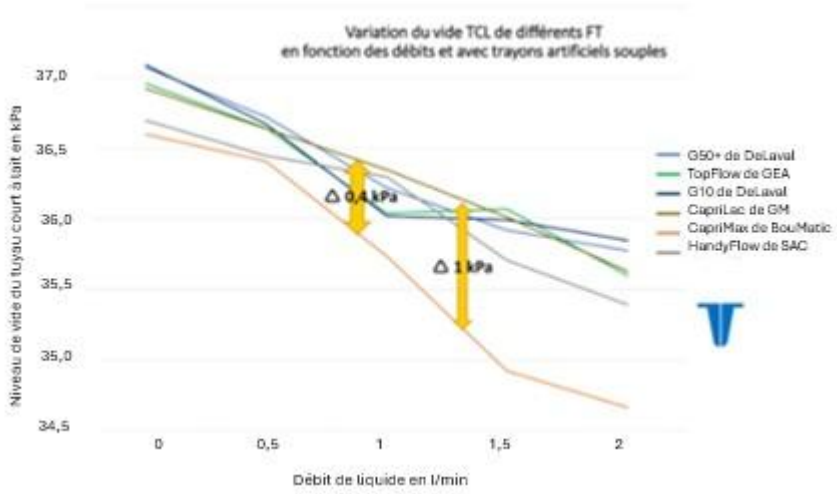
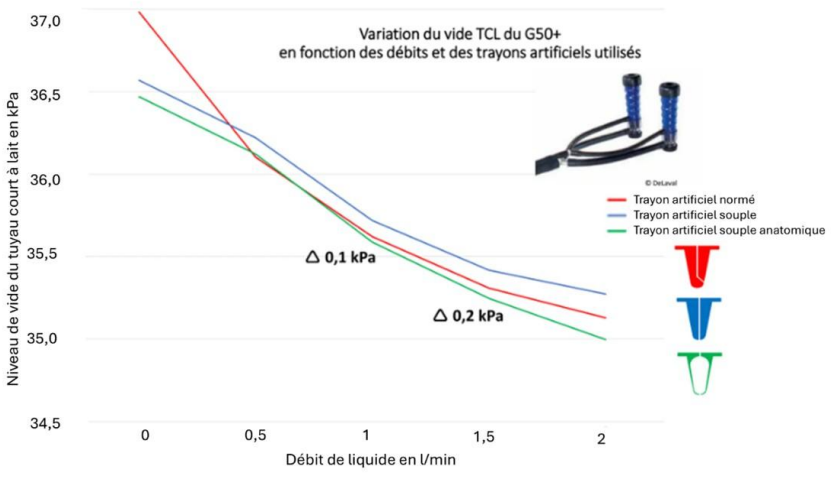


Figure 2 : Les différentes cinétiques de niveau de vide du tuyau court à lait entre un trayon artificiel souple et 6 modèles de faisceaux trayeurs différents

3.2.2. Résultats des interactions manchons trayeurs et trayons artificiels obtenus in vitro

L'impact de l'interaction entre le faisceau trayeur Delaval G50+ et les différents trayons artificiels a été mesuré. Nous pouvons observer que, dans tous les cas, il y a une baisse progressive et logique du niveau de vide du tuyau court à lait, avec l'augmentation progressive du débit de liquide à travers les trayons artificiels.



Les courbes obtenues pour les trayons artificiels souples et souples anatomiques sont parallèles pour des débits allant de 0 à 1 l/min, puis, au-delà de ce débit, la

tendance reste linéaire (Figure 3).

Figure 3 : Les différentes cinétiques de niveau de vide du tuyau court à lait entre 3 trayons artificiels différents et le faisceau trayeur Delaval G50+, manchons trayeurs en caoutchouc

Le Tableau 2 nous permet de constater que le niveau de vide du tuyau court à lait évolue entre 35 et 37 kPa pour les 3 types de trayons artificiels étudiés.

Les différences entre les maxima et les minima de niveau de vide du tuyau court à lait vont de 1,3 à 1,9 kPa, pour respectivement le trayon artificiel souple et le trayon artificiel normé. Cela n'aurait pas un impact significatif sur les conditions de traite *in vivo.*

Tableau 2 : Niveaux de vides minimums et maximums au niveau des tuyaux courts à lait, pour les différents types de trayons artificiels

	TRAYON ARTIFICIEL NORME	TRAYON ARTIFICIEL SOUPLE	TRAYON ARTIFICIEL SOUPLE ANATOMIQUE
NIVEAU DE VIDE DU TUYAU COURT A LAIT MINIMUM	35,1 kPa	35,3 kPa	35,0 kPa
NIVEAU DE VIDE DU TUYAU COURT A LAIT MAXIMUM	37,0 kPa	36,6 kPa	36,5 kPa

Enfin, les mêmes mesures ont été effectuées avec le faisceau trayeur GEA TopFlow (Figure 4).

Globalement, les courbes de niveau de vide du tuyau court à lait varient davantage selon le débit de liquide et le type de trayons artificiels qu'avec le faisceau trayeur Delaval G50+.

La courbe du trayon artificiel normé est plus linéaire que celles des autres trayons artificiels ; cela peut être lié au fait que les manchons trayeurs sont testés à l'aide des trayons artificiels normés lors de leur développement.

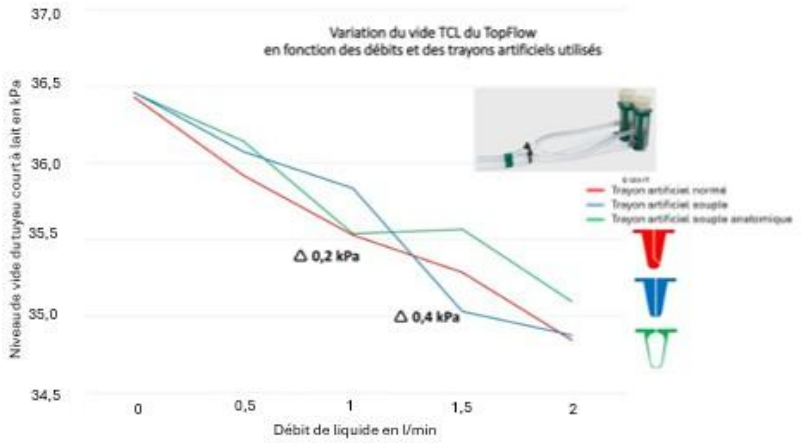


Figure 4 : Les différentes cinétiques de niveau de vide du tuyau court à lait entre 3 trayons artificiels différents avec le faisceau trayeur GEA TopFlow, manchons trayeurs en silicone

Le système de mamelle artificielle peut encore être perfectionné, notamment dans la gestion des petits débits de liquide. Pour compléter cette étude, les améliorations possibles de la mamelle artificielle et du trayon artificiel souple anatomique pourraient permettre de mieux mimer une cinétique d'émission du lait. Il aurait été intéressant de réaliser une analyse statistique pour visualiser le degré de similarité entre les variables trayons et manchons trayeurs selon le vide du tuyau court à lait.

3.2.3. Résultats des interactions manchons trayeurs et trayons obtenus in vivo

Lors des expérimentations, il n'a pas été possible de mesurer le débit et la variation de vide simultanément *in vivo*, la mesure Lactocorder affectant significativement les conditions de vide sous trayons, ce qui rend les corrélations moins fiables. Le débit moyen de lait des animaux s'est montré

assez homogène (0,782 kg/min) avec l'installation de traite de la ferme expérimentale du Pradel et leurs animaux qui sont très proches des données moyennes enregistrées préalablement pour la race Alpine en France (Marnet *et al*., 2005). Cela n'a donc pas permis d'étudier des débits supérieurs à 1 l/min, qui existent parfois en ferme et qui auraient pu permettre de mieux différencier les trayons et manchons, et peut-être montrer des interactions supplémentaires.

- **Etat des trayons**

La présence d'anneaux de compression est un évènement fréquent (44,6 % sur corps et 28,9 % à la base). Il n'y a pas d'effet des manchons mais un effet de la morphologie des trayons ainsi qu'une interaction significative. La présence de trayons rougis reste un évènement rare. En revanche 23,3 % des trayons sont pincés/blanchis post-traite et c'est le manchon TopFlow qui pince le plus les trayons. Les trayons humides sont aussi un évènement très fréquent (53,8 % des trayons sortent humides de la traite) mais qui ne s'explique ni par la forme des trayons ni par les manchons utilisés. La traite semble globalement peu agressive avec une décongestion généralisée après la traite, mais des résultats sont plus contrastés avec le manchon TopFlow qui peut se montrer congestionnant sur trayons coniques moyens et longs. Le manchon G50+, marque plus la base des gros trayons coniques.

- **Mouvements des manchons trayeurs durant la traite**

La chute des gobelets est un évènement fréquent (32,1 % des gobelets chutent durant la traite). Il n'y a pas d'effet significatif du matériel mais un effet trayon existe avec moins de chutes avec les petits trayons coniques. Les gobelets glissent peu durant la traite. En revanche, il y a fréquemment des entrées d'air (66,1 % d'entrées d'air durant la traite). Là encore, cela ne dépend pas du matériel, mais de la forme des trayons avec les gros trayons coniques larges qui sont les plus affectés. Enfin, le grimpage des faisceaux trayeurs est très fréquent (63 % des chèvres), il peut arriver plusieurs fois durant une même traite (104,6 % d'entrées d'air durant la traite). Il n'y a pas d'effet forme des trayons, mais un effet matériel significatif avec plus de grimpage lié aux manchons G50+.

- **Comportement des chèvres**

Les animaux sont globalement peu agités, et s'ils le sont, c'est une caractéristique liée à l'animal car ce sont souvent les mêmes. Le piétinement et les coups de pied sont cependant significativement plus fréquents avec le manchon de type G50+ surtout avec les trayons coniques moyens et longs.

- **Production laitière et cinétique d'émission du lait**

Les animaux étaient équilibrés en production par lot (2,7 kg de lait par traite) pour limiter les facteurs de variation des débits et temps de traite et le sont restés durant l'essai. Concernant les mesures de cinétique d'émission du lait, les débits sont plutôt faibles dans ce troupeau (80 % du troupeau avec traite > 3 min). Il n'y a pas d'effet de l'équipement, mais les trayons globulaires sont significativement plus rapides à traire (0,95 à 1,2 l/min vs 0,7 à 0,9 l/min en débit moyen à maximum respectivement pour les 3 autres formes). Il y a 30 % de surtraite en moyenne (0,54 min), malgré l'existence des déposes automatiques réglées à 250 ml/min.

- **Thermographie des trayons**

Comme dans d'autres études, nous confirmons l'existence d'une différence significative des températures entre la base, le corps et l'extrémité du trayon et une baisse significative de la température après la traite liée à une évacuation du lait qui compense le réchauffement induit par l'interaction manchon-trayons.

La variation de température post traite est plus faible au niveau du corps qu'à la base et l'extrémité des trayons (-0,89°C *vs* -1,04°C et -1,67°C respectivement) ce qui, en l'absence de congestion s'expliquerait par la proximité du corps plus chaud que l'environnement et peut-être à une légère baisse de la circulation sanguine dans le trayon suite aux grimpages et pincements (anneaux de compression

liés à la lèvre d'embouchure du manchon trayeur en fin de traite). Cette variation de température post-traite diffère en effet significativement selon la forme des trayons (-0.72°C, -0.91°C, 1.21°C, -1.77°C respectivement pour les trayons globulaires, large coniques, moyens coniques longs et petits coniques courts) ce qui tend à indiquer que les gros trayons sont plus échauffés que les plus étroits par l'interaction avec les manchons. Enfin cette variation est significativement différente selon le type de manchon (-1,47°C *vs* -0,85°C respectivement pour le modèle TopFlow et G50+) ce qui là aussi témoigne d'un échauffement et donc à une interaction un peu plus forte entre les manchons en silicone et la peau qu'entre la matière caoutchouc/nitrile et la peau. Il existe une interaction significative entre le type de matériel et la forme des mamelles/trayons, le refroidissement le plus faible se retrouvant avec les trayons les plus gros et le manchon G50+.

- **Fluctuations de vide durant la traite**

L'usage du Vadia, confirme que les petits trayons ont un vide d'embouchure plus fort et plus stable qui explique que les faisceaux ne glissent pas ni ne chutent lorsqu'ils sont en interaction avec eux. Les fluctuations de vide sont significativement affectées par les équipements de traite avec des pertes de charges et des fluctuations de vide supérieures dans les tuyaux courts à lait avec les manchons G50+, ce qui pourrait s'expliquer par le système spécifique de valve automatique de coupure de vide et par les mouvements de manchons supérieurs enregistrés avec ce modèle.

L'interaction entre matériel et formes des trayons est donc confirmée pour la première fois par cette expérimentation et plusieurs méthodes utilisées nous permettent de l'évaluer. Les comportements des animaux et les méthodes traditionnelles de mesures de débit n'ont pas permis de différencier les équipements, ni les formes de trayons (hors trayons globulaires plus rapides à traire). A l'inverse, les impacts sur les trayons et les mouvements des manchons ainsi que la thermographie semblent confirmer les observations faites sur l'état des trayons et sont intéressantes pour identifier les impacts sur les tissus. Il en ressort que les trayons gros et larges, et les chèvres qui les possèdent, sont les plus affectés par le matériel et que les manchons en caoutchouc, plus mobiles et plus durs grimpent plus, marquent plus à la base et induisent plus d'agitation et de coups de patte même s'ils massent et décongestionnent mieux. Malgré des débits de lait significativement supérieurs pour les trayons globulaires, il semble donc plutôt recommandable de sélectionner et d'homogénéiser les troupeaux vers des morphologies de trayons plus typées « vache » et donc plus courts et plus étroits à la base, si l'on utilise ces deux modèles de faisceau trayeur parmi les plus fréquemment trouvés en ferme en France. Malgré quelques différences significatives qui donneraient l'avantage aux manchons en silicone, plus souples et un peu plus étroits de corps mais plus larges à l'embouchure, la traite s'est avérée de bonne qualité avec les deux équipements. Nos technologies permettent donc de différencier finement les équipements quant à leurs effets sur l'animal et pourront être utilisées à l'avenir pour comparer l'ensemble des équipements commecialisés. Il reste à intégrer aussi les critères de facilité d'usage, de coût et de durabilité pour finaliser nos choix.

3.2.4. Comparaison entre les résultats obtenus pour les interactions in vitro et in vivo des couples trayon-manchon trayeur

Pour les trayons artificiels souples et souples anatomiques moyens :

Les trayons artificiels souples moyens étant souples alors que les trayons artificiels normés étaient en plastique dur, ils ont influencé la traite différemment, mais ils se rapprochent des comportements observés *in vivo*, à morphologie de trayon comparable.

Le niveau de vide du tuyau court à lait moyen du trayon artificiel souple anatomique moyen est le plus faible parmi les trayons artificiels et donc le plus proche du niveau de vide du tuyau court à lait moyen du trayon moyen conique *in vivo*.

La souplesse du trayon artificiel souple, potentiellement combiné à l'important espace intérieur pour le trayon artificiel souple anatomique, a peut-être eu un impact sur les niveaux de vide du tuyau court à lait moyens, par rapport à un trayon artificiel normé en plastique dur.

Pour les trayons artificiels souples et souples anatomiques extrêmes hauts :

Le trayon souple anatomique extrême haut se déformant trop et donnant des mesures incohérentes de niveau de vide du tuyau court à lait, les résultats obtenus n'ont pas été exploitables.

Le niveau de vide du tuyau court à lait obtenu lors de la traite des trayons artificiels normés et des gros trayons coniques *in vivo* est influencé par le type de manchon et le débit, tandis que pour le trayon artificiel souple extrême haut, il est seulement influencé par le débit.

De ce fait, les trayons artificiels normés et souples extrêmes hauts ne réagissent pas de la même façon que les gros trayons coniques *in vivo*. Malgré l'échec de l'usage des trayons artificiels souples anatomiques extrêmes hauts, le trayon artificiel normé reste le modèle plus proche du trayon gros conique *in vivo*.

Pour les trayons artificiels souples et souples anatomiques extrêmes courts :

Des différents modèles de trayons artificiels souples et souples anatomiques, le trayon artificiel souple anatomique extrême bas est celui qui se rapproche le plus du comportement du petit trayon conique *in vivo*, donnant des résultats plus proches de la réalité *in vivo* que les trayons artificiels normés en plastique rigide.

Les résultats du modèle d'interaction trayons-manchons trayeurs *in vitro* se rapprochent de la réalité mesurée en ferme. Les trayons artificiels souples anatomiques extrêmes bas ont montré leur supériorité pour mimer les résultats *in vivo* et nous encouragent à continuer en ce sens.

4. Conclusion

Le projet CapriMam3D a permis de développer un prototype de scanner 3D des mamelles caprines qui répond aux attentes à la fois de CapGènes, et aux ambitions de recherche sur le suivi et la compréhension de la diversité morphologique des mamelles caprines. L'automatisation des mesures anatomiques reste à réaliser et pourrait être envisagée grâce à l'intelligence artificielle de type « machine learning ».

D'autre part, les outils et le protocole de caractérisation en laboratoire des manchons trayeurs et de l'interface trayon-manchon trayeur ont été validés, bien que des améliorations soient encore à apporter : la mamelle artificielle du laboratoire TRET n'est pas encore adaptée pour gérer de petits débits de liquide, et la fabrication des trayons artificiels souples anatomiques devra viser à leur assurer une meilleure longévité pour pouvoir approfondir les recherches.

Les résultats des mesures d'interaction entre les trayons (artificiels ou réels) et les manchons trayeurs retenus confirment que les méthodes et outils qui ont été employés sont pertinents dans ce cadre d'étude. D'autre part, il a été montré que certains modèles de trayons artificiels souples sont proches dans leurs comportements de certaines morphologies observées *in vivo*, ce qui encourage à poursuivre les recherches dans ce sens.

Le screening des méthodes d'étude des interactions manchons-trayons *in vivo* a permis de montrer les plus pertinentes pour évaluer ces interactions tant au niveau physiologique que physique ou comportementales. Elles nous ont permis d'objectiver pour la première fois l'existence d'interactions manchons-formes des trayons mais plusieurs de ces méthodes sont lourdes et donc peu généralisables pour des tests de routine.

L'ensemble des innovations employées dans ce projet offrent une analyse nouvelle de la morphologie des mamelles et des trayons en lien avec la santé et la qualité du lait, mais aussi des techniques de

traite et du matériel associé. Il pourrait être envisagé de compléter ces approches par l'étude de l'effet trayeur sur les interactions trayons-manchons trayeurs.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Cécile Laithier : https://orcid.org/0009-00087195 -7973

Christophe Huau : https://orcid.org/0000-0002-7566-0738

Jean-Louis Poulet : https://orcid.org/0000-0002-2729-1421

Pierre-Guy Marnet : https://orcid.org/0000-0002-7674-6867

Renée de Crémoux : https://orcid.org/0000-0002-3822-6465

Laurent Delattre : https://orcid.org/0000-0001-5720-3982

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont contribué à différentes parts à la rédaction ou à la relecture de cet article.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Merci à tous les partenaires et à tous les contributeurs à cette étude.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été réalisée avec le financement du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Références bibliographiques

Allain, C., Caillot, A., Depuille, L., Delouard, J.M., Delattre, L., Luginbuhl, T., Lassalas, J., Faverdin, P., Le Cozler, Y., 2021. Morpho3D - Utilisation d'un dispositif d'imagerie en 3D pour modéliser la forme complète de bovins laitiers et mesurer des paramètres morphologiques, le volume et la surface corporelle. *Innovations Agronomiques* 82, 215-228. https://doi.org/10.15454/21GN-KN32

De Cremoux, R., Lagriffoul, G., Allain, C., Alaoui-Sossé, L., Astruc J-M., Batut, E., Bergonier, D., Brun-Lafleur, L., Clément, V., Couzy, C., Foucras, G., Fouilloux M-N., Frappat, B., Huau, C., Lecomte, C., Lefrileux, Y., Legris, M.,

Lopez, C., Marnet P-G., Martin, P., Palhière, I., Poulet J-L., Ribaud, D., Rupp, R., 2018. MAMOVICAP - Vers des outils innovants d'intervention et d'aide à la décision pour la maîtrise des mammites en élevage de petits ruminants laitiers. *Innovations Agronomiques* 63, 99-114. https://doi.org/10.15454/1.5191150817615706E12

Guinamard, C., Bossis, N., Caramelle-Holtz, E., 2010. Référentiel travail en élevages caprins, synthèse de 53 Bilans Travail en productions laitière et fromagère fermières. RMT Travail en Enlevage 20.

Le Caro, L., 2014. Effet de la dépose automatique débitmétrique et de son paramétrage sur la traite de la chèvre Alpine. Effet sur le temps de travail, la quantité et la qualité du lait, l'inflammation mammaire et les tissus du trayon. Rapport de fin d'étude d'ingénieur d'Agrocampus Ouest, France, 33 P. https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01086950v1

Marnet, P.-G., Billon, P., Sinapis, E., Da Ponte, P., Manfredi, E., 2005. Machine milking ability in goats: genetic variability and physiological basis of milk flow rate. In: Physiological and Technical Aspects of Machine Milking, Technical Series. ICAR, Villa del Ragno, Via Nomentana 134, 00162 Rome, pp. 15–24.

Marnet, P.-G., Coquereau, G., Laluque, T., Martin, P., Delouard, J.M., Luginbuhl, T., Delattre, L., 2024a. High-precision scanning system for complete 3D goat udder and teat imaging, and analysis of morphological traits. Small Ruminants Research, 231, 107194. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2023.107194

Marnet, P.-G., Velasquez, A.B., Dzidic, A., 2024b. Infrared Thermography of Teat in French Dairy Alpine Goats: A Promising Tool to Study Animal–Machine Interaction during Milking but Not to Detect Mastitis. Animals 14, 6, 882, p.13. https://doi.org/10.3390/ani14060882

Paulrud, C., Clausen, S., Andersen, P., Rasmussen, M., 2005. Infrared Thermography and Ultrasonography to Indirectly Monitor the Influence of Liner Type and Overmilking on Teat Tissue Recovery. Acta Vet. Scand. 46, 137–147. https://doi.org/10.1186/1751-0147-46-137

Pour citer cet article : Alice Rousseau, Gaëlle Coquereau, Marine Minier, Alice Hubert, Cécile Laithier, *et al.*. CapriMam3D : les technologies 3D au service de la traite caprine de demain. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.271-287. 10.17180/ciag-2025-vol107-art20

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

UniGéno : vers une évaluation génomique unifiée et en une seule étape

Amandine LAUNAY[1], Philippe BOULESTEIX[1], Marine BARBAT[2], Emeric DUGAS[2], Romain FOUGEROLLAS[2], Iola CROUE[2], Caroline MOULIN[2]

[1] Institut de l'Elevage, 149 rue Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

[2] GenEval, Maison Nationale des Eleveurs, 149 rue Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

Correspondance : amandine.launay@idele.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art21

Résumé

Le projet UniGéno a visé à mettre en place une nouvelle méthode d'évaluation génomique appelée Single-Step pour l'ensemble des races des deux filières bovines, laitière *et al*laitante. A la suite des travaux de recherche de l'INRAE et de l'UMT eBIS (projet ASAP), l'objectif fut de mettre en œuvre progressivement la nouvelle méthode, y compris pour les races ne bénéficiant pas encore d'évaluation génomique, avant le déploiement final. Plusieurs études furent nécessaires pour explorer des aspects méthodologiques ou encore mettre en place des évolutions de modèles concomitantes au déploiement du Single-Step. L'impact de toutes les évolutions sur l'ensemble des races a été testé pour aider les utilisateurs à interpréter les variations d'index et pour leur permettre de s'approprier la nouvelle méthodologie avant le déploiement.

Mots-clés : génétique, génomique, bovins laitiers, bovins allaitants

Abstract: UniGéno – To common and one step genomic evaluation

The aim of the UniGéno project was to implement a new genomic evaluation method, a Single-Step SNPBLUP evaluation, for all breeds of dairy and beef populations. Following research work by INRAE and UMT eBIS (ASAP project), the aim of this project was to gradually implement the new method, including breeds which did not yet have genomic evaluations for partners, before implementing the routine evaluation. Several studies were necessary to explore methodological aspects or to implement model improvements before the implementing a Single-Step. The impact of all improvements on all breeds was measured to help users (French breed societies and breeding companies) understand result variations and prepare for the transition to Single-Step evaluation.

Keywords: genetic, genomic selection, beef cattle, dairy cattle

1. Introduction

La sélection génétique des bovins s'est organisée dans les années 1980 avec la sélection des reproducteurs à partir des performances de leurs filles. Elle a évolué au fil des années grâce aux avancées informatiques et scientifiques. En 2009, les évaluations génomiques voient le jour avec l'arrivée des puces ADN et la mise en évidence de gènes d'intérêt. Initialement développée sur les caractères les plus héritables, la méthode a rapidement été élargie à l'ensemble des caractères et des races en bovins laitiers (2016) puis en bovins allaitants pour les 3 principales races sur les caractères mesurés en ferme de la naissance au sevrage (2015). L'évaluation génomique devient la méthode de référence et remplace peu à peu l'évaluation polygénique sur phénotypes. Ses qualités sont reconnues : gain de précision pour les jeunes animaux, augmentation du progrès génétique sur l'ensemble des caractères permettant de diversifier les objectifs de sélection.

Toutefois, sur les dernières années, elle montrait ses limites, notamment pour les jeunes reproducteurs. A l'arrivée de leurs premières filles, il était observé une baisse générale de leurs index. Cet écart s'explique par un biais au sein des évaluations génétiques dû à une présélection des jeunes animaux sur la base de leur index génomique seulement. En effet, seuls les meilleurs animaux génotypés sont commercialisés et ont des performances, les moins bons sont éliminés et n'ont jamais de performance (Patry et Ducrocq, 2011). La présélection induit une sous-estimation des meilleurs animaux évalués sur performances. Les résultats de cette évaluation polygénique (performances pré-corrigées des effets) servent ensuite à l'évaluation génomique pour l'élaboration des équations de prédiction, ce décalage se propage donc de génération en génération.

Pour s'affranchir de ce biais, une nouvelle méthode d'évaluation génétique et génomique a été développée : le « Single-Step », ou évaluation génomique en une seule étape. Elle permet d'analyser simultanément l'ensemble des informations disponibles (pédigrées, phénotypes et génotypes) pour l'ensemble des animaux d'une même race, qu'ils soient mâles ou femelles, génotypés ou non (Christensen et Lund, 2010 ; Misztal, Legarra et Aguilar, 2009) pour une meilleure précision des résultats. Cette méthode corrige ainsi le biais lié à la présélection génomique.

L'équipe G2B (Génétique et Génomique Bovine) d'INRAE a débuté, dès 2017, le développement du logiciel de calcul pour appliquer la méthodologie Single-Step au sein des évaluations génétiques françaises. Le programme ASAP (Application du Single-Step pour Améliorer les Prédictions génomiques), financé par APIS-GENE et conduit par l'UMT eBIS, a validé le logiciel et mesuré les impacts de cette méthodologie d'évaluation sur certaines races et caractères. Cependant, les bovins comptent deux filières avec chacune leurs spécificités, au total 10 principales races laitières et 9 principales races allaitantes avec environ 50 index calculés. Le projet UniGéno, débuté en 2020, piloté par Idele, avec la contribution du ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté Alimentaire et de la Forêt, a évalué l'impact du changement de méthode sur l'ensemble des caractères et des races en collaboration avec les Organismes (OS) et Entreprises de Sélection (ES), avant un déploiement par filière. Les bovins allaitants profitent de ce changement pour revoir les modèles des évaluations (naissance-vêlage, potentiel de croissance et aptitude à l'allaitement) et intégrer les groupes génétiques dans les évaluations.

2. Principe de l'évaluation Single-Step : une évaluation en une seule étape pour tous

La méthode Single-Step est innovante car elle prend en compte l'ensemble des informations disponibles (pédigrées, phénotypes, génotypes, données zootechniques) pour tous les animaux et les traite en une seule étape (Tableau 1). Il n'y a donc plus de distinction entre les animaux évalués sur performances seulement et les animaux génotypés. Chaque animal apporte sa part d'information plus ou moins dense dans le système et bénéficie de l'information de l'ensemble de ses collatéraux ou apparentés pour estimer son potentiel génétique. Les valeurs génétiques sont plus précises et exemptes de biais de présélection.

La méthodologie Single-Step a été testée et développée dans les deux filières bovines pour l'ensemble des caractères. Les races déjà évaluées avec l'évaluation génomique ont été analysées en priorité, les races n'étant pas encore en évaluation génomique ont fait l'objet d'une analyse spécifique pour apporter des conseils et recommandations sur les génotypages et la mise en œuvre d'une indexation génomique.

Tableau 1 : Description des méthodes d'évaluations génétiques avant et après passage au Single-Step

Avant Single-Step	Après Single-Step

<table>
<tr><td>Ingrédients 1</td><td>Pédigrées
Performances
Données zootechniques caractérisant l'animal et le milieu</td><td rowspan="2">Ingrédients</td><td rowspan="2">Pédigrées
Performances
Données zootechniques caractérisant l'animal et le milieu
Génotypages</td></tr>
<tr><td>Résultat 1</td><td>Evaluation polygénique
« Index polygénique »</td></tr>
<tr><td>Ingrédient 2</td><td>Performances précorrigées de l'étape1
Génotypes</td><td rowspan="2">Résultat</td><td rowspan="2">Evaluation Single-Step
« Index »</td></tr>
<tr><td>Résultat 2</td><td>Evaluation génomique
« Index génomique »</td></tr>
<tr><td colspan="2">Inconvénients :
Méthode en plusieurs étapes avec approximations de calcul
Risque de biais de présélection
Deux index disponibles</td><td colspan="2">Avantages :
1 seule méthodologie
Utilisation optimisée des données disponibles
Partage des informations génomiques entre animaux typés et non typés
1 seul index</td></tr>
</table>

3. Evolutions de modèles concommitantes au Single-Step

3.1. Méthode de travail

3.1.1. Amélioration de l'évaluation naissance-vêlage en BV

Depuis 2013, les éleveurs peuvent mesurer les tours de poitrine des veaux à la naissance en supplément ou comme alternative à la pesée des veaux, jugée par certains trop contraignante. Dans l'attente de disposer de suffisamment de veaux avec ces 2 phénotypes, cette mesure n'était jusque-là valorisée qu'indirectement pour les veaux sans poids via des conversions raciales des tours de poitrine en poids de naissance. L'évolution de modèle a été de mettre en place une évaluation tri-caractère « conditions de naissance - poids de naissance - tour de poitrine » (CN-PN-TP), valorisant ces trois phénotypes.

Pour ce faire, le développement s'est déroulé en plusieurs étapes :

- la sélection de la population d'étude et calcul des paramètres génétiques ;
- la modification des chaînes d'évaluation et réalisation de tests ;
- comparaison avec l'ancien modèle ;
- l'approbation des résultats par les OS.

3.1.2. Intégration de groupes génétiques dans les modèles d'évaluation en BV

Dans les évaluations génétiques laitières, sont pris en compte des groupes de parents inconnus (GPI), qui permettent d'affecter à des individus, dont tout ou partie de l'ascendance est inconnue, une valeur génétique moyenne tenant compte des effets de la sélection. Les modèles d'analyse en bovins allaitants n'incluaient pas jusque-là de GPI. L'utilisation d'un seul et unique logiciel entre filières a offert l'opportunité aux races allaitantes d'intégrer cette évolution méthodologique pour améliorer la qualité des valeurs génétiques. L'incorporation des GPI dans les chaînes d'indexation a été réalisée en plusieurs phases :

- la détermination des GPI par les OS ;
- l'intégration et le test des effets des GPI dans les chaînes d'évaluation ;
- comparaison avec l'ancien modèle ;
- la mise à disposition des résultats aux OS et validation.

3.1.3. Amélioration de l'évaluation du potentiel de croissance et de l'aptitude à l'allaitement en BV

Une refonte complète du calcul des Poids à Age-Type (PAT) jusqu'au sevrage et de leur sélection pour l'évaluation a précédé le travail d'optimisation de leur prise en compte dans l'évaluation du potentiel de croissance au sevrage (CRsev) et de l'aptitude maternelle à l'allaitement (ALait). Les adaptations de modèles ont été réalisées en plusieurs étapes :

- nouvelles modalités de calcul des PAT et détermination d'un niveau de fiabilité pour chacun d'eux permettant à chaque OS de choisir lesquels sont pertinents pour l'indexation ;
- proposition en matière d'exploitation génétique des PAT dans l'évaluation de CRsev *et al*ait ;
- adaptation des chaînes d'évaluation et réalisation de test ;
- mise à disposition des résultats et validation par les OS.

3.1.4. Etude de la mise en place d'une évaluation combinée en Single-Step en BL

Dans les évaluations polygéniques, il existe une évaluation qui combine plusieurs évaluations fondées sur des modèles d'analyse de phénotypes différents. Elle permet de bénéficier sur un caractère donné souvent peu héritable ou collecté tardivement dans la vie de l'animal, d'une prédiction de la valeur génétique de l'animal à l'aide de caractères corrélés, même si cet animal n'a pas de performance pour le caractère concerné. Cette évaluation augmente ainsi la fiabilité de la valeur génétique estimée. L'objectif est d'adapter cette évaluation dite combinée à la méthodologie Single-Step. Le prototype de la méthode Single-Step « combinée » a été fait sur huit caractères de morphologie issus d'un même modèle. Puis, il a été testé sur un groupe de caractères complexes et issus de différents modèles. Le choix s'est porté sur la longévité fonctionnelle en Montbéliarde avec cinq autres caractères corrélés (fertilité vache, fertilité génisse, cellules somatiques, mammites cliniques et le développement de la mamelle). Pour valider la méthode et en mesurer l'intérêt, deux comparaisons ont été réalisées :

- les résultats de l'évaluation Single-Step combinée, à partir des données disponibles en 2021 comparés à ceux d'une évaluation Single-Step combinée sur des données anciennes de 2016 (retrait des typages des animaux nés après 2016 et des performances mesurées à partir de 2016) (Maugan *et al.*, 2023) ;
- les résultats de l'évaluation Single-Step combinée 2021 comparés à une évaluation Single-Step unicaractère.

3.2. Résultats obtenus

3.2.1. Amélioration de l'évaluation naissance-vêlage en BV

Les héritabilités (h^2) pour les caractères de poids de naissance direct (PN_d) ou maternel (PN_m), condition de naissance direct (CN_d) et maternel (CN_m) sont similaires entre l'évaluation sans prise en compte du tour de poitrine (Figure 1a) et celle avec prise en compte du tour de poitrine (Figure 1b). Les h^2 du tour de poitrine direct (TP_d) et maternel (TP_m) sont élevées et similaires aux h^2 du PN. En moyenne, l'h^2 est égale à 0,35 pour les effets directs et 0,10 pour les effets maternels.

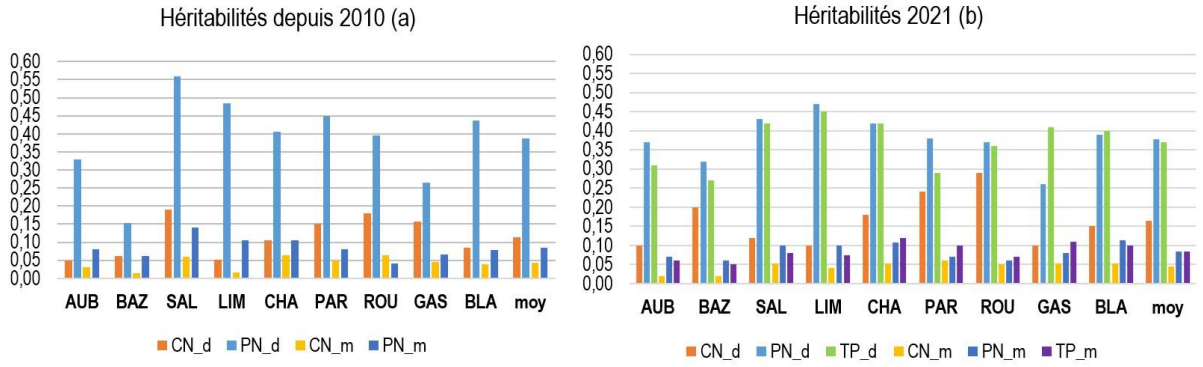


Figure 1 : Héritabilités des caractères de l'évaluation naissance-vêlage sans prise en compte du tour de poitrine en 2010 (a) et avec prise en compte du tour de poitrine en 2021 (b)

AUB: Aubrac ; BAZ : Bazadaise ; SAL : Salers ; LIM : Limousine ; CHA: Charolaise ; PAR: Parthenaise ; ROU: Rouge des Prés ; GAS: Gasconne des Pyrénées ; BLA : Blonde d'Aquitaine ; moy=moyenne, CN_d et CN_m: condition de naissance direct et maternel ; PN_d et PN_m : poids de naissance direct et maternel ; TP_d ou TP_m : tour de poitrine direct et maternel

Les corrélations génétiques entre caractères ont un niveau similaire entre les deux évaluations.

Les corrélations entre les index des évaluations (a) et (b) sont très fortes, entre 0.85 et 0.98 selon la race et l'index. Il y a donc une bonne cohérence entre les évaluations (a) et (b), mais l'ajout du TP permet bien des évolutions dans l'estimation des index.

Les organismes de sélection ont validé cette évolution et ont pu construire leurs index de synthèse IFNAIS (index de facilité de naissance) et VELAGE (vêlage) en intégrant le nouvel index élémentaire tour de poitrine selon les proportions de leur choix.

3.2.2. Intégration de groupes génétiques dans les modèles d'évaluation en Bovins Viande

Les groupes de parents inconnus ont été constitués en étroite concertation avec les OS et selon des modalités distinctes en fonction de l'histoire des races, des effectifs et de la profondeur de données des différentes évaluations. Les OS ont pu apprécier l'impact de l'inclusion des GPI, toutes choses égales par ailleurs, par exemple dans les résultats de l'évaluation de la morphologie au sevrage, comme illustré ci-après pour le développement musculaire (Figure 2).

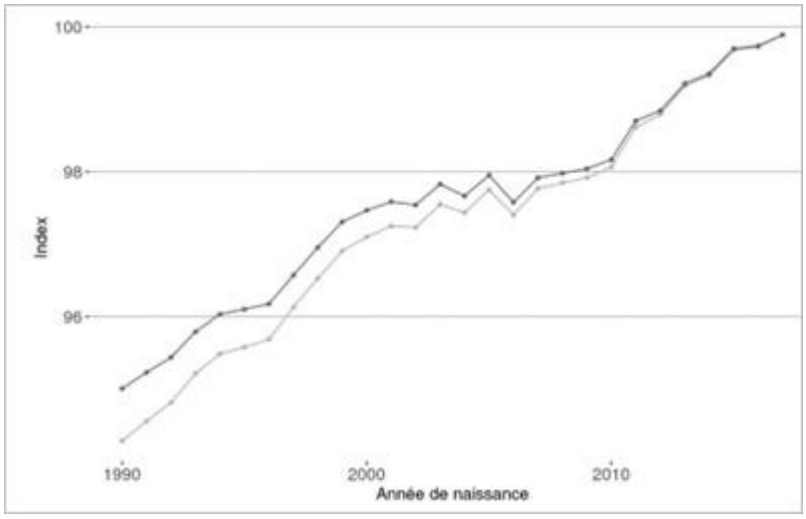


Figure 2 : Evolution comparée de l'index développement musculaire par année de naissance des mâles nés depuis 1990, entre le traitement polygénique sans prise en compte des GPI (gris foncé) et avec prise en compte des GPI (gris clair) pour la race Rouge des Prés.

Globalement, pour toutes les races, le progrès génétique est augmenté avec l'ajout des groupes de parents inconnus, qui remplissent donc bien leur rôle de prise en compte du niveau génétique moyen des individus dont les parents ne sont pas connus. Les mâles les plus vieux sont estimés moins bons qu'auparavant. Le niveau de la cohorte la plus récente est au même niveau génétique.

3.2.3. Amélioration de l'évaluation potentiel de croissance et de l'aptitude à l'allaitement en BV

La mise en place d'un véritable modèle bi-caractère complet avec effets directs et maternels des PAT à 120 jours et 210 jours, alors que jusque-là un seul PAT était valorisé, a conduit à la production de quatre index, au lieu de 2 auparavant.

Les OS ont ensuite choisi la manière dont ils souhaitaient combiner ou non ces différents index élémentaires pour construire les index CRsev *et al*ait, puis ont validé les résultats de ces changements (Tableau 2).

Tableau 2 : Choix de construction des index potentiel de croissance jusqu'au sevrage (CRsev) et d'aptitude à l'allaitement (ALait) par chacun des OS à partir des 4 index élémentaires calculés. PAT : poids à âge-type.

Race / Index	CRsev (effets directs)		ALait (effets maternels)	
	PAT 120 jours	PAT 210 jours	PAT 120 jours	PAT 210 jours
Aubrac		100%	100%	
Bazadaise		100%	100%	
Blonde d'Aquitaine	30%	70%	70%	30%
Gasconne des Pyrénées		100%	100%	
Limousine	30%	70%	70%	30%
Parthenaise	20%	80%	80%	20%
Rouge des Prés		100%	100%	
Salers		100%		100%

3.2.4. Etude de la mise en place d'une évaluation combinée en Single-Step en Bovins Lait

A partir du test sur les caractères de morphologie en race Montbéliarde, la stratégie choisie pour mettre en place une évaluation Single-Step combinée a été de :

- réaliser une évaluation Single-Step unicaractère sur chacun des six caractères (longévité, cellules, mammites, développement de la mamelle, fertilité vache et fertilité génisse) ;
- réaliser dans un second temps une évaluation multi-caractères utilisant comme performances d'entrée les performances corrigées issues de la première évaluation.

La comparaison des index de longévité entre l'évaluation Single-Step combinée complète de 2021 (avec performances) et celle de 2016 (sans performance) a montré des corrélations satisfaisantes, de 0.80 à 0.87 selon les années de naissance pour les animaux non génotypés.

Les résultats de l'évaluation Single-Step combinée de 2021 ont été ensuite comparés aux évaluations Single-Step uni-caractères, par type de population (femelles génotypées ou non, mâles génotypés ou non). Les corrélations entre index combinés et uni-caractères ne sont pas égales à 1, mais relativement proches pour les cellules, le développement de la mamelle et la fertilité vache et génisse. Pour les caractères les moins héritables (longévité et mammites cliniques) les corrélations sont en-dessous de 0.80 pour les femelles non génotypées (Maugan *et al*., 2023), alors que pour les animaux génotypés elles sont supérieures à 0.90. Cela suggère que l'inclusion de phénotypes corrélés autres que le caractère évalué a un impact important sur l'estimation de la valeur génétique pour les caractères faiblement héritables, notamment pour les femelles non génotypées (c'est-à-dire les animaux avec le moins d'informations disponibles dans l'évaluation, et donc qui bénéficient le plus de l'ajout d'une information complémentaire). En complément, des courbes de survie, qui mettent en relation la probabilité de survie d'une femelle et son nombre de jours de vie productive, ont été calculées pour

réaliser un classement des femelles selon l'évaluation Single-Step (combinée ou uni-caractère). Que les génisses soient génotypées ou non, l'écart entre les classes est plus prononcé avec le Single-Step combiné qu'en uni-caractère. La méthode combinée discrimine donc mieux les individus entre eux par leurs valeurs génétiques estimées (Figure 3).

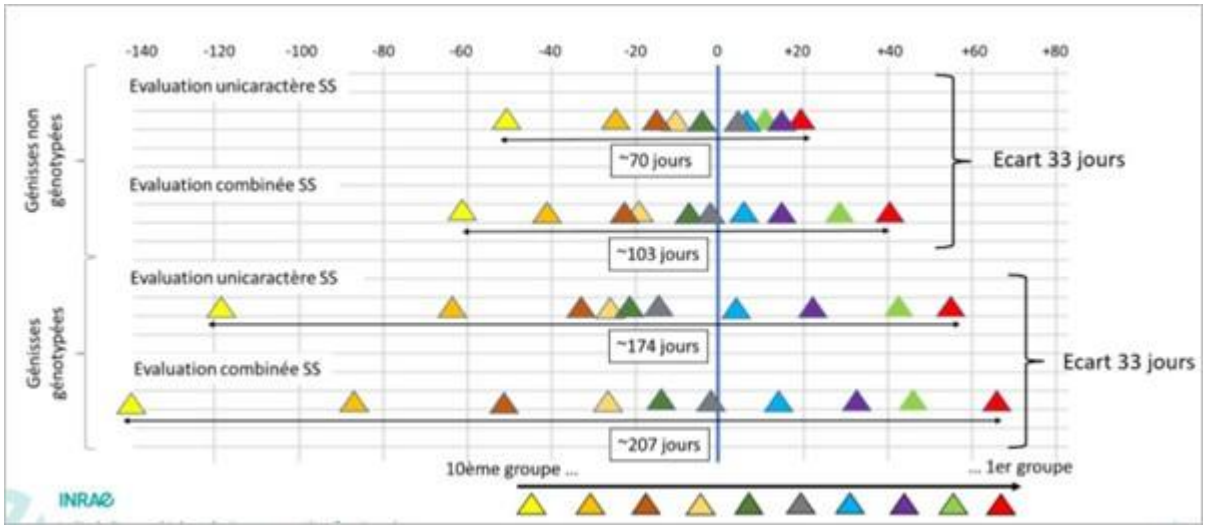


Figure 3 : Comparaison de l'espérance de vie des femelles montbéliardes en fonction de leurs niveaux génétiques estimés à leur naissance.

Les résultats de l'étude ont été discutés avec les OS et ES. Ils reconnaissent l'intérêt de cette méthode ; néanmoins, plusieurs étapes sont encore à finaliser avant que cette évolution puisse être mise en place (détermination des prédicteurs pour chaque race, développement de la chaîne de calcul, tests sur l'ensemble des races, etc.).

4. Etude et mesure de l'impact du changement de méthode d'évaluation

4.1. Méthode de travail

4.1.1. Etapes de mise en place

Les expériences précédentes en termes de changement de méthode d'évaluation majeur ont montré que la mise en œuvre était une étape délicate et parfois mal vécue par les acteurs du dispositif génétique. Le projet UniGéno a fait le choix de rassembler la recherche, les organismes techniques et de services et les utilisateurs pour suivre l'ensemble des étapes de validation et permettre une bonne appropriation des résultats avant un déploiement final.

Le développement de la méthode s'est conduit en deux phases pour les deux filières. Une phase de test et une phase de transition. L'un des objectifs du projet était d'harmoniser les logiciels, les modèles et les chaînes d'évaluation entre les deux filières. Lors de la phase de Test, le développement des chaînes d'indexation par les équipes de GenEval a été réalisé en étroite collaboration avec les équipes de recherche : L'INRAE pour le développement du logiciel de calcul HSSGBLUP (Tribout *et al.*, 2020) et l'UMT eBis pour le module de calcul du facteur d'érosion, afin de prendre en compte l'éloignement des jeunes animaux à la population de référence et de mieux estimer leur valeur génétique (Boichard *et al.*,2022)Le développement des chaînes d'évaluation et la validation ont été découpés en plusieurs lots et ont suivi les étapes suivantes :

- la vérification fonctionnelle de la chaine d'indexation ;

- la vérification de la cohérence des résultats avec les résultats produits dans le projet ASAP pour la race et le caractère concernés s'il y a lieu ;
- la validation des index et coproduits (coefficients de détermination, effectifs) en interne, avec les équipes GenEval et Idele, avec les index de l'évaluation officielle ;
- la validation des résultats par les organismes et entreprises de sélection ;
- la présentation de la méthode utilisée et des résultats et réponses aux questions et propositions d'amélioration si besoin.

Les chaines d'indexation ont été développées dans un premier temps sur des caractères simples et des races déjà étudiées dans les projets précédents avant d'étendre le développement à d'autres races ou modèles.

La phase de test s'est achevée lorsque les organismes de sélection ont jugé que les résultats produits étaient satisfaisants et conformes à leurs attentes. Elle s'est terminée respectivement en octobre 2021 en bovins laitiers (BL), et en septembre 2023 pour les bovins allaitants (BV).

S'ensuivit la phase de transition ayant pour objectif de fournir des résultats Single-Step pour l'ensemble des races et caractères aux OS et ES en parallèle des évaluations officielles (méthode en 2 étapes) et ainsi appréhender le changement et les choix des reproducteurs avant le déploiement officiel du Single-Step. Cette période fut aussi l'occasion de former les techniciens aux changements et impacts du passage à l'indexation Single-Step.

Durant ces deux phases les résultats produits sont restés confidentiels. La phase de transition s'est terminée lorsque le déploiement de la méthode a été acté par les OS et ES.

4.1.2. Méthodes de mesure d'impact et validation

La qualité et la fiabilité des résultats produits ont été vérifiées à l'aide d'une étude de validation. Pour ce faire, il est constitué, pour un caractère donné, une population de validation à partir d'animaux avec une performance ou des filles à une année N et n'en disposant pas l'année N-x. Pour les bovins laitiers, elle est constituée des taureaux ayant des filles en 2021 et n'en ayant pas à l'année 2017 (Barbat M. *et al*., 2022). Pour les bovins allaitants, elle est constituée des animaux ayant des performances à l'année 2020 et ne disposant pas de performance à l'année 2018. Par cette approche, il est vérifié que les index prédits à partir des seules informations disponibles à l'année N-x, soit le pédigrée et le génotypage, sont cohérents avec les performances corrigées (DYD, pour « Daughter Yield Deviation ») et valeurs génétiques calculées à partir d'informations complètes à l'année N (performance propre de l'animal ou de ses descendants).

En complément, une comparaison des valeurs génétiques Single-Step à celles calculées avec la méthode en deux étapes a été réalisée.

Enfin, les OS et ES ont souhaité étudier le lien entre les valeurs génétiques Single-Step estimées à partir des pédigrées et génotypes et les performances futures des animaux. Ainsi, les valeurs génétiques produites une année N, sans prise en compte des performances de l'animal ou de ses descendants, ont été comparées à ses performances propres ou celles de ses descendants. Il a été comparé les index 2017 en BL et 2018 en BV avec les performances des animaux concernés enregistrées au SIG (système national d'information génétique) en 2019 – 2020.

4.2. Résultats obtenus

4.2.1. Etudes de validation

Les études de validation ont montré une bonne cohérence entre les index prédits (2017) et les index avec performance en BL (2021). L'inclusion du facteur d'érosion dans les évaluations Single-Step permet d'obtenir de meilleures pentes, quelle que soit la race, et ainsi réduire le biais de présélection.

Cette amélioration est particulièrement visible sur les caractères très sélectionnés comme la production laitière (Tableau 3). Les valeurs génétiques pour les caractères moins sélectionnés, comme les cellules ou les caractères de morphologie, sont peu biaisées et sont similaires avec ou sans prise en compte du facteur d'érosion.

Tableau 3 : Pentes de régression moyennes observées entre les DYD (performances corrigées) de 2021 et les valeurs génétiques de 2016 pour les caractères de production. NOR : Normande ; MON : Montbéliarde ; ABO : Abondance ; TAR : Tarentaise ; VOS : Vosgienne ; BSW : Brune ; SIM : Simmental ; HOL: Prim'Holstein.

	Production laitière (5 caractères)							
	NOR	MON	ABO	TAR	VOS	BSW	SIM	HOL
Sans facteur d'érosion	0.935	0.906	0.946	0.920	0.99	0.951	0.941	0.938
Avec facteur d'érosion	1.018	0.995	1.023	1.017	1.024	1.002	0.993	0.996

4.2.2. Cohérence entre la nouvelle et l'ancienne méthodologie

La validation des résultats par les utilisateurs a été réalisée sur les populations d'intérêt, soit les animaux connus avec performances qui ont une estimation de leur valeur génétique précise et les jeunes candidats (futurs reproducteurs mâles et femelles). Les corrélations des index entre les deux méthodologies en BL sont relativement élevées, autour de 0.95 pour les taureaux et de 0.90 pour les femelles, quel que soit le caractère et la race. En BV, les évolutions apportées par le projet ont été validées unitairement par les OS et ont impacté positivement les résultats. Les corrélations entre les index Single-Step des animaux publiés et leurs anciens index sont relativement bonnes, entre 0.95 et 0.99 selon le caractère pour les 3 races principales Charolaise, Limousine et Blonde d'Aquitaine, ce qui signifie que les animaux bien connus conservent des classements relativement similaires. Est aussi relevée en bovins laitiers l'augmentation de la variabilité des résultats par rapport à l'évaluation en deux étapes. Les valeurs génétiques de l'ensemble de la population sont plus dispersées. La sélection des animaux devient donc plus efficace, grâce à une meilleure discrimination des individus.

Par conséquent, le classement des meilleurs animaux (Top 100) est quelque peu remanié. En moyenne, 80 % des taureaux BL sont en commun entre les deux Top 100 ISU (Index de synthèse unique) pour les races nationales (Montbéliarde, Normande, Simmental, Tarine). Le reclassement est un peu plus important pour les races internationales (Prim'Holstein et Brune) où quelques pays seulement ont déployé le Single-Step.

La correction du biais est visible lorsqu'une comparaison du progrès génétique estimé est faite entre le Single-Step et les évaluations en deux étapes (traitement décembre 2021). L'écart de progrès génétique estimé est d'autant plus marqué sur les caractères très sélectionnés comme la production laitière et sur les grandes races nationales Normande et Montbéliarde (Tableau 4), ce qui montre bien l'ampleur du biais de présélection dans l'évaluation en deux étapes. Tant que l'ensemble des pays n'ont pas corrigé le biais de présélection dans leur évaluation nationale, l'impact du changement de méthodologie est moins visible pour les races internationales.

Tableau 4 : Gain de progrès génétique pour les animaux nés en 2019 ou 2016 au passage à l'évaluation Single-Step en bovins laitiers. NOR : Normande ; MON : Montbéliarde ; ABO : Abondance - *taureaux nés en 2016 ; TAR : Tarentaise ; BSW : Brune ; HOL : Prim'Holstein.

	Production laitière (kg) / cellules (pts)					
	NOR	MON	ABO	TAR	BSW	HOL
Mâles	555 / 0.63	560 / 0.39	94* / 0.06	3 / 0.05	41 / 0.09	147 / 0.16

Femelles	458 / 0.48	439 / 0.28	109 / 0.08	13 / 0.02	217 / 0.14	159 / 0.27

Pour les races BL et BV ne disposant pas encore d'évaluation génomique, l'étude de l'impact du passage au Single-Step a été réalisée sur les quatre races témoins. Elle a montré que la précision des évaluations augmente avec le nombre de typages inclus et qu'il est préconisé de génotyper les proches ascendants de la population d'intérêt (jeunes reproducteurs) pour augmenter la précision de l'estimation de leur valeur génétique. Pour les races disposant de peu de typages, le gain de précision est moindre et les corrélations avec l'évaluation polygénique sont en moyenne de 0.99, c'est-à-dire que peu de différences sont attendues. Le déploiement du Single-Step pour les races sans évaluation génomique n'est que bénéfique et les gains de précision se feront plus importants au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de typages au sein de chaque race.

4.2.3. Lien entre performances et index

L'étude appréciée des organismes de sélection met en avant les écarts de performances entre les animaux estimés comme étant les meilleurs et les moins bons sur un caractère donné. Les animaux sont regroupés par classe d'index Single-Step, la moyenne des performances des individus de chaque classe est calculée. Globalement, pour les caractères héritables et où l'index correspondait bien à la performance (sans transformation importante de cette dernière pour l'évaluation), les différences entre classes d'index correspondent à des différences sensibles de performances. Pour les caractères fonctionnels en BL, plus influencés par le milieu, le lien entre performance index existe mais est moins distinct entre classes.

Pour la Normande, l'écart entre les index production laitière des meilleures et des moins bonnes génisses est de 1600 kg de lait. Lorsque ces mêmes femelles entrent en production, il est constaté un écart de performances de 1590 kg de lait produit. En bovins allaitants, il est notamment observé la relation entre l'index effet maternel des mères avec les performances de leurs veaux. En race charolaise, l'écart observé entre les deux classes extrêmes est estimé à 10,5 kg pour le poids à 120 jours pour les veaux issus des mères avec un index supérieur à 110 versus ceux issus des mères avec un index inférieur à 95.

Globalement et pour les deux filières, les index Single-Step des animaux sans performance prédisent correctement les performances futures de ces mêmes individus ou de leurs descendants et permettent une bonne discrimination des individus entre eux. Cette étude conforte la confiance dans les résultats déjà produits sur la précision et la fiabilité de cette nouvelle méthodologie.

5. Dissémination et communication

La mise en place de la nouvelle méthode d'indexation Single-Step a un impact notable pour les acteurs du dispositif génétique français. Pour faciliter l'appropriation des évolutions par l'ensemble des utilisateurs, du technicien à l'éleveur en passant par les apprenants, l'avancement des résultats leur a été partagé dès le début du projet.

5.1. De la recherche aux utilisateurs

Dès le commencement du projet, quatre représentants des OS et ES appartenant chacun à une fédération (Eliance ou Races de France) ont été impliqués pour suivre régulièrement l'avancement du projet et faire remonter les questions ou suggestions de l'ensemble des organismes lors des réunions d'échange. A chaque nouveau lot d'évaluations, une communication sur les évolutions apportées leur a été transmise (une trentaine par filière) pour leur permettre de s'approprier les résultats et comprendre les variations observées.

Lors de la phase de transition, les organismes de sélection ont participé à la construction des formations à destination des techniciens avec l'équipe projet et l'UMT eBIS. Une formation pilote a été

réalisée pour chaque filière en 2021 (BL) et en 2023 (BV), puis enrichie des retours avant une dissémination. Ainsi, 11 organismes et 250 apprenants de la filière laitière ont pu bénéficier d'une formation au Single-Step avant le déploiement officiel des nouvelles évaluations en mars 2022.

Enfin, autour du déploiement officiel, et pour chaque filière, une présentation des évolutions et impacts du passage au Single-Step a été co-construite avec les OS et ES pour informer un public plus large, notamment lors des salons professionnels (SPACE et Sommet de l'Elevage). Ces présentations ont été réalisées avec les professionnels en 2022 pour la filière laitière et à l'automne 2024 pour la filière allaitante.

Le déploiement du Single-Step en bovins laitiers fut aussi accompagné de 10 notes techniques pour expliquer les évolutions et les impacts du passage au Single-Step. Ces notes sont accessibles par tous sur le site de l'Idele à l'adresse www.idele.fr/unigeno. En bovins allaitants, le Single-Step sera déployé en 2025 à grand échelle pour au moins sept races et la plupart des évaluations.

5.2. Former dès les bancs de l'école

L'amélioration génétique des ruminants est un domaine scientifique pointu et en perpétuelle évolution. Dans l'enseignement supérieur agricole, il ne représente parfois que quelques heures d'enseignement. Pour susciter l'intérêt des jeunes à la génétique et étayer les présentations scolaires, des groupes d'apprenants de formation BTSA du lycée agricole de l'EPLEFPA de Limoges ont élaboré un kit pédagogique à destination de l'ensemble des lycées agricoles et accessible à tous en ligne. Ce kit reprend les principes de l'évaluation génétique, explique le passage au Single-Step et ses avantages (motion design) et témoigne de l'expérience de deux éleveurs utilisant au quotidien les index génomiques. Ce kit ludique, construit par les étudiants et à destination des étudiants et des enseignants, est disponible en ligne à la page du projet www.idele.fr/unigeno.

6. Conclusion et discussion

Le projet UniGéno a implémenté une nouvelle méthode d'indexation à grande échelle dans toutes les races et pour tous les caractères dans les deux filières. Ce projet d'ampleur pour le dispositif génétique français était attendu autant sur les résultats de l'évaluation Single-Step que sur le plan organisationnel.

La précision des résultats produits par les évaluations Single-Step en bovins laitiers est généralement au moins aussi bonne que celle obtenue en évaluation génomique en deux étapes. Les comparaisons du progrès génétique entre les deux méthodes et les études de validation confirment, à l'aide du facteur d'érosion, la correction du biais de présélection des jeunes animaux. En bovins allaitants, le développement du Single-Step permet à l'ensemble des races d'accéder aux évaluations génomiques, jusqu'alors disponibles uniquement pour trois races et deux évaluations et de prévenir d'un éventuel biais non encore visible à ce jour. Ce changement intègre aussi des évolutions de modèles pour favoriser le maintien voire l'élargissement des bases de sélection. La mutualisation de l'ensemble des informations disponibles, pédigrées, performances et génotypages, est particulièrement intéressante dans cette filière où le nombre de génotypages reste modeste.

Les évaluations Single-Step sont plus complètes et plus fiables. A ce jour, les OS et ES des deux filières font le choix de passer officiellement au Single-Step pour la majorité des indexations pour 10 races laitières et 7 races allaitantes.

Cependant, pour que l'implémentation de cette méthode soit optimale, il est fondamental, en plus de l'intérêt scientifique, que les professionnels en comprennent les principes et fonctionnement et puissent porter cette évolution. Les utilisateurs finaux, par l'implication des partenaires professionnels dès le début des développements et lors de la communication des résultats, acceptent avec plus de satisfaction ce changement majeur. Les études menées en complément du projet montrent que le

passage au Single-Step a des conséquences sur la sélection des futurs reproducteurs. Les meilleurs animaux, quelle que soit la méthode, restent les meilleurs. Néanmoins, des reclassements entre individus sont visibles, mais ils sont principalement dus à une meilleure prise en compte de l'éloignement des animaux à la population de référence servant à l'estimation des valeurs génétiques. L'étendue des valeurs génétiques permises par le Single-Step permet aux OS et ES BL d'être plus précis dans leur sélection d'animaux. Enfin, les index des jeunes animaux sont en concordance avec les performances futures de ces mêmes individus. Cette dernière étude est un des outils indispensables pour l'appropriation du changement en élevage et est reprise dans les communications et formations des apprenants (éleveurs, techniciens, étudiants).

Cette évolution en bovins n'a été possible que par l'investissement et la collaboration de tous les acteurs du dispositif génétique français. La filière laitière a implémenté l'évaluation Single-Step en mars 2022. Cette nouvelle méthode sera prochainement déployée pour la filière allaitante. Elle favorisera le développement des évaluations génomiques pour les OS qui le souhaitent et améliorera la précision des valeurs génétiques au fur et à mesure de l'augmentation du nombre d'animaux génotypés. Elle permettra également de mettre en place plus rapidement l'évaluation génomique pour de nouveaux caractères.

La France a été un des premiers pays à sauter le pas. Prochainement, d'autres pays devraient implémenter le Single-Step dans tout ou partie de leurs évaluations. Ces évolutions à l'international impacteront plus ou moins fortement, selon les caractères et le pays, les palmarès internationaux des races Prim'Holstein et Brune.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données utilisées dans ce projet ne sont pas librement accessibles. Le logiciel développé et modules de calcul sont la propriété de l'INRAE. Les chaines d'indexation développées dans le cadre du projet sont la propriété de GenEval.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.ORCIDs des auteurs

Iola Croué : 0000-0002-3926-0198

Contributions des auteurs

Tous les auteurs et autrices ont lu et approuvé le manuscrit final rédigé par Amandine Launay, Philippe Boulesteix, Stéphanie Minéry (Idele) et Marine Barbat (Geneval).

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient les collègues de l'UMT eBIS et de l'INRAE qui ont grandement contribué au développement des logiciels de calcul et aux validations des résultats. Ils remercient aussi les partenaires OS et ES pour leur engagement et investissement tout au long du projet. Cette évolution majeure au sein du dispositif génétique pour les deux filières bovines a été déployée grâce à la réalisation des projets ASAP et UniGéno, dont les auteurs remercient les financeurs : APIS-GENE et le CASDAR RT.

Déclaration de soutien financier

Le projet UniGéno a été financé par le ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté Alimentaire et de la Forêt (AAP CASDART RT 2019, appel à projet Recherche Technologique pour la compétitivité et la durabilité des filières de la production à la transformation 2019). L'étude des liens entre performance et index a bénéficié du soutien financier du compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rurale du ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté Alimentaire et de la Forêt.

Références bibliographiques

Barbat M., Croué I., Fritz S., *et al*. (2022), Du nouveau dans les évaluations génétiques bovines : mise en place du Single-Step, une 1 évaluation génétique et génomique en une seule étape, Renc. Rech. Ruminants, 26, Paris, France. 179–182 .

Boichard D., Fritz S., Croiseau P., *et al*. (2022). Long-distance associations generate erosion of genomic breeding values of candidates for selection. *12th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*, Jul 2022, Rotterdam, Netherlands. ⟨hal-03731274⟩

Christensen O. F. et Lund M. S. (2010). Genomic prediction when some animals are not genotyped. GSE, 42, 2.

Maugan, LH., Rostellato, R., Tribout, *et al*. (2023). Combined single-step evaluation of functional longevity of dairy cows including correlated traits. *Genet Sel Evol* 55, 75.

Misztal I., Legarra A. et Aguilar I. (2009). Computing procedures for genetic evaluation including phenotypic, full pedigree, and genomic information J. Dairy Sci. 92, 4648–4655.

Patry C., Ducrocq V., (2011). Evidence of biases in genetic evaluations due to genomic pre-selection in dairy cattle. J. Dairy Sci. 94:1011-1020.

Tribout, T., Ducrocq, V., Boichard, D., 2020. HSSGBLUP: a Single-Step SNP BLUP genomic evaluation software adapted to large livestock populations. Proc. of the 6th ICQG.

Pour citer cet article : Amandine Launay, Philippe Boulesteix, Marine Barbat, Emeric Dugas, Romain Fougerollas, *et al*.. UniGéno : vers une évaluation génomique unifiée et en une seule étape. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.288-300. 10.17180/ciag-2025-vol107-art21

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Pic'Let : Développement d'un outil de phénotypage du niveau de maturité du porcelet par intelligence artificielle

Juliette MAGADRAY[1], Romain SAINTILAN[1], Pauline BRENAUT[1]

[1] IFIP Institut du porc, 9 boulevard du Trieux, 35740 Pacé, France

Correspondance : juliette.magadray@ifip.asso.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art22

Résumé

L'augmentation de la taille des portées en élevage porcin s'est accompagnée d'une augmentation de l'hétérogénéité des porcelets. Les porcelets immatures, c'est-à-dire nés avec un retard de croissance intra-utérin, sont plus vulnérables à l'hypothermie et ont plus de risque de mourir de faim ou d'écrasement. L'objectif du projet Pic'Let était de développer un outil de phénotypage de la maturité du porcelet sans biais et qui s'intègre facilement aux routines d'élevage. Pour cela, un support de phénotypage permettant de prendre des photos de la tête (de face et de profil) des porcelets a été conçu et testé durant des chantiers de pesée de naissance. Les premiers prototypes ont permis de photographier 9 620 porcelets de trois niveaux de maturité. Deux algorithmes de classification ont été entrainés sur 1 509 photos prises de face et de profil. La maturité des porcelets a été déduite des prédictions des deux algorithmes. L'algorithme a été appliqué dans un nouvel élevage et a donné un taux de classification correct dans 76 % des cas. Les paramètres génétiques des caractères en question ont été calculés à partir des phénotypes récoltés. L'héritabilité de la proportion de porcelets immatures dans la portée a été estimée en race Landrace à 0,25 (± 0,11) et en race Large White à 0,13 (± 0,07). Ces résultats semblent indiquer qu'une sélection sur le caractère d'immaturité avec une acquisition automatique est possible par le développement de la collecte de données.

Mots-clés : Apprentissage profond, imagerie, classification, sélection, survie, maturité néonatale

Abstract: Designing a piglet maturity phenotyping tool based on artificial intelligence

The improvement made on sow prolificity led to a rise in litter heterogeneity. Immature piglets are born with a delay in intra-uterine growth which makes them more susceptible to death by hypothermia, starving or crushing. The Pic'Let study aimed at developing an unbiased maturity phenotyping tool that can be implemented easily in the routine procedure of the breeder. To that end, a phenotyping stand taking pictures of the head (front and side) of the piglet was made and tested during birth weighing. With these prototypes 9,620 piglets representing three maturity levels were photographed. Two algorithms were trained based on 1 509 pictures of the front and side. The piglet maturity level was deduced from the results of both models. When tested on a set of pictures from a new farm, the right level was found in 76 % of the cases. From all the phenotypes collected, the heritability of the litter proportion of immatures piglets was estimated in Landrace (0,25 ± 0,11) and Large White (0,13 ± 0,07). These results could lead to genetic selection based on an automatically acquired trait. However, more data needs to be collected.

Keywords: Deep Learning, imaging, classification, selection, survival, neonatal maturity

1. Introduction

Aujourd'hui, les élevages de porcs cherchent à limiter les pertes de porcelets durant la lactation. D'importants progrès ont été faits sur la prolificité des lignées femelles (Large White et Landrace Français). Les progrès faits sur les tailles de portée se sont accompagnés d'une augmentation de la

mortalité des porcelets durant l'allaitement (Canario *et al*., 2007a ; Silalahi *et al*., 2017). Cela mène aussi à une réduction des performances de croissance (Hansen *et al*., 2018 ; Herpin *et al*., 1998 ; Ruggeri *et al*., 2024). Ces tendances posent question aussi bien au niveau économique, qu'au niveau sociétal avec les problèmes de bien-être animal. La mortalité observée est liée à l'augmentation de l'hétérogénéité des porcelets en poids et vitalité déséquilibrant le groupe et augmentant la compétition pour l'accès aux tétines. Les porcelets les plus forts prennent le dessus sur les plus faibles (Canario *et al*., 2007b). Les porcelets les plus faibles sont ceux qui ont subi un retard de croissance intra-utérin (RCIU). Ils représentent une partie des porcelets de moins d'un kilo. Un porcelet léger mature présente uniquement un écart de poids par rapport au poids attendu à la naissance et a des comportements normaux, contrairement aux porcelets RCIU. Ces derniers sont solitaires, avec une vitalité moindre (Farmer *et al* 2020), du mal à se nourrir (Chevaux *et al*. 2010 ; Amdi *et al*., 2013) et à se réchauffer (Herpin *et al*., 1995). Ces troubles de comportements expliquent leur plus important taux de mortalité (Mainau *et al*. 2015 ; Matheson *et al*. 2016 ; Baxter *et al*., 2008). Le retard de croissance de ces animaux est dû à l'importance de l'encombrement de l'utérus durant la gestation. S'il est trop important, l'afflux de sang et de nutriments est altéré et devient insuffisant pour le fœtus (Swanson *et al*., 2015 ; Town *et al*., 2005). Le développement fœtal de certains porcelets est retardé par rapport au reste de la portée (Bauer *et al*., 1998). Ce même phénomène conduit à de la mortalité fœtale tardive (i.e. les porcelets momifiés). Morphologiquement, les porcelets RCIU ont un front bombé, des yeux exorbités et une asymétrie tête/corps (Sacy *et al*., 2010), leur caractérisation peut donc se faire à l'œil nu.

Il a été montré, à partir de phénotypes annotés visuellement, que la proportion de porcelets immatures par portée a une héritabilité moyenne de 0,19 ± 0,05 (Matheson *et al*. 2018). A l'heure actuelle, il n'existe pas encore d'outil permettant de caractériser la maturité des porcelets à grande échelle. L'acquisition de phénotypes par la prise de mensurations manuelles et les calculs de ratios sur l'ensemble des porcelets ont l'avantage d'être potentiellement très répétables mais très chronophages pour être effectués en routine en élevage. La maturité du porcelet est évaluée durant les 24 premières heures de vie. Or, en élevage de sélection, les porcelets sont pesés durant ce même laps de temps. Il semblerait possible d'intégrer la mesure de la maturité aux pesées de routine, afin d'éviter de multiplier les manipulations chronophages, sources de stress pour les porcelets et la truie. La prise de mensurations n'étant pas adaptée aussi bien en termes de temps que de stress pour l'animal, il apparaît possible de se baser sur une notation de l'allure de la tête du porcelet (Hales *et al*., 2013). Il a été montré que la caractérisation de la maturité de développement était possible via l'utilisation d'images (Antoine *et al*., 2017). Si cette mesure était faite de manière systématique, il faudrait alors utiliser un outil automatisé pour analyser ces données. L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée en élevage. Son utilisation dans le domaine est de plus en plus importante du fait de la précision qu'elle permet d'apporter à des appréciations plus subjectives telles que les notes de morphologie et elle semble permettre d'effectuer des tâches simples avec de très bonne répétabilité une fois correctement entrainée. Le projet Pic'Let, rassemblant l'Ifip, Neotec-Vision, l'INRAE ainsi que les membres d'Alliance R&D (Axiom, Nucleus et Choice), avait pour but de créer un outil de phénotypage qui, à partir des photos de la tête des porcelets, qualifie leur niveau de maturité à l'aide d'un algorithme d'analyse d'images.

Cet article présente la méthodologie ayant permis de mettre au point le dispositif de photographie et l'algorithme d'analyse d'image en vue de caractériser la maturité des porcelets. Les performances de l'algorithme de classification des porcelets selon le niveau de maturité seront abordées dans un second temps. Enfin, des estimations de paramètres génétiques ont été réalisées pour les phénotypes obtenus avec l'outil d'intelligence artificielle.

2. Matériel et méthodes

2.1. Conception de l'outil

L'appareil de phénotypage en développement a été imaginé pour être déployable dans des élevages de sélection. A ces fins, l'outil doit être facile à prendre en main, à utiliser et ne doit pas ajouter de temps ou de contrainte dans la routine de l'éleveur. Il doit aussi être adapté aux conditions d'élevages, particulièrement rudes pour les composants électroniques. Pour faciliter la prise d'images et avoir de meilleurs résultats par l'utilisation d'un algorithme de classification d'images, il a été décidé de le concevoir avec un support de contention du porcelet avec pour but de réduire l'agitation des animaux et donc de limiter le nombre de photos floues. La prise de photo (angle, luminosité) est pensée pour être la plus standardisée indépendamment de l'opérateur. Un logiciel accompagnant le dispositif a été développé pour réaliser l'enregistrement des images prises par les deux caméras et l'étiquetage automatique de celles-ci avec le numéro national du porcelet.

Une première maquette tenant compte de ces différentes contraintes a été développée (Figure 1). Cette maquette est composée d'un support assez étroit pour tenir sur la balance des éleveurs. Ainsi, la maturité et le poids du porcelet sont mesurés simultanément. Le déclenchement des photographies est fait lorsque le poids se stabilise. La maquette a été conçue par la firme Neotec-Vision et l'Ifip, et améliorée itérativement après chaque session de test. Le premier test s'est déroulé sur une bande de 24 truies à la station expérimentale de l'Ifip (Romillé).

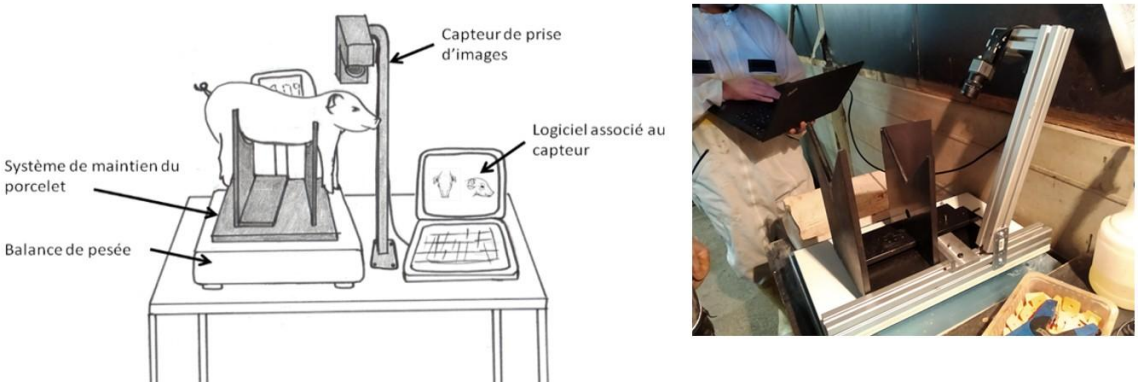


Figure 1 : Schéma du concept (à gauche) et maquette de la première version de l'outil de phénotypage (à droite) - ©Ifip



Figure 2 : Prototype final de l'outil de phénotypage de côté (à gauche), de face (au milieu) et la maquette 3D de concept (à droite) - ©Ifip

À la suite des tests conduits à Romillé, différentes modifications ont été apportées. Une mentonnière a été ajoutée pour maintenir la tête des porcelets dans le même axe que le corps durant la prise des mesures. Des prototypes industriels ont ensuite été construits par Neotec-Vision afin d'être robustes, efficaces, faciles à nettoyer et à désinfecter entre deux sessions de pesées à l'élevage (Figure 2).

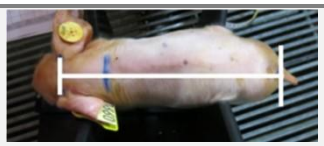
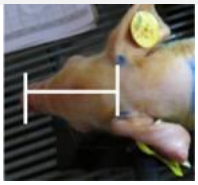
Le test en élevage de sélection des dispositifs a été l'occasion de vérifier que ces derniers s'intégraient bien dans la routine des éleveurs notamment en termes d'efficacité du travail. Pour quantifier ces impacts, les soins de 261 porcelets ont été chronométrés dans deux élevages procédant aux soins et pesées avec ou sans usage de l'outil de phénotypage.

2.2. Animaux et chantiers de mesures

L'acquisition des images a été réalisée en deux phases. Durant la première phase, l'acquisition était réalisée par une seule opératrice avec un dispositif en développement. La qualité des photos des porcelets a évolué en même temps que le dispositif. Dans l'échantillonnage des portées à phénotyper, celles présentant des porcelets immatures ont été ciblées. Pour avoir des photos d'un maximum de ces porcelets par rapport au normaux, certaines portées n'ont pas été phénotypées dans leur totalité. L'acquisition a été faite dans deux élevages de sélection de deux partenaires d'Alliance R&D avec des lignées pures Large White (LW) et Landrace Français (LR). Une partie des porcelets était des animaux de race pure tandis qu'une autre partie des porcelets était des croisés LW x LR. Durant la deuxième phase de collecte, deux maquettes de dispositifs ont été fournies aux deux élevages précédents afin de faire des acquisitions en routine supplémentaires. L'utilisation en routine apporte d'une part une certaine variabilité dans la qualité de photos et d'autre part de l'exhaustivité puisque tous les porcelets sont traités. Un troisième dispositif fourni à un nouvel élevage a permis d'acquérir un jeu de données déconnecté des autres. Ce dernier jeu de données d'images a permis de tester la performance et la fiabilité de l'algorithme de prédiction de la maturité quand il est déployé sur un nouvel élevage.

Les photos étaient prises au moment de la pesée de naissance c'est-à-dire dans les 24 premières heures de vie du porcelet. La base de données finale contient les phénotypes de 9 620 porcelets dont 1 796 porcelets LR, 6 438 LW et 1 386 croisés venant de six élevages. Parmi ces derniers, 3 795 porcelets proviennent de la première phase dont le but était de calibrer l'algorithme.

Tableau 1 : Description des mesures morphologiques réalisées avec un mètre de couture

Mesures (nom abrégé)	Exemple	Description
Longueur du corps (Lcorps)		La longueur du corps est mesurée entre la base des oreilles jusqu'à la base de la queue.
Longueur de la tête (Ltete)		La longueur de la tête a pour départ la base du crâne jusqu'au bout du groin. La longueur de la tête comprend la forme de la tête puisque le mètre de couture utilisé est souple et permet de bien suivre la forme du crâne.
Distance entre les yeux (Dyeux)		Une distance entre les paupières est mesurée. La forme bombée de la tête est également prise en compte dans cette mesure.

Circonférence (Circ)		Cette circonférence se réalise juste après les pattes avant.
Longueur du fémur (Lfemur)		La longueur du fémur est mesurée entre les deux repères en bleu identifiés sur la photo.

En parallèle des prises de vues des porcelets, cinq mensurations (détaillées dans le tableau 1) ont été prises sur 1 315 porcelets de la première phase appartenant aux trois niveaux de maturité (cf infra). La prise de mesure s'est appuyée sur les protocoles de mesures effectuées pour le projet PORCINET mené par l'INRAE (ANR-09-GENM_005, 2013-2016).

2.3. Annotations des images

Les porcelets immatures ont une morphologie de tête particulière. Il est possible de caractériser le degré de maturité par la forme de la tête (Figure 3). Des études récentes proposent des grilles de classifications de la maturité sur quatre critères : la forme de la tête, les yeux, les plis de peau et les oreilles (Hales *et al*. 2013). Ici, les plis de peau à la commissure de la bouche n'était pas distinguable, ce critère a donc été exclu. Chaque critère est noté de 0 à 2 (0 = aucun défaut, 1 = défaut léger et 2 = sévère). La classe du porcelet est celle correspondante à la note majoritaire, c'est-à-dire que si deux critères ont une note correspondante à un défaut sévère, alors le porcelet a un RCIU sévère. Si les notes sont toutes différentes le porcelet est mis dans la classe d'immaturité légère. La forme de la tête est appréciée sur les photos de profil. Les porcelets immatures ont une tête bombée semblable à celle d'un dauphin. Plus la tête est bombée, plus l'angle entre le front et le groin est proche des 90°. A l'inverse, un angle obtus est propre à l'état de développement normal. Au niveau des yeux, un porcelet immature a des yeux exorbités. En vue du dessus, on observe une bosse de chaque côté de la tête identifiée par les tracés en blanc sur la Figure 3. Pour les oreilles, la distinction entre niveaux de maturité est faite par leur position sur le crâne. Plus les oreilles sont basses plus le porcelet est immature.

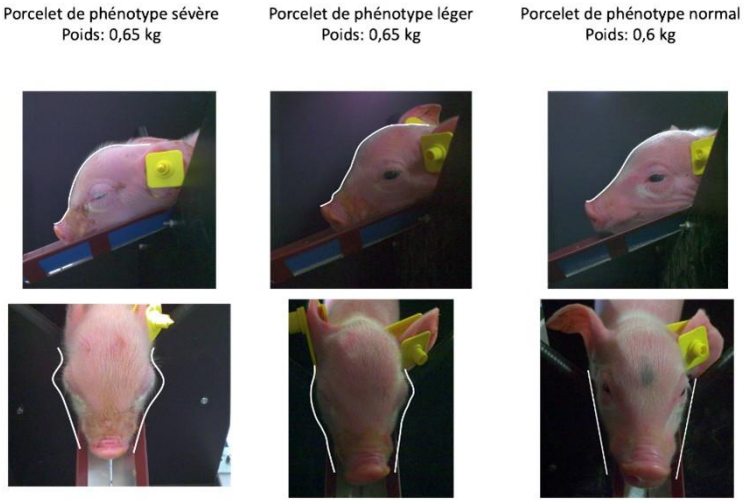


Figure 3 : Différences morphologiques entre les trois niveaux de maturité pour des porcelets à poids équivalents (©Ifip)

2.4. Entrainement et test du modèle de Deep Learning

Dans cette étude, c'est l'algorithme YOLOv2 (You Only Look Once de Redmon *et al*., 2016) qui a été utilisé. Il s'agit d'un modèle de détection d'objet qui identifie et localise avec un encadré les objets dans l'image. Ce modèle d'analyse d'image est dit en apprentissage supervisé. Un jeu de données annoté doit lui être fourni pour cette phase d'apprentissage. C*et al*gorithme est connu pour sa rapidité et sa précision. De plus, son fonctionnement est optimisé, ce qui lui permet d'atteindre une meilleure précision que d'autres algorithmes pour un même lot d'images d'entrainement. Dans cette étude, deux algorithmes s'occupant chacun d'une des prises de vues (face ou profil) des porcelets ont été créés et entrainés séparément. Les entrainements ont été lancés avec les paramètres par défaut c'est-à-dire 160 époques (itérations) avec une résolution d'images de 224x224 pixels puis 10 époques à une résolution plus élevée de 448x488 pixels. Dans le projet Pic'let, l'occurrence des cas d'immaturité sévère est faible, le jeu de données d'entrainement a été équilibré sur les 3 niveaux de maturité. Ainsi, le nombre d'images par niveau de maturité a été fixé à 503 (Tableau 2). Moins de 503 porcelets immatures ont été photographiés. La catégorie 'immatures' a été enrichie en photographiant les mêmes porcelets plusieurs fois. En fixant un nombre d'images identique par catégorie, on cherche à s'assurer que le modèle ne soit pas biaisé à la détection des phénotypes normaux notamment en se focalisant sur la taille de la tête. Les porcelets les plus lourds sont en majorité les plus développés ; ainsi les photos des porcelets matures ont été échantillonnées. Cela évite de biaiser le modèle dans le classement. Les proportions de chaque catégorie de poids ont été fixées pour les porcelets normaux développés (Tableau 3).

Tableau 2 : Nombre d'images de porcelets utilisées par classe de maturité pour les bases d'apprentissage et de test de l'algorithme

Classes	Normal	Léger	Sévère
Base d'entrainement	503 (1 photo par porcelet)	503 (1-2 photos par porcelet)	503 (2-3 photos par porcelet)
Base de test 1	753	56	12
Base de test 2	553	101	29

Tableau 3 : Nombre d'images de porcelets utilisées pour la classe normale selon le poids à la naissance

Poids	Base d'entrainement
<1kg	160
1kg-1,3kg	160
1,3kg-1,5kg	160
1,5kg-1,8kg	13
>1,8kg	10

Deux bases de tests ont été utilisées. Le premier test a été fait sur 821 porcelets nés dans de nouveaux élevages de même fond génétique que ceux de l'entrainement mais dont l'acquisition d'images a été faite en routine. Le second a été fait sur les 683 porcelets phénotypés dans un nouvel élevage d'un autre partenaire. La répartition de chaque phénotype dans les bases de tests est détaillée en Tableau 2.

2.5. Analyse génétique des caractères de maturité

La première phase de collecte de photos visait à entrainer un algorithme d'analyse d'images efficace et robuste dans la détection des porcelets RCIU. Le choix a été fait de cibler le phénotypage de ces individus en priorité. Certaines portées n'ayant pas eu un phénotype de maturité disponible pour tous les porcelets, les porcelets sans phénotype issus des portées mesurées partiellement sont considérés comme étant de phénotype normal. En complément de ces informations, la proportion de porcelets RCIU pour chaque portée a été calculée : Prop_RCIU = (nombre de porcelets de classe 'sévère' et 'léger') / (nombre de porcelet nés totaux). L'analyse s'appuie donc sur les phénotypes annotés manuellement de 336 portées de truies LR et 597 de truies LW. Quatre caractères de productivité numérique et pondérale ont été ajoutés : le poids moyen des porcelets à la naissance (MPN), le nombre de nés vivants (NVIV), la proportion de petits porcelets (PPP) et le nombre de porcelets sevrés, nés de la truie (SEVDE). Les deux races ont ensuite été analysées indépendamment.

Les paramètres génétiques ont été calculés pour l'ensemble de ces caractères en prenant en compte différents effets (Tableau 4). Pour les quatre caractères de prolificité déjà connus, les effets correspondent à ceux considérés dans les évaluations officielles. L'environnement permanent de la truie n'est pas pris en compte du fait que peu de truies ont eu plus d'une portée phénotypée dans le jeu de données. Pour la proportion de RCIU, seuls les effets significatifs pour expliquer le caractère avec un modèle linéaire mixte ont été conservés dans le modèle. Le pedigree utilisé pour l'analyse est constitué des animaux phénotypés et des ascendants sur 5 générations. Les paramètres génétiques ont été réalisés d'abord en analyse univariée à l'aide du logiciel ASREML 3.0 (Gilmour *et al*., 2009) puis en considérant des analyses bivariées pour estimer l'ensemble des covariances entre caractères à l'aide du logiciel vce6 (Groeneveld *et al*., 2010).

Tableau 4 : Effets inclus dans les modèles d'analyse génétique. NVIV : nombre de nés vivants, SEVDE : nombre de porcelets sevrés nés de la truie, MPN : poids moyen à la naissance, PPP : proportion de petits porcelets, Prop_RCIU : nombre de porcelets de classe sévère et léger / nombre de porcelets nés totaux.

Variables	Fixe					Aléatoire		
	Bande de mise-bas	Rang de portée	CtgVer	Age à la pesée	Durée gestation	Verrat	Génétique	Résidu
NVIV	X	X	X			X	X	X
SEVDE	X	X	X			X	X	X
MPN	X	X		X		X	X	X
PPP	X	X		X		X	X	X
Prop_RCIU	X	X			X	X	X	X

3. Résultats

3.1. Utilisation de l'outil de phénotypage en routine

L'outil de phénotypage a été pensé et développé pour qu'il soit utilisé sur l'ensemble des portées des éleveurs sélectionneurs. Dans le cahier des charges, il a donc été prévu que l'outil soit robuste, nettoyable pour des raisons sanitaires et qu'il puisse s'insérer dans la routine des soins aux porcelets. Les dimensions de l'outil sont adaptées à une utilisation sur la balance de pesée afin de réaliser simultanément le phénotypage de maturité et la pesée.

La prise d'image a été standardisée de façon à avoir une tête bien éclairée et centrée sur fond noir. La présence d'une veilleuse et d'un support de contention réglable permet de s'adapter à l'environnement

et à l'animal considéré. Tout porcelet pris en photo à l'aide de l'outil est centré, sur fond noir, sa tête est maintenue de la même manière et il est bien éclairé. Ainsi, la variabilité présente dans les images, que l'IA (intelligence artificielle) doit pouvoir distinguer en trois classes, est liée uniquement à la morphologie de l'animal. Cela permet d'améliorer les performances de l'algorithme d'analyse d'images, dans des situations éloignées de la situation connue.

Les différentes évolutions qui ont été faites sur l'outil ont permis d'améliorer la qualité des photos et donc de pouvoir les utiliser par la suite. La mentonnière a permis de réduire la fréquence des images floues. Les porcelets ne tenaient pas tous la tête droite.

Lors des tests en routine, il a été possible de vérifier que l'usage de l'outil ne ralentissait pas les salariés de l'élevage (Tableau 5). Les deux élevages de ce test avaient deux postes de soins différents, l'un mobile (élevage B) et l'autre fixe (élevage A). Le poste fixe a permis de tester l'utilisation du prototype sur une balance. Avec le poste mobile, le fonctionnement de la balance ne permettait pas de poser l'outil en entier dans celle-ci. Le dispositif n'est pour le moment pas encore adapté à toutes les balances. Dans ce cas, les soins sont faits en deux étapes en séparant la pesée de l'animal du phénotypage de maturité.

Tableau 5 : Temps moyen passé pour les soins d'un porcelet avec ou sans le dispositif

	Sans le prototype (secondes)	**Avec le prototype (secondes)**
Elevage A : poste fixe	17 ± 5 (n=58)	16 ± 0 (n=39)
Elevage B : poste mobile	22 ± 2,7 (n=88)	22 ± 2,7 (n= 76)

Le temps moyen passé pour la réalisation des soins de chaque porcelet n'était pas significativement différent entre ceux prodigués avec et sans le dispositif. Lors de son usage en routine le dispositif n'a donc pas eu d'effet sur la rapidité des employés. Dans le cas de l'élevage A, le temps passé par porcelet avait même tendance à être plus faible en utilisant le dispositif. La balance mettait moins de temps à se stabiliser lorsque le prototype était posé dessus. Cela était probablement lié au système de contention. Pour l'élevage B, malgré l'ajout de l'étape de phénotypage dans leur routine, il n'y pas eu de variation dans le temps moyen. Cela a pu être expliqué par la réattribution et réorganisation des différents soins prodigués.

Le rythme qu'ont les animaliers lors de ces soins a altéré certaines acquisitions d'images. Le porcelet a parfois été retiré pendant que la photo était prise, donnant des images inexploitables (floues ou sans porcelet).

3.2. Performances de l'algorithme dans la détection du phénotype

Le phénotype de maturité a été déterminé par l'algorithme en se basant sur la forme de la tête. Ce classement des porcelets a été comparé aux mesures morphologiques faites sur ces derniers. Les ratios de mesures morphologiques entre l'avant de l'animal et l'arrière étaient significativement plus faibles chez les porcelets matures que chez les immatures (Figure 4). Le degré de sévérité du RCIU observé visuellement sur la tête du porcelet ségrégait des morphologies particulières. L'analyse en composantes principales du jeu de donnée groupait les porcelets de même maturité selon l'axe 1 de l'ACP. Cette dimension expliquait plus de 50 % de la variabilité. L'analyse a été réalisée sur les deux premières composantes d'après le test du coude de Cattell. Les ratios de mesures morphologiques qui expliquaient le mieux le premier axe sont les rapports entre Dyeux et les mesures du corps. Les plus matures avaient un rapport Lfemur/Ltête important. Les plus immatures avaient des rapports Ltête et Dyeux sur Lcorps et Lfémur plus importants alors que les porcelets matures avaient à l'inverse un rapport Lfémur/Ltête plus important.

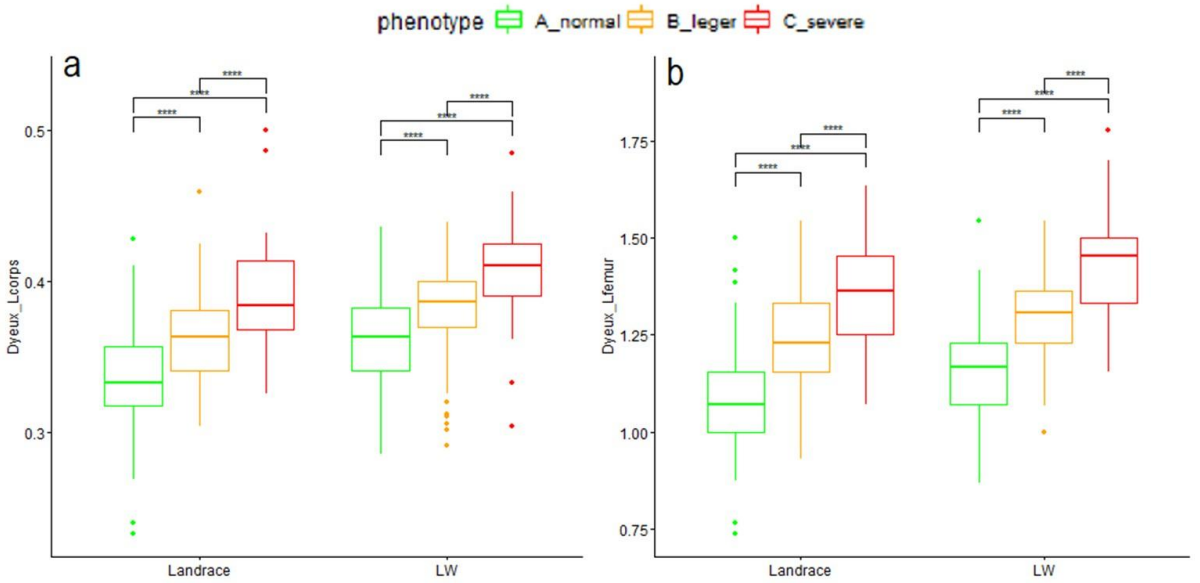


Figure 4 : Répartition des ratios de mesures morphologiques (distance entre les deux yeux sur longueur de corps en a. et sur longueur de fémur en b.) par classe de maturité pour les deux races phénotypées Landrace et Large White.

La forme de la tête a été trouvée comme un indicateur fiable du stade de développement global. L'utilisation d'un algorithme se basant sur ce phénotype pour l'acquisition de données en routine est possible.

La qualité de la prédiction par IA du niveau de maturité des porcelets a été testée. Les deux tests conduits montraient que les algorithmes ne classaient que rarement des porcelets immatures dans un phénotype normal. Les images données à l'algorithme lors du premier test étaient correctement classées dans 91,5 % des cas (Tableau 6). Parmi les classements d'images de porcelets immatures erronés, quatre légers immatures ont été classés comme « normaux » et deux en « sévère ». La matrice de confusion montrait que les classes « normal » et « léger » ne sont pas bien distinguées (61 animaux normaux sont classés en « Léger » soit 8,1 %). Un porcelet normal a été classé come immature sévère par l'algorithme. Les algorithmes sont plus précis dans leur appréciation de la maturité lors de ce test que lors du deuxième. Le premier test utilisait des images de porcelets venant d'un environnement (opérateur, lumière) déjà présent dans l'entrainement. Dans le deuxième cas, les images provenaient de prises de vues en routine d'un nouvel élevage avec d'autres opérateurs. Lors de ce deuxième test, les performances ont été dégradées. La confusion entre les classes « léger » et « normal » était plus fréquente. Les porcelets normaux étaient classés comme légèrement immatures dans 8,1 % des cas dans le premier test contre 25 % dans le second. Au total, 76 % des images sont correctement classées. La chute de performance est forte en passant l'outil dans un nouvel élevage.

Tableau 6 : Matrices de confusion des deux tests de performances de prédiction de maturité. Test 1 : élevages avec même fond génétique que celui de l'entrainement, test 2 : autre fond génétique que celui de l'entrainement.

		Test 1		
		Annotation manuelle		
		Normal	**Léger**	**Sévère**
Prédiction	**Normal**	**691** ***(91,8 %)***	4 *(7,1 %)*	0

		Test 2		
		Annotation manuelle		
		Normal	**Léger**	**Sévère**
Prédiction	**Normal**	**414** ***(74,9 %)***	9 *(8,9 %)*	0

Léger	61 (8,1 %)	**50 *(89,3 %)***	1 (8,3 %)
Sévère	1 (0,1 %)	2 (3,6 %)	**11 *(91,7 %)***

Léger	138 (25,0 %)	**81 *(80,2 %)***	5 (17,2 %)
Sévère	1 (0,2 %)	11 (10,9 %)	**24 *(82,8 %)***

3.3. Estimation des paramètres génétiques

Les calculs de paramètres génétiques n'ont pas été réalisés pour le phénotype binaire du porcelet (mature/immature) car la taille du jeu de donnée et la structure du dispositif ne le permettait pas. Les paramètres génétiques pour les phénotypes de maturité à l'échelle de la portée (effet génétique de la mère) ont été calculés. Le jeu de données qui a permis le calcul des paramètres génétiques est assez réduit mais représentait bien la variabilité phénotypique (Tableau 7) des populations étudiées LW et LR au niveau des moyennes et écart-type (Merour *et al*. 2008).

Tableau 7 : Statistiques descriptives des données utilisées pour l'estimation des paramètres génétiques. NVIV : nombre de nés vivants, SEVDE : nombre de porcelets sevrés nés de la truie, MPN : poids moyen à la naissance, PPP : proportion de petits porcelets, Prop_RCIU : nombre de porcelets de classe sévère et léger / nombre de porcelets nés totaux.

Type génétique de la mère	Caractère	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	N
Landrace	NVIV	15,11	3,37	4	25	336
	SEVDE	13,27	3,09	4	24	335
	MPN	1 312,87	197,80	916,67	2 052,00	315
	PPP	16,73	13,41	0,00	57,14	286
	Prop_RCIU	7,84	9,12	0,00	43,48	336
Large White	NVIV	15,65	3,65	1	24	597
	SEVDE	13,83	3,29	1	22	597
	MPN	1 401,38	232,60	895,63	2 360,00	563
	PPP	13,94	13,52	0,00	60,00	529
	Prop_RCIU	6,42	8,56	0,00	50,00	597

Les truies présentes dans l'échantillon (336 portées LR et 597 portées LW) avec les performances ont été considérées comme représentatives. Les truies LR étaient issues de 114 pères et 190 mères pour un pedigree complet de 1 793 animaux. En LW, le pedigree sur cinq générations contient 2 303 animaux dont la première génération d'ascendants est composée de 111 pères et 322 mères.

Les deux races avaient des corrélations phénotypiques entre les différents caractères comparables (Tableau 8 : 0,38 et 0,40 pour NVIV et PPP ou -0,36 et -0,41 entre SEVDE et MPN). Le caractère de maturité était corrélé assez négativement avec le poids moyen à la naissance. Les autres caractères sont corrélés positivement entre eux. Une portée plus légère en moyenne a une proportion de porcelets en retard de croissance plus importante. Les grandes portées avec un nombre important de sevrés et une forte proportion de petits porcelets avaient une plus grande part de porcelets immatures.

Lors des calculs de paramètres génétiques, la population LW a eu des problèmes de convergence sur 3 couples de caractères. La tendance de la corrélation a été exprimée en 1 ou -1. Les erreurs standard estimées pour une partie des corrélations étaient plus élevées que la corrélation elle-même. Ces résultats sont difficilement interprétables.

Tableau 8 : Paramètres génétiques estimés dans les deux populations, héritabilité en italique sur la diagonale, corrélations génétiques au-dessus de la diagonale et phénotypiques en-dessous de la diagonale. NVIV : nombre de nés vivants, SEVDE : nombre de porcelets sevrés nés de la truie, MPN : poids moyen à la naissance, PPP : proportion de petits porcelets, Prop_RCIU : nombre de porcelets de classe sévère et léger / nombre de porcelets nés totaux.

Type génétique de la mère		NVIV	SEVDE	MPN	PPP	Prop_RCIU
Landrace	NVIV	*0,13 ± 0,10*	0,80 ± 0,20	-0,45 ± 0,21	0,35 ± 0,37	-0,18 ± 0,64
	SEVDE	0,83	*0,09 ± 0,08*	0,11 ± 0,46	-0,005 ± 0,48	-0,24 ± 0,63
	MPN	-0,53	-0,41	*0,34 ± 0,13*	-0,98 ± 0,09	-0,70 ± 0,12
	PPP	0,38	0,22	-0,77	*0,20 ± 0,11*	0,68 ± 0,19
	Prop_RCIU	0,23	0,12	-0,57	0,62	*0,25 ± 0,11*
Large White	NVIV	*0,13 ± 0,08*	1	-0,63 ± 0,18	0,69 ± 0,22	0,61 ± 0,34
	SEVDE	0,88	*0,19 ± 0,11*	-0,39 ± 0,12	0,53 ± 0,23	0,47 ± 0,29
	MPN	-0,51	-0,36	*0,41 ± 0,08*	-1	-0,89 ± 0,15
	PPP	0,40	0,24	-0,68	*0,26 ± 0,08*	1
	Prop_RCIU	0,32	0,17	-0,50	0,66	*0,13 ± 0,07*

L'héritabilité calculée pour le caractère de maturité était de 0,25 ± 0,11 en LR. En LW, la valeur était plus faible, de l'ordre de 0,13 ± 0,07. Les corrélations génétiques de Prop_RCIU avec les autres caractères n'étaient pas toutes interprétables. En LR, les corrélations de Prop_RCIU avec le nombre de nés vivants et de sevrés n'étaient pas significativement différentes de 0 (-0,18 ± 0,64 et -0,24 ± 0,63). Cette corrélation est positive en LW (0,61 ± 0,34). Dans les deux races, une forte corrélation génétique négative entre la moyenne de poids à la naissance et la proportion de RCIU a été observée. La corrélation est de -0,70 en Landrace et de -0,89 pour les truies Large White. Les proportions de petits porcelets et de porcelets RCIU sont très corrélées en Landrace (0,68 ± 0,19) et à tendance positive en Large White. En LW, la proportion de cas de RCIU avait une corrélation génétique positive avec le nombre de sevrés.

4. Discussion

Cette étude visait à développer un outil de phénotypage haut-débit afin de mettre en place une sélection sur la maturité des porcelets dans les lignées femelles Large White et Landrace. La conception du dispositif en concertation avec les animaliers a permis d'obtenir un outil qui s'intègre correctement à la routine de ces derniers sans contraintes. Lorsqu'il n'a pas été possible de coupler la balance et l'appareil de phénotypage, la mesure du phénotype ajoute une étape aux soins sans altérer la rapidité des soins. Durant les chantiers de mesures, des soucis dans la qualité des prises d'images ont pu être remarqués. Le déclenchement de la photo est parfois fait lors du retrait du porcelet. Un flou trop important rend certaines images inexploitables aussi bien par un annotateur que par le modèle IA. Ces soucis lors de l'acquisition des images peuvent poser un problème en routine si cela se produit sur une trop grande partie des porcelets. La mise en place d'une sélection nécessite que les données soient les plus fiables, exhaustives et précises possibles.

Les mesures morphologiques récoltées sur les porcelets ont permis de confirmer que les annotations visuelles faites par les opérateurs étaient cohérentes avec la maturité globale de l'animal. Les mesures morphologiques externes reflètent l'état de développement interne de l'animal ; or, celui-ci est un des premiers critères pour déterminer le développement des porcelets (Chevaux *et al*. 2010). Dans ces conditions, la notation des têtes est un bon indicateur du stade de maturité du porcelet. L'utilisation

d'une IA capable de reconnaître les stades de maturité peut permettre de récolter un phénotype informatif. L'IA créée dans le projet a une forte dégradation de performances entre les deux tests (écart de 15 points de pourcentage sur les vrais positifs). Une baisse de performance est toujours attendue lorsqu'un modèle IA est généralisé ; cela vient de l'overfitting (Ying 2019). Ici la dégradation est élevée. Elle peut s'expliquer par le manque de variabilité dans les images de l'entrainement. Le changement d'opérateurs et d'utilisation des outils peut avoir créer une variabilité au niveau de la qualité des images qui ne sont plus caractérisables par le modèle. Le système de contention n'a pas complètement empêché les mouvements des porcelets, l'angle de la photo pouvait varier entrainant une variabilité que l'algorithme ne pouvait pas prendre en compte. Des variations de luminosité et d'exposition de la photo pouvait évoluer entre les images. L'ensemble de ces altérations au niveau de l'image peuvent perturber l'algorithme au niveau de la prédiction lorsque celui-ci n'en a pas eu d'exemple lors de l'apprentissage supervisé. L'ajout d'images diversifiées permettra à l'avenir de pallier ce genre de problèmes. Une autre explication au niveau des performances de l'algorithme est la confusion des phénotypes de prédiction « normal » et « léger » (8,1 % au premier test et 25 % au deuxième). Cette confusion vient aussi du manque de variabilité et de quantité dans les images utilisées à l'entrainement (1 503 porcelets dont certains sont répétés). La répartition, chez les porcelets matures, du nombre d'images par catégorie de poids avait pour but de limiter ces confusions. Une possibilité pour améliorer les performances de prédiction est de fournir un jeu de données large et diversifié pour le rendre plus robuste aux diverses situations qui peuvent être rencontrées. Les nouvelles versions de l'algorithme YOLO intègrent un module permettant d'ajouter artificiellement des altérations aux photos. D'autre part, les réseaux de neurones ont été optimisés dans les versions récentes, les algorithmes créés dans le cadre de cette étude ne pourraient qu'en bénéficier. Un entrainement avec le même jeu de données avec cette option pourrait améliorer la généralisation de l'algorithme.

La définition des critères pour déterminer le degré de maturité des porcelets s'est basée sur les grilles de notation provenant d'études antérieures (Chevaux *et al*. 2010, Hales *et al*. 2013). Ces grilles de notations ont été mises en relation avec l'état de développement des organes (Town *et al*. 2005). Le phénotypage de 9 620 porcelets a permis de calculer des paramètres génétiques du phénotype de maturité à l'échelle de la portée pour les lignées femelles. Les héritabilités calculées pour le caractère Prop_RCIU sont de 0,25 (± 0,11) en Landrace et 0,13 (± 0,07) en Large White. Elles sont d'un niveau comparable à celle estimée par Matheson en 2018 qui était de 0,19 (± 0,05) sur des truies Landrace anglaises. Cependant, l'effet de l'environnement permanent n'a pas été considéré dans notre étude contrairement aux données de la littérature. Les valeurs d'héritabilité estimées des autres caractères sont en adéquation avec les valeurs de routine bien que légèrement plus élevées. Cela s'explique par l'absence de prise en compte de l'effet environnement maternel dans le modèle. Les corrélations génétiques qui ont été estimées entre le caractère de maturité et les caractères de routine en Large White sont cohérentes avec la tendance qui établit que si la prolificité augmente, le taux de porcelets immatures augmente également. En effet, l'augmentation de la prolificité qui passe notamment par la sélection sur les NVIV a mené à l'encombrement utérin (Freckin *et al*., 2007 et Swanson *et al*., 2015) et a conduit à l'apparition de RCIU. En Landrace, le lien entre ces deux caractères n'a pas été trouvé comme significativement différent de zéro. Le jeu de données restreint et l'absence d'effet environnement permanent dans le modèle peuvent expliquer ce résultat. De la même manière, la corrélation génétique des RCIU avec le nombre de porcelets sevrés par truie en Landrace n'est pas significative. Dans notre étude, la corrélation génétique de Prop_RCIU avec SEVDE est positive en Large White. Cette corrélation peut sembler étonnante compte tenu des problèmes de vitalité et de survie des porcelets RCIU. En effet, Matheson trouvait une relation négative (-0,80 ± 0,32) avec la survie à 24h. Nous avons trouvé une relation négative entre le poids moyen de naissance et la proportion de porcelets immatures, ce qui concorde avec les résultats de Matheson. La très forte corrélation entre les proportions de petits porcelets et de porcelets RCIU est intéressante puisque la contre-sélection du nombre des petits porcelets peut permettre de sélectionner des porcelets plus matures.

5. Conclusion

Le projet Pic'Let a permis de montrer qu'il était possible de développer un outil permettant de faire de l'enregistrement automatique en routine d'un phénotype en se basant sur l'analyse d'images. Les résultats de l'algorithme et de son utilisation en routine sont prometteurs. La taille du jeu de données nécessite d'être augmentée afin de réduire la confusion entre certaines classes de maturité. Ce mode de mesure s'inscrit dans la voie d'un phénotypage objectif, précis et automatisé des animaux. Cette preuve de concept nécessite cependant de nombreuses améliorations afin de pouvoir satisfaire aux exigences requises en élevages de sélection. Grâce aux phénotypes acquis lors de ce projet, une analyse des paramètres génétiques du caractère de maturité a pu être faite. Le caractère de proportion de porcelets immatures dans la portée est un caractère héritable dans les deux races étudiées. Dans l'ensemble, les résultats concordent avec les travaux précédemment réalisés. Quelques questionnements subsistent notamment concernant le lien entre proportion d'immatures et nombre de porcelets sevrés. Le manque de données et l'absence d'effet environnement maternel pris en compte dans le modèle peuvent expliquer les résultats de certaines estimations mais aussi la taille des erreurs standards. Globalement, on note un réel potentiel pour une sélection sur le caractère de maturité. S'appuyer sur l'analyse d'images pour avoir une notation objective de la maturité est possible et nécessite pour le moment d'être complétée par d'autres mesures collectées en élevages.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Romain Saintilan : https://orcid.org/0009-0005-5999-5692

Contributions des auteurs

Juliette Magadray : travail de compilation, recueil des résultats et restitution à travers l'article.

Pauline Brenaut : coordination et conceptualisation du projet, co-conception de l'outil, manipulation et analyses des données.

Romain Saintilan : relecture de l'article.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient Pauline Brenaut pour la coordination du projet Pic'Let, la création du dispositif en coopération avec Neotec-Vision et l'analyse des résultats, Léa André pour son travail de collecte de données et d'analyse durant son stage de fin d'étude et en CDD ensuite, Vincent Gauthier et son équipe (Neotec-Vision) pour leur appui et leur expertise en élevage de précision et vision par ordinateur, Laurence Liaubet (GenPhySE INRAE) pour son expertise sur le développement fœtal du porcelet et sa contribution au montage du projet. Les entreprises de sélection Axiom, Nucléus et Choice pour leur contribution à la conception du dispositif et l'ouverture des portes de leurs élevages pour les tests en condition réelles, l'équipe de l'élevage IFIP de Romillé pour leur aide durant la phase de développement du dispositif.

Déclaration de soutien financier

CASDAR N°19ART382455

Références bibliographiques

Amdi C, Krogh U, Flummer C, Oksbjerg N, Hansen CF, Theil PK., 2013. Intrauterine growth restricted piglets defined by their head shape ingest insufficient amounts of colostrum. Journal of Animal Science 91, 5605–5613.

Antoine A, Billon Y, Liaubet L, Canario L., 2017. The use of imaging to learn on piglet level of development. *8. European Conference on Precision Livestock Farming (EC-PLF)*, Sep 2017, Nantes, France

Baxter, E.M., Jarvis, S., D'Eath, R.B., Ross, D.W., Robson, S.K., Farish, M., Nevison, I.M., Lawrence, A.B., Edwards, S.A., 2008 Investigating the behavioural and physiological indicators of neonatal survival in pigs. Theriogenology 69, 773–783.

Canario L, Rydhmer L, Gogué J, Tribout T, Bidanel JP, 2007a. Estimation of genetic trends from 1977 to 1998 farrowing characteristics in the French Large White breed using frozen semen. Animal, 1, 929-938

Canario L, Père MC, Tribout T, Thomas F, David C, Gogué J, Herpin P, Bidanel JP, Le Dividich J, 2007b. Estimation of genetic trends from 1977 to 1998 of body composition and physiological state of Large White pigs at birth. Animal, 1, 1409-1413

Chevaux E, Sacy A, Le Truet Y, Martineau GP., 2010. Intra-uterine growth retardation (IUGR): morphological and behavioural description. In: Proceedings of the 21st international pig veterinary society congress: 18–21 July 2010. Vancouver. p. 209.

Farmer C, Edwards SA., 2020. The neonatal pig: developmental influences on vitality. The suckling and weaned piglet, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, 9-39

Gilmour AR, Gogel BJ, Cullis BR, Thompson R., 2009. ASReml User Guide Release 3.0. Hemel Hempstead, UK, VSN International Ltd.

Groeneveld E, Kovač M, Mielenz N., 2010. VCE User's Guide and Reference Manual, version 6.0. Institute of Farm Animal Genetics; Neustadt, Germany.

Hales J, Moustsen VA, Nielsen MBF, Hansen CF., 2013. Individual physical characteristics of neonatal piglets affect preweaning survival of piglets born in a non-crated system. Journal of Animal Science 91, 4991-5003

Hansen C. F., Hales J., Amdi C., Moustsen V. A., 2019. Intrauterine growth-restricted piglets defined by their head shape have impaired survival and growth during the suckling period. Animal Production Science 59, 1056-1062.

Herpin, P.; Le Dividich, J., 1995. Thermoregulation and the environment. In: The Neonatal Pig: Development and Survival. Varley, M.A., Ed. CAB International: Wallingford, UK, pp. 57–95.

Herpin p, Le Dividich J., 1998. Conséquences de l'augmentation de la prolificité des truies sur la survie et la croissance du porcelet. Productions Animales, 11 (3), 253-255.

Mainau E, Temple D, Manteca X., 2015. Mortalité néonatale chez les porcelets. Fiche technique sur le bien-être des animaux de rente, Farm Animal Welfare Education Centre, 11.

Matheson SM, Foster B, Edwards SA., 2016. Relationships between weight, head morphology-assessed IUGR status and survival in commercial piglet production. Proceedings of the 24th International Pig Veterinary Society Congress, pp. 141-141

Matheson SM, Walling GA, Edwards SA., 2018. Genetic selection against intrauterine growth retardation in piglets: a problem at the piglet level with a solution at the sow level. Genetics Selection Evolution, 50, 46

Merour I, Bernard E, Canario L, Bidanel, JP., 2008. Analyse génétique de la productivité numérique et pondérale et de la durée de mise bas de truies Large White et Landrace Français. 40èmes Journées de la Recherche Porcine, 40, 133-136

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A., 2016. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. Computer Science.

Bauer R, Walter B, Hoppe A, Gaser E, Lampe V, Kauf E, Zwiener U., 1998. Body weight distribution and organ size in newborn swine (sus scrofa domestica) — A study describing an animal model for asymmetrical intrauterine growth retardation. Experimental and Toxicologic Pathology 50, 1, 59-65

Ruggeri R, Bee G, Trevisi P, Ollagnier C., 2024. Intrauterine growth restriction defined by increased brain-to-liver weight ratio affects postnatal growth and protein efficiency in pigs. Animal 18, Issue 1.

Sacy A, Le Treut Y, Schmidely P, Chevaux E., 2010. Caractérisation de l'immaturité des porcelets à la naissance. Journées de la Recherche Porcine, Feb 2010, Paris, France. pp 259-260

Silalahi P, Tribout T, Prunier A, Billon Y, Gogue J, Bidanel JP., 2016. Estimation of the effects of selection on French Large White reproductive performance using frozen semen. J Anim Sci., 94, 3655–3662.

Swanson AM, David AL., 2015. Animal models of fetal growth restriction: Considerations for translational medicine. Placenta 36, 623–630.

Town SC, Patterson JL, Pereira CZ, Gourley G, Foxcroft GR., 2005. Embryonic and fetal development in a commercial dam-line genotype. Animal Reproduction Science 85, 3–4, 301-316,

Ying X., 2019. An overview of overfitting and its solutions. Journal of Physics, Conference Series, 1168, Article 022022

Pour citer cet article : Juliette Magadray, Romain Saintilan, Pauline Brenaut. Pic'Let : Développement d'un outil de phénotypage du niveau de maturité du porcelet par intelligence artificielle. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.301-315. 10.17180/ciag-2025-vol107-art22

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

EFFISCAN : Nouveaux critères d'efficience alimentaire et de composition corporelle par scanner dédiés à la sélection porcine

Sandrine SCHWOB[1], Mathieu MONZIOLS[1], Delphine LOISEAU[1], Claire HASSENFRATZ[1], Maxime BANVILLE[1]

Avec la collaboration de Guillaume LENOIR, Bruno LIGONESCHE, Florence YTOURNEL et l'équipe de l'INRAE de l'UE3P du Rheu

[1] IFIP-Institut du Porc, 9 Bd du Trieux, 35740 Pacé, France

Correspondance : sandrine.schwob@ifip.asso.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art23

Résumé

L'efficience alimentaire est un axe majeur de la compétitivité de la filière porcine et de la réduction des rejets dans l'environnement. La tomographie à rayons X (scanner) a démontré son potentiel pour mesurer avec précision la composition corporelle. L'objectif du projet EFFISCAN est de tester des critères d'efficience alimentaire rapportés au gain de muscle, et non plus au gain de croît, grâce à la mesure précise de la composition tissulaire par scanner. Parallèlement, le scanner a été utilisé comme référence pour comparer des modèles prédictifs du taux de muscle de la carcasse par race, basés sur des mesures moins coûteuses réalisées en élevage de sélection. Les nouveaux critères de croissance et d'efficacité alimentaire développés dans cette étude peuvent servir à orienter différemment et à améliorer le niveau génétique des reproducteurs dans un contexte de diminution de l'impact environnemental de la production porcine.

Mots-clés : efficience alimentaire, gain de muscle, scanner, sélection porcine

Abstract: New criteria for feed efficiency and body composition by scanner for pig breeding

Feed efficiency is a major factor in the competitiveness of the pork industry and in reducing environmental emissions. X-ray computed tomography (CT) has demonstrated its potential for accurately measuring body composition. The aim of the EFFISCAN project is to test feed efficiency criteria in relation to muscle gain, rather than growth gain, thanks to the precise measurement of tissue composition by CT. At the same time, the CT was used as a reference to compare predictive models of carcass muscle content per breed, based on less costly measurements carried out on selection farms. The new growth and feed efficiency criteria developed in this study can be used to guide and improve the genetic level of breeding stock in a context of reducing the environmental impact of pig production.

Keywords: feed efficiency, muscle gain, scanner, pig breeding

1. Introduction

Améliorer l'efficience alimentaire est un enjeu majeur pour la filière porcine. En effet, l'alimentation est un des éléments importants de la rentabilité des élevages, un des leviers majeurs permettant de modifier la composition corporelle et le classement, et d'améliorer la performance environnementale. En matière de marge sur coût alimentaire (pour 100 kg de carcasse), les impacts les plus importants des différents critères sont les suivants (https://gtdirect.ifip.asso.fr) :

- + 3,1 € pour une diminution de 0,1 point de l'indice de consommation en engraissement ;
- + 1,2 € pour une augmentation de 1 point du classement au taux de muscle des pièces.

L'indice de consommation (IC) se rapporte au gain de poids, sans différenciation du tissu déposé. Les nouvelles technologies d'imagerie, telles que la tomodensitométrie, offrent la possibilité d'obtenir une composition de précision permettant de quantifier la proportion des différents tissus, notamment la quantité de muscle. Il devient alors envisageable de tester des critères techniques plus pertinents, tels que des IC calculés sur la base du gain de muscle.

La réglementation européenne sur la classification des carcasses a changé en juillet 2018. Depuis cette date, toute demande d'autorisation de méthodes de classement doit être basée sur la prédiction du taux de muscle de la carcasse (TMC), en remplacement du critère précédent, le taux de muscle des pièces (TMP). Ce changement n'a pas encore eu lieu en France, dont la dernière actualisation des méthodes de classement remonte à 2007, lors de la mise en place du TMP, toujours en usage actuellement. Avant que la production n'utilise ce nouveau critère, il serait judicieux que l'étage de sélection anticipe cette évolution en intégrant le TMC dans l'évaluation génétique des reproducteurs. Or, la sélection porcine française est précisément à la recherche de solutions alternatives à l'estimation actuelle du TMP à partir du poids des pièces de découpe, pour des raisons de lourdeur de la méthode et de son inadéquation aux races et aux types sexuels utilisés en sélection (Daumas *et al.*, 2017). De plus, le TMC concerne environ 95 % du muscle de la carcasse (avec joues mais sans tête ni pied), alors que le TMP, estimé à partir de la teneur en muscle des quatre pièces principales (jambon, longe avec filet mignon, épaule et poitrine), n'en concerne que 70 %. Le TMC est donc plus proche du dépôt de muscle dans l'animal. Néanmoins, il faut disposer d'une méthode de référence d'un bon rapport coût-précision pour mesurer le TMC. Depuis 2009, la tomographie à rayons X (scanner médical) est acceptée comme méthode alternative à la dissection manuelle par la réglementation européenne sur la classification, à condition de fournir des résultats comparables à la dissection. L'IFIP-Institut du porc, qui dispose d'un scanner mobile, a mis au point une procédure assurant cette équivalence (Daumas et Monziols, 2016).

Daumas *et al.* (2023) ont montré qu'il était possible d'exploiter les mesures réalisées avec un tomographe pour dériver des critères de croissance et d'efficience alimentaire rapportés au muscle en exploitant des données collectées *post mortem*. L'objectif principal en sélection étant de mesurer des caractères sur des candidats à la sélection et futurs reproducteurs, l'approche présentée ici explore ces mêmes caractères en exploitant des données collectées *in vivo* à l'aide d'un tomographe.

2. Matériel et méthodes

2.1. Production des animaux et mesures zootechniques

La production des animaux à la station de phénotypage du Rheu (35) de France Génétique Porc et de l'INRAE UE3P (https://doi.org/10.15454/1.5573932732039927E12) s'est déroulée entre septembre 2019 et janvier 2022, sur quatre bandes.

Six populations de races pures ont été étudiées :

- trois lignées paternelles : Piétrain sensible à l'halothane[9] (Pi nn), Piétrain non sensible à l'halothane (Pi NN), Duroc (Du) ;
- trois lignées maternelles : Large White (LW), Landrace (LR) et M6-Landrace.

Pour la race Piétrain, où l'allèle de sensibilité à l'halothane est en ségrégation, deux populations distinctes ont été constituées, selon les deux génotypes homozygotes, à cause de l'effet majeur sur la composition corporelle de l'allèle de sensibilité à l'halothane (n).

[9] L'halothane est un *agent anesthésique volatil halogéné* de la famille des haloalcanes utilisable pour l'induction et l'entretien des anesthésies générales.

Pour des raisons d'optimisation des schémas de sélection, les animaux livrés en station étaient des femelles des lignées paternelles et les mâles entiers des lignées maternelles.

Les porcs ont été élevés et phénotypés selon le protocole habituel de la station, à savoir :

- pesée à l'arrivée vers 3 à 4 semaines d'âge ;
- alimentation à volonté à l'auge pendant 5 à 6 semaines en post-sevrage ;
- pesée en sortie de post-sevrage ;
- période de contrôle entre 35 kg et 120 kg vif (115 kg pour les animaux Piétrain) ;
- alimentation *ad libitum* au distributeur automatique d'aliment concentré (DAC) pendant toute la période d'engraissement, avec une alimentation biphase (aliment croissance/finition) ;
- enregistrement de toutes les consommations individuelles d'aliment durant la phase de contrôle ;
- suivi quotidien du poids de chaque animal grâce au plateau de pesée associé au DAC ;
- objectif d'un poids à jeun avant départ à l'abattoir de 115 kg (110 kg pour les animaux Piétrain).

La consommation alimentaire individuelle a été collectée sur l'ensemble des animaux. Ainsi, le gain de poids moyen quotidien (GMQ) et l'indice de consommation (IC) ont été calculés sur la période de contrôle, entre 35 et 115 ou 120 kg, pour tous les animaux ayant terminé leur contrôle, comme réalisé en routine en sélection.

2.2. Mesures de composition corporelle

2.2.1. Mesures in vivo

Chaque animal des lignées Piétrain, Large White et Landrace a été scanné deux fois :

- vers 35 kg, une semaine après le transfert des animaux en engraissement ;
- vers 70 kg, un mois avant l'abattage conformément aux règles régissant les produits d'anesthésie au moment de l'essai.

Les animaux Duroc et M6-Landrace n'ont pas été scannés *in vivo*, mais uniquement *post mortem (PM)*.

Le scanner mobile de l'IFIP, situé dans une semi-remorque, était installé en position de scan à l'emplacement prévu spécifiquement dans la station de phénotypage du Rheu. Les porcs étaient déplacés dans des cases collectives en ne mélangeant pas les cases d'origine, mis à jeun puis anesthésiés par une personne habilitée. Chaque porc anesthésié était immobilisé dans un matelas de contention, puis transporté jusqu'à la table du scanner. Les animaux ont été scannés par tomographie à rayons X avec un scanner Emotion Duo (Siemens, Erlangen, Allemagne), en utilisant les paramètres d'acquisition décrits par Blum *et al.* (2014) et le protocole d'acquisition décrit par Monziols *et al.* (2014). Après avoir été scanné, l'animal était ramené dans une case spécifique sous surveillance jusqu'à son réveil, puis reconduit dans sa case d'engraissement. Les animaux de chaque case étaient scannés sur une même journée, à chacune des deux périodes (à 35 kg et à 70 kg).

Les épaisseurs dorsales de gras et de muscle ont été mesurées aux ultrasons (US) sur l'ensemble des animaux, environ 3 semaines avant l'abattage, lorsque le poids moyen intra case atteignait 100 kg.

2.2.2. Mesures post mortem

Après chaque période de scan *in vivo*, la semi-remorque contenant le scanner a été déplacée à la station expérimentale de l'IFIP à Romillé (35) par un transporteur en vue des scans *post mortem*. Les équipements expérimentaux du site comprennent un hall d'accueil pour la remorque du scanner

attenant à des frigos de stockage et une salle de découpe aménagée et agréée par les services vétérinaires.

Les porcs ont été abattus à un poids vif cible de 115 ou 120 kg selon la race. L'abattage de chaque bande a été planifié sur cinq semaines, avec des départs hebdomadaires de 25 porcs environ. Les carcasses ont été classées sur la chaîne d'abattage avec l'appareil de classement en usage, le CSB Image-Meater™ (Blum *et al.*, 2014).

Conformément au protocole de contrôle en station, les poids suivants ont été enregistrés le jour de l'abattage :

- poids de la carcasse avec et sans tête ;
- poids de la demi-carcasse droite sans tête.

Le lendemain de l'abattage, les demi-carcasses droites du lot ont été livrées à la salle de découpe de l'IFIP à Romillé. Après réception et identification, les mesures ZP (zwei Punkte, deux points en allemand), méthode non invasive permettant d'estimer l'épaisseur de gras et de muscle à l'aide d'une réglette, ont été réalisées directement à la fente. Puis, les demi-carcasses ont été scannées par tomographie à rayons X selon le même protocole d'acquisition que pour les scans *in vivo*. Le protocole habituel d'acquisition des images permet de scanner quotidiennement un maximum de 25 demi-carcasses. Les demi-carcasses ont ensuite été découpées selon une procédure normalisée, afin de calculer les proportions de bardière (%BAR), de longe (%LON), de jambon (%JAM) et de poitrine (%POI) par rapport au poids de la demi-carcasse sans tête. Enfin, les fichiers des données des images tomographiques ont été transférés sur un serveur pour être analysés.

2.3. Analyse des images tomographiques

L'analyse des images tomographiques avait pour objectif final de calculer les poids des différents tissus. Elle a consisté d'abord à mesurer les volumes tissulaires, puis à leur appliquer une densité propre à chaque tissu. L'attention a été focalisée sur le tissu musculaire, qui est le plus important pour les critères actuels et les nouveaux critères proposés. La procédure suivante développée par l'IFIP a été appliquée :

- seuillage du volume de muscle dans l'intervalle [0-120] unités Hounsfield ;
- conversion du volume en poids en appliquant une densité du muscle de 1,04.

L'analyse des images *in vivo*, plus complexe, a nécessité d'abord une séparation virtuelle des viscères telle que présentée par Monziols *et al.* (2014). Une comparaison des images *in vivo* à 70 kg et en demi-carcasses a été effectuée pour améliorer la cohérence des analyses par stade.

Le volume musculaire et le TMC ont été calculés selon les procédures décrites par Daumas et Monziols (2016). Le TMC correspond à la définition donnée dans le règlement UE 2017/1182 pour la classification des carcasses de porcs, où la dissection totale a été réalisée en utilisant une procédure tomographique. Mesurer le volume musculaire converti en poids de muscle a ainsi permis de calculer le gain musculaire quotidien moyen (GMQm) et l'indice de consommation exprimé par kg de gain de muscle (ICm), comme détaillé par Daumas *et al.* (2022). Le GMQm sur la période [i,j] a été calculé selon la formule suivante :

$$GMQm_{[i,j]} = \frac{Poids\ de\ muscle\ scanner\ final - Poids\ de\ muscle\ scanner\ initial}{Nombre\ de\ jours\ sur\ la\ période\ [i,j]}$$

A la différence du gain de poids, exprimé en poids vif, le gain musculaire a été exprimé en poids mort froid, par cohérence avec la viande commercialisée.

Par analogie avec l'indice de consommation, l'ICm a été calculé selon la formule suivante :

$$ICm_{[ij]} = \frac{Quantité\ moyenne\ quotidienne\ d'aliment\ consommé\ sur\ la\ période\ [i,j]}{GMQm_{[i,j]}}$$

Puis, les traitements des images des deux scans *in vivo* ainsi que du scan *post mortem* ont permis d'estimer des GMQm et des ICm, non seulement pour la période d'engraissement [35 kg-PM], mais également pour la période entre les deux scans *in vivo* [35 kg-70 kg], et la période de finition [70 kg-PM], plus critique vis-à-vis de la composition corporelle.

2.4. Analyses statistiques

2.4.1. Prédiction de la composition corporelle

Des équations de prédiction du taux de muscle de la carcasse ont été développées à partir des trois ensembles de prédicteurs suivant :

- US : qui regroupe l'épaisseur moyenne de lard dorsal (G-US) ainsi que l'épaisseur de longe (M-US) mesurées sur des porcs vivants par échographie comme décrit en 2.2.1 ;
- IM : deux épaisseurs de gras (G3 et G4) et deux épaisseurs de muscle (M3 et M4) mesurées sur la fente des demi-carcasses à l'aide de l'Image-Meater comme décrit en 2.2.2 ;
- CUT : quatre proportions de pièces de découpe comme décrit en 2.2.2.

Pour chaque ensemble de prédicteurs, l'effet génétique (partiellement confondu avec le sexe) a été testé au travers d'un modèle linéaire généralisé, en incluant la lignée en effet fixe ainsi qu'en interaction avec les différents prédicteurs. Pour chaque ensemble de prédicteurs et chaque méthode d'intégration de l'effet génétique dans le modèle, seules les variables significatives ont été conservées dans le modèle de prédiction. Afin de comparer le pouvoir prédictif de chaque ensemble de prédicteurs, le coefficient de détermination (R^2) et l'écart type résiduel (ETR) ont été calculés. Les analyses ont été réalisées à l'aide des procédures GLM et REG du logiciel SAS (SAS, v9.4, Inst. Inc. Cary).

2.4.2. Exploration des caractères de croissance et d'efficacité alimentaire rapportés au muscle

Les variables étudiées ont été préalablement corrigées par un modèle linéaire avec l'effet bande en effet fixe via la procédure lm du logiciel R (R 4.3.1, R Core Team, 2023). Ensuite, les relations entre variables ont été décrites via des corrélations de Pearson obtenues à l'aide du package GGally (version 2.2.1., Schloerke *et al.*, 2024) du logiciel R. Les analyses ont été menées séparément pour les lignées paternelles et maternelles, compte tenu de leurs divergences en matière d'objectifs de sélection. Les lignées maternelles ont été groupées pour cette analyse, le dispositif ne permettant pas de mettre en évidence de différence entre les lignées.

3. Résultats

3.1. Composition corporelle

La composition en muscle des carcasses, estimée à partir des données tomographiques, a été comparée entre les différentes lignées étudiées. Les différences relatives entre races pour le TMC sont présentées dans la Figure 1. Au sein des lignées mâles, le TMC le plus élevé a été observé en Piétrain sensible halothane (génotype nn) avec 64,2 % de TMC, suivi du Piétrain non-sensible NN (61,1 %) et du Duroc (55,6 %). En lignée femelle, c'est le M6-Landrace qui présentait le TMC le plus élevé (61,6 %), suivi du Large White et du Landrace, avec 59,2 % et 57,3 %, respectivement.

Trois approches ont été explorées pour estimer le TMC sur la base de prédicteurs collectés *in vivo* ou *post mortem*. Pour chacune des trois méthodes, les données exploitées comportaient les performances

de 231 porcs pour la méthode par ultrasons (US), 205 pour la méthode par Image-Meater (IM) et 229 pour la méthode de découpe (CUT). Le Tableau 1 regroupe les statistiques descriptives pour les variables de chacune des trois méthodes ainsi que pour le TMC estimé à partir des scans PM, qui sert de méthode de référence.

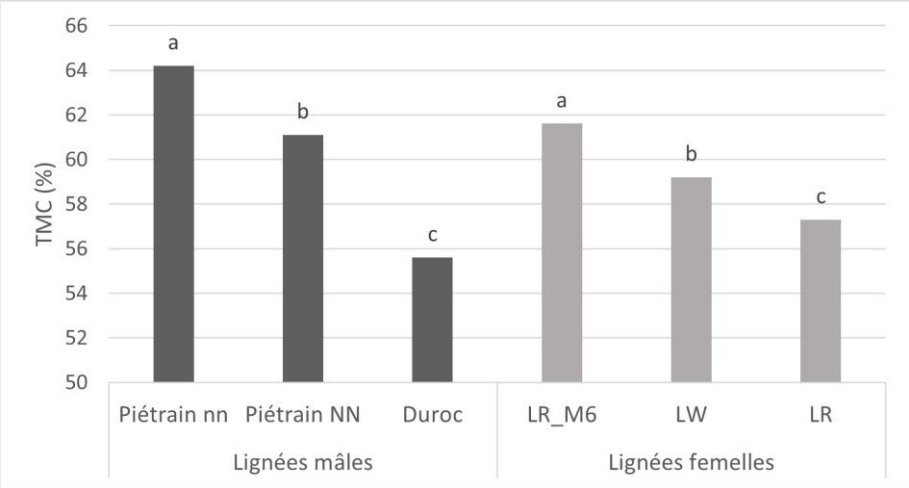


Figure 1 : TMC (taux de muscle de la carcasse) moyen par population génétique. Les lettres au-dessus de chaque barre indiquent une différence significative au seuil p<0,05 intra lignées femelles et intra lignées mâles. LR : Landrace, LW : Large White.

Tableau 1 : Statistiques descriptives des variables mesurées pour estimer le TMC (taux de muscle de la carcasse) selon différentes méthodes. US : ultrasons, IM : Image-Meater, CUT : méthode de découpe, G-US : épaisseur de lard dorsal, M-US : épaisseur de longe, G3 et G4 : épaisseurs de gras, M3 et M4 : épaisseurs de muscle.

		Effectifs	Moyenne	Ecart-Type	Minimal	Maximal
US	G-US, mm	231	10,5	2,72	5,3	18,7
	M-US, mm	231	65,3	10,3	34,5	89,6
IM	G3, mm	205	14,4	4,35	4,5	26,5
	G4, mm	205	23,1	4,35	13,0	35,0
	M3, mm	205	75,2	10,17	51,5	100,6
	M4, mm	205	56,3	7,72	42,3	76,6
CUT	%BARDIERE	229	6,7	1,52	3,8	12,3
	%LONGE	229	28,5	2,37	22,8	38,0
	%JAMBON	229	25,5	1,40	22,6	29,2
	%POITRINE	229	13,5	1,61	10,0	19,3
Référence	TMC, %	231	60,0	3,70	49,5	68,4

Dans un premier temps, des équations de prédiction du TMC ont été développées sur l'ensemble de l'échantillon, intégrant à la fois les données collectées dans les lignées femelles et dans les lignées mâles. La Figure 2 donne les résultats pour deux indicateurs de prédictivité des modèles, le coefficient de détermination (R2) et l'écart-type résiduel (ETR). Ces indicateurs montraient de meilleures performances pour le modèle CUT (R2=0,82 et ETR=1,56) alors que les R^2 étaient inférieurs à 0,65 et les ETR supérieurs à 2,25 pour les méthodes US et IM. Ensuite, l'intégration d'un effet génétique dans les modèles a montré une amélioration forte de leurs performances à prédire le TMC : les R^2 étaient tous supérieurs à 0,73 avec cette méthodologie et atteignaient 0,93 pour la méthode CUT. L'ETR quant

à lui était inférieur à 2 quelle que soit la méthode (ETR=1,07 pour la méthode CUT). Les modèles développés intra-type génétique (lignée mâle et lignée femelle) n'ont pas permis d'améliorer significativement la qualité prédictive des modèles. En lignées mâles, l'effet génétique n'étant pas significatif, le R^2 et l'ETR ont été estimés sur l'ensemble des mâles et étaient proches de ceux estimés sur l'ensemble des animaux (R^2=0,94 et ETR=1,04). L'effet génétique était significatif en lignées femelles ; cependant, les indicateurs R^2 et ETR, étaient dégradés quelle que soit la lignée (R^2<0,9 et ETR>1,05).

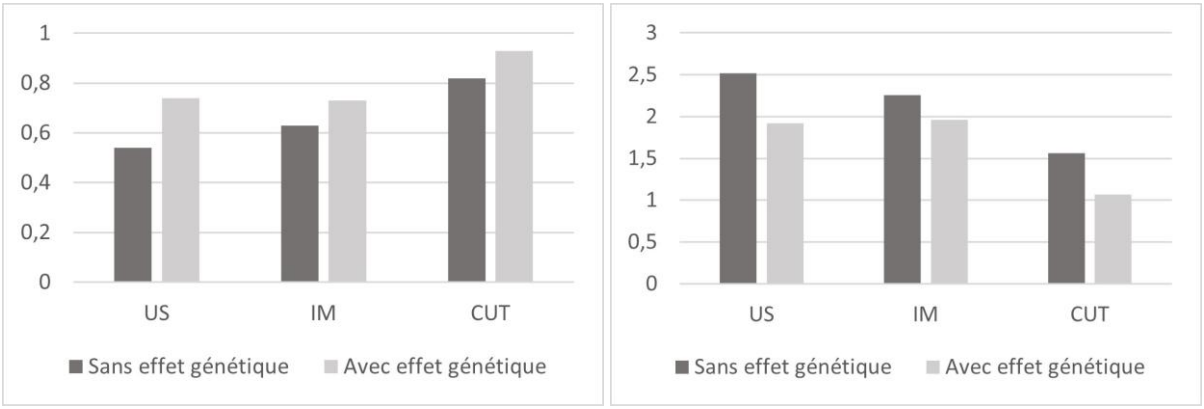


Figure 2 : R2 (à gauche) et ETR (à droite) de la régression du TMC (taux de muscle de la carcasse) par méthode, sans et avec effet génétique. US : ultrasons, IM : Image-Meater, CUT : méthode de découpe.

3.2. Efficience alimentaire et croissance musculaire

Les statistiques descriptives des caractères explorés pour une approche basée sur la collecte d'information sur la composition corporelle mesurée *in vivo* sont présentées dans le Tableau 2. Des effectifs très variables selon le type génétique et le caractère étudié sont observés. C'est particulièrement le cas en race Piétrain avec des effectifs inférieurs à 20 observations pour les critères mesurés *post mortem* sur demi-carcasses. Concernant les performances, nous avons observé que la croissance musculaire ($GMQm_{[35-70]}$ et $GMQm_{[35-PM]}$) et l'efficacité alimentaire rapportées au muscle ($ICm_{[35-70]}$ et $ICm_{[35-PM]}$) étaient significativement supérieures (p-value<0,001) en Piétrain comparées à celles calculées en lignées femelles, alors qu'il n'y avait pas de différence significative entre ces types génétiques pour le GMQ et l'IC.

La Figure 3 présente les corrélations phénotypiques estimées entre les différents caractères explorés après correction pour l'effet bande. Les corrélations estimées entre $GMQm_{[35,70]}$ et $GMQm_{[35,PM]}$ étaient supérieures à 0,70 quel que soit le type de lignées étudiées. Les corrélations estimées entre ces deux critères et le GMQ étaient inférieures à 0,60 en lignées femelles. En Piétrain, la corrélation entre $GMQ_{[35,70]}$ et GMQ était égale à 0,35, alors qu'elle n'était pas significativement différente de zéro entre $GMQm_{[35,PM]}$ et GMQ. Concernant les corrélations entre $ICm_{[35,70]}$ et $ICm_{[35,PM]}$, elles s'élevaient à 0,75 et 0,80 en Piétrain et lignées femelles, respectivement. Les corrélations entre ces deux critères et l'IC mesuré sur l'ensemble de la période de contrôle au DAC, tel qu'il est mesuré en élevage de sélection, étaient modérées et proches de 0,5 en lignées femelles. En Piétrain, la corrélation estimée entre $ICm_{[35,PM]}$ et IC était du même ordre de grandeur. En revanche, elle n'était pas significativement différente de zéro entre $ICm_{[35,70]}$ et IC.

Tableau 2 : Statistiques descriptives des caractères d'efficience alimentaire et de croissance en lignées femelles et en Piétrain. GMQm : gain musculaire quotidien moyen, ICm : indice de consommation moyen par kg de gain de muscle, PM : post mortem, TMC : taux de muscle de la carcasse.

	Lignées femelles			Piétrain		
Caractères	Effectifs	Moyenne	Ecart-type	Effectifs	Moyenne	Ecart-type
GMQ, g/j	168	981	116,4	77	965	124,0
IC, kg/kg	167	2,43	0,23	77	2,42	0,26
$GMQm_{[35,70]}$, g/j	157	474	40,4	56	522	35,5
$GMQm_{[35,PM]}$, g/j	91	439	46,5	18	504	45,7
$ICm_{[35,70]}$, kg/kg	157	4,41	0,61	57	4,07	0,40
$ICm_{[35,PM]}$, kg/kg	91	5,98	0,74	18	4,75	0,50
TMC, %	95	63,14	3,14	19	65,75	2,82

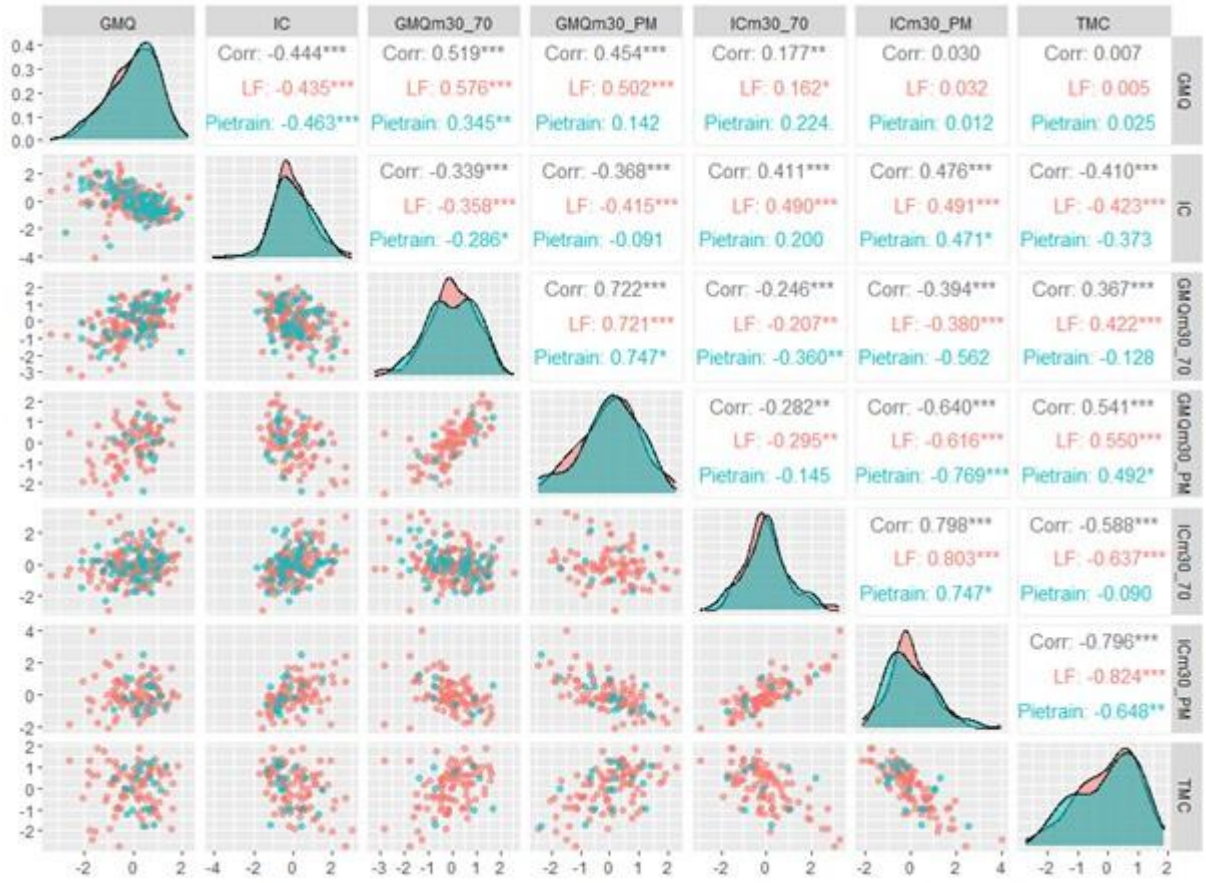


Figure 3 : Corrélations phénotypiques entre les caractères d'efficience alimentaire et de croissance en lignées femelles (LF) et en Piétrain. « Corr » correspond à la corrélation estimée sur l'ensemble de l'échantillon, LF et Piétrain confondus.

Les corrélations entre les différents critères de croissance et les différents indicateurs d'efficacité alimentaire étaient toutes favorables. La corrélation la plus forte a été estimée entre $GMQm_{[35,PM]}$ et $ICm_{[35,PM]}$ (-0,62 en lignées femelles et -0,77 en Piétrain).

Les corrélations entre le TMC et les caractères de croissance ou d'efficacité alimentaire mesurés par tomodensitométrie étaient toutes favorables et modérées à fortes. La corrélation la plus forte a été estimée entre le TMC et l'$ICm_{[35,PM]}$, avec une corrélation de -0,82 et -0,65 en lignées femelles et Piétrain, respectivement. Le GMQ était quant à lui indépendant de la composition en muscle de la carcasse.

4. Discussion et conclusion

4.1. Composition corporelle

La littérature recense de nombreuses méthodes permettant de mesurer la composition des carcasses de porcs de façons objectives et précises (Delgado-Pando *et al.*, 2021). Cependant, ces méthodes se confrontent souvent aux contraintes liées aux schémas de sélection. La sélection de reproducteurs nécessite d'enregistrer des phénotypes à l'échelle de l'individu et non d'un groupe, de façon précise et sur un grand nombre d'animaux. La traçabilité à l'individu en abattoir rend difficile la collecte de performances sur des collatéraux et ne permet pas l'acquisition précoce d'informations sur les candidats à la sélection. Cela oblige les établissements de sélection porcine à explorer d'autres modes d'acquisition de données. Des travaux ont déjà porté sur le référencement de méthodes non invasives destinées à la mesure de la composition corporelle (Delgado-Pando *et al.*, 2021 ; Scholz *et al.*, 2015). Parmi les technologies évoquées, la tomographie à rayons X et les ultrasons sont déjà exploités dans les schémas de sélection (Scholz *et al.*, 2015 ; Kongsro *et al.*, 2017). La méthodologie développée par Daumas et Monziols (2011) permet de mesurer la masse de muscle de la carcasse par tomographie, et le projet EFFISCAN s'inscrit dans cette continuité en exploitant les informations collectées *in vivo* pour le développement d'indicateurs non-invasifs, précis, économiques, faciles et rapides à mesurer.

Les caractères mesurés actuellement par ultrasons pour améliorer la teneur en viande maigre dans les schémas de sélection se focalisent sur l'épaisseur de muscle à un site anatomique sans tenir compte de l'ensemble des informations disponibles sur l'animal. La méthode de prédiction de la teneur en muscle qui offre les meilleures performances est, comme attendue, la méthode basée sur la découpe partielle de la carcasse (CUT), qui inclut la proportion de gras dorsal, suivie par la méthode basée sur l'Image-Meater (IM), qui inclut des épaisseurs de gras et de muscle. Cette dernière est utilisée pour la classification des carcasses sur les chaînes d'abattage (Blum *et al.*, 2014). La prise en compte du type génétique permet la diminution de l'erreur de prédiction quelle que soit la méthode (diminution de l'erreur de 30 % pour la méthode de CUT). Bien que les méthodes CUT et IM soient plus précises, elles présentent les inconvénients évoqués dans le paragraphe précédent, i.e. ces données ne peuvent être recueillies sur des candidats à la sélection.

Nos résultats montrent également que, bien que cela soit moins performant, il est possible d'estimer relativement précisément le TMC en se basant sur des données issues de mesures par échographie (US) en intégrant les épaisseurs dorsales de gras et de muscle aux modèles de prédiction. Les modèles de prédiction US développés n'ont en revanche pas été challengés sur un jeu de données de validation, les effectifs intra-race étant trop faibles pour réaliser une validation croisée. Certaines images issues du scanner n'ayant pas été exploitées pour le moment, cette validation sera envisagée ultérieurement. Les résultats obtenus seront confrontés au règlement (UE) 2017/1182 de la Commission Européenne régissant les méthodes de classement des carcasses comme définies ci-après : la méthode de classification doit faire l'objet d'un test de validation sur un échantillon d'au moins 120 porcs, et présenter une erreur quadratique de prédiction inférieure à 2,5 points. D'un point de vue génétique, il sera également intéressant de confronter les résultats obtenus avec la méthode US à ceux obtenus via une estimation directe du TMC par le scanner. Kongsro *et al.* (2017) ont montré que le TMC estimé par tomographie présentait une héritabilité de 0,50 à 0,58 selon le type génétique. La bonne performance du modèle basé sur les US peut en partie s'expliquer par la corrélation génétique forte et favorable entre le TMC et l'épaisseur de lard dorsal (entre -0,66 et -0,73 selon le type génétique d'après Kongsro *et al.*, 2017).

4.2. Développement de nouveaux caractères liés à la croissance et l'efficacité alimentaire

Les critères développés dans cette étude, basés sur la croissance musculaire (GMQm et ICm) sont des critères originaux et non documentés dans la littérature avant cette étude (Daumas *et al.*, 2022). Ces

critères semblent avoir un déterminisme commun avec leurs homologues mesurés classiquement dans les schémas de sélection sans être complétement similaires. Ce résultat diffère de ceux présentés par Daumas *et al.* (2023) qui observaient une corrélation proche de 1 entre le GMQm et le GMQ (r=0,92) en lignées femelles sur les animaux issus du même protocole expérimental. Cette différence s'explique notamment par le fait que dans l'étude de Daumas *et al.* (2023), la quantité de muscle autour de 35 kg de poids vif a été estimée comme une fonction linéaire du poids vif (45 % du poids vif), les données issues des scans réalisés *in vivo* à 35 kg n'étant pas disponibles au moment de la publication de ces résultats préliminaires.

Nos résultats montrent également une relation plus forte entre ICm et GMQm, entre 35 kg et l'abattage (PM), qu'entre IC et GMQ. Cette relation plus favorable permet d'envisager d'orienter les efforts de sélection sur un seul caractère, si ces critères présentent une variabilité génétique suffisante pour envisager une sélection. L'ICm présente l'avantage d'être le plus favorablement corrélé au TMC tout en travaillant sur le levier valorisation de l'aliment pour la production d'un kg de protéines. Un tel critère pourrait améliorer considérablement le bilan environnemental de la production de viande porcine. En revanche, l'allocation de ressources pour le développement musculaire ne doit pas se faire au détriment des autres critères d'intérêt pour garantir la multi-performance des élevages de porcs, tels que la reproduction, la longévité fonctionnelle, la qualité organoleptique ou encore technologique des produits. Par exemple, sélectionner des animaux sur leur capacité à valoriser les aliments pour la production de viande peut avoir un impact sur les réserves corporelles en fin d'engraissement (Patience *et al.*, 2015), pouvant impacter les performances des truies au cours de leur carrière. Les réserves corporelles sont effectivement un facteur clé impliqué dans la lactation des truies et leur capacité à sevrer (Bunter *et al.*, 2010 ; Hermesch *et al.*, 2010).

4.3 Perspectives

Les mesures par tomographie ouvrent la perspective de pouvoir accéder plus facilement, et de façon moins onéreuse, à un ensemble de critères qui impliquaient auparavant des mesures lourdes et destructives par dissection. La sélection des reproducteurs devrait être améliorée par l'introduction d'un critère de composition de précision et d'un critère d'efficience alimentaire rapportés au gain de muscle. Il est toutefois hâtif d'envisager une sélection génétique sur ces caractères en l'état actuel des connaissances. Cependant, cette étude, et l'imagerie plus généralement, ouvrent également la voie à de nouveaux caractères plus précis s'inscrivant parfaitement dans les objectifs actuels de durabilité des élevages.

Cette étude devra être poursuivie par un dispositif dédié destiné à la collecte de phénotypes sur des populations porcines en sélection afin d'explorer le déterminisme génétique de ces caractères ainsi que les corrélations génétiques avec d'autres critères zootechniques, aussi bien en matière de production que de reproduction. Une stratégie de sélection en deux temps pourra également être étudiée, comme c'est le cas en ovins (Bünger *et al.*, 2011), en intégrant la tomodensitométrie comme outil complémentaire aux mesures obtenues par ultrasons afin d'estimer des valeurs génétiques plus précises pour les candidats à la sélection et les reproducteurs.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Cet article a été rédigé par Sandrine Schwob et Maxime Banville, puis relu et approuvé par l'ensemble des co-auteurs.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel de la station de phénotypage de l'INRAE UE3P du Rheu, ainsi que les partenaires d'Alliance R&D, et toutes les personnes ayant participé au projet.

Déclaration de soutien financier

Le projet EFFISCAN a reçu le soutien financier du ministère en charge de l'Agriculture à travers les fonds du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural (AAP CASDAR RT 2018).

Références bibliographiques

Blum Y., Monziols M., Causeur D., Daumas G., 2014. Recalibrage de la principale méthode de classement des carcasses de porcs en France. Journées Rech. Porcine, 46, 39-44.

Bünger L., Glasbey C.A., Simm G., Conington J., Macfarlane J.M., McLean K.A., Moore K., Lambe N.R., 2011. Use of X-ray computed tomography (CT) in UK sheep production and breeding. Intech Open Access Publisher, 329-348.

Bunter K.L, Lewis C.R.G., Hermesch S., Smits R., Luxford B.G., 2010. Maternal capacity, feed intake and body development in sows. Proc. 9th World Cong. Genet. Appl. Livest. Prod., Leipzig, Germany.

Daumas G., Hassenfratz C., Monziols M., 2023. Gain de muscle et indice de consommation rapporté au muscle mesurés par tomodensitométrie en sélection porcine. Journées Rech. Porcine, 55, 341-342.

Daumas G., Monziols M., 2011. An accurate and simple Computed Tomography approach for measuring the lean meat percentage of pig cuts. Proceedings of 57th International Congress of Meat Science and Technology, Ghent, Belgium, article 061.

Daumas G., Monziols M., 2016. La tomographie à rayons X : référence pour la classification des porcs. Les cahiers de l'IFIP, 3(1), 59-72.

Daumas G., Monziols M., Causeur D., 2017. Conséquences de l'automatisation du classement des carcasses sur les écarts entre type sexuels et génotypes halothane. Journées Rech. Porcine, 49, 53-54.

Daumas G., Monziols M., Quiniou N., 2022. Mesurer par scanner la composition tissulaire, le gain de muscle et l'indice de consommation par kg de muscle. Journées Rech. Porcine, 54, 111-116.

Delgado-Pando G., Allen P., Troy D.J., McDonnell C.K., 2021. Objective carcass measurement technologies: Latest developments and future trends. Trends in Food Science & Technology, 111, 771-782.

Hermesch S., Jones R.M., Bunter K.L., Gilbert H., 2010. Consequences of selection for lean growth and prolificacy on sow attributes. Proceedings of 9th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Leipzig, Germany.

Kongsro J., Gangsei L.E., Karlsson-Drangsholt T.M., Grindflek E., 2017. Genetic parameters of *in vivo* primal cuts and body composition (PigAtlas) in pigs measured by computed tomography (CT). Translational Animal Science, 1(4), 599-606.

Monziols M., Hemonic A., Vautier B., Brossard L., Van Milgen J., Quiniou N., 2014. Utilisation de la tomographie RX pour étudier l'évolution de la composition corporelle au cours de la croissance chez des porcs alimentés à volonté ou rationnés. Journées Rech. Porcine, 46, 45-50.

Patience J.F., Rossoni-Serão M.C., Gutiérrez N.A., 2015. A review of feed efficiency in swine: biology and application. Journal of animal science and biotechnology, 6, 1-9.

Schloerke B., Cook D., Larmarange J., Briatte F., Marbach M., Thoen E., Elberg A., Crowley J., 2024. *GGally:Extension to 'ggplot2'*. R package version 2.2.1, https://github.com/ggobi/ggally, https://ggobi.github.io/ggally/.

Scholz A.M., Bünger L., Kongsro J., Baulain U., Mitchell A.D., 2015. Non-invasive methods for the determination of body and carcass composition in livestock: dual-energy X-ray absorptiometry, computed tomography, magnetic resonance imaging and ultrasound: invited review. Animal, 9(7), 1250-1264

Pour citer cet article : Sandrine Schwob, Mathieu Monziols, Delphine Loiseau, Claire Hassenfratz, Maxime Banville. EFFISCAN : Nouveaux critères d'efficience alimentaire et de composition corporelle par scanner dédiés à la sélection porcine. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.316-327. 10.17180/ciag-2025-vol107-art23

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Vinimag : système automatisé de microvinification (<1 kg) dédié aux vins rouges pour l'expérimentation viti-vinicole.

Marie-Agnès DUCASSE[1], Amélie ROY[1], Denis CABOULET[1], François DAVAUX[2], Jean-Michel DESSEIGNE[3], Philippe COTTEREAU[3], Yannick SIRE[4], Magali BES†[4], Evelyne AGUERA[4], Jean-Marie SABLAYROLLES[5], Jean-Roch MOURET[5], Marc PEREZ[5].

[1] IFV, Pôle Sud-Ouest, Domaine de Pech Rouge 11430 Gruissan, France

[2] IFV, Pôle Sud-Ouest, 1920 Route de Lisle sur Tarn 81310 Peyrole, France

[3] IFV, Pôle Rhône Méditerranée, 7, Avenue Yves Cazeaux 30230 Rodilhan, France

[4] INRAE, UE Pech Rouge 11430 Gruissan, France

[5] INRAE, UMR SPO 1083, 2, place Pierre Viala 34060 Montpellier cedex 2, France

Correspondance : marie-agnes.ducasse@vignevin.com

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art24

Résumé

La vinification est une étape clef dans de nombreuses expérimentations viticoles et œnologiques et sa mise en œuvre maîtrisée apparaît incontournable. Actuellement, l'évaluation de l'impact des différents facteurs viti-vinicoles est réalisée lors de vinifications en volume entre 50 et 100 L, conduites pour être représentatives de vinifications à l'échelle industrielle. Toutefois, cette échelle expérimentale nécessite une disponibilité suffisante de la matière première et une main d'œuvre importante. Des dispositifs de vinification à l'échelle laboratoire (≤1 L) et en 10 L, en phase liquide (vinifications en blanc, rosé et thermovinification) sont déjà disponibles. Cependant, concevoir un dispositif automatisé permettant la conduite en phase hétérogène de vinifications en rouge de petits lots de raisins (<1 kg) a été un réel défi technique. Cet article présente la méthodologie de prototypage du système automatisé de fermentation Vinimag ainsi que les essais effectués pour mettre au point la régulation, le contrôle des températures de chaque fermenteur, le suivi de la couleur au cours de la fermentation alcoolique. Les applications potentielles d'un tel dispositif sont nombreuses aussi bien pour du criblage et l'étude de produits œnologiques (levures, bactéries, enzymes, …) que pour répondre aux besoins de phénotypage œnologique de l'innovation variétale (beaucoup de génotypes à étudier, peu de raisins).

Mots-clés : prototypage, automatisation, analyse fonctionnelle, fermentation

Abstract: Vinimag: Automated microvinification system (<1 kg) dedicated to red wines for viticultural experimentation.

Vinification is a key stage in many viticultural and oenological experiments, and its controlled implementation is essential. At present, the impact of different wine-making factors is assessed during vinifications in volumes of between 50 and 100 litres, which are designed to be representative of vinifications on an industrial scale. However, this experimental scale requires sufficient availability of raw materials and a large workforce. Laboratory-scale (≤1L) and 10L liquid-phase vinification systems (white, rosé and thermovinification) are already available. It was a real technical challenge to design an automated system that could be used for heterogeneous-phase red vinification of small batches of grapes (<1kg). This article presents the methodology used to prototype the Vinimag automated fermentation system, as well as the tests carried out to perfect the regulation and temperature control of each fermenter and the monitoring of colour during fermentation. The potential applications of such a system are numerous, both for screening and studying oenological products (yeasts, bacteria, enzymes,

etc.) and for meeting the oenological phenotyping needs of plant breeding (many genotypes to study, few grapes).

Keywords: prototyping, automation, functional analysis, fermentation

1. Introduction

1.1. Contexte et partenariat

Depuis plus de 20 ans, la vinification à l'échelle pilote et en petit volume <1 L est une échelle déjà couramment utilisée au sein de l'INRAE (UEPR et UMR-SPO) (Casalta *et al*. 2010, Mouret *et al*. 2021), pour les études de cinétiques fermentaires, de caractérisation de la physiologie ou de la génomique de la levure. Les vinifications en 1 L ou moins sont réalisées sur des moûts synthétiques, ou sur des moûts réels produits à l'échelle industrielle et conservés par congélation. La mise en œuvre de volumes plus réduits est également possible sur PhenOFerm, la plateforme robotisée de fermentation conçue ad hoc par l'UMR SPO (Plateau Technique Fermentation). Si cet outil est adapté aux études menées en phase liquide (milieu synthétique liquide, vins blancs, rosés, rouges issus de thermo traitement), la vinification traditionnelle en rouge en phase hétérogène (présence de jus et de marcs) pose une problématique technique d'un point de vue automatisation. En effet, il n'intègre pas les étapes d'élaboration des moûts sur faible quantité de raisin rouge et ne permet pas de conduire la fermentation en phase « solide » (c'est-à-dire en présence du marc). Cette fermentation a un mode de conduite spécifique dû à l'hétérogénéité du milieu. Elle requiert des opérations de remontages/pigeages pour favoriser l'échange et l'extraction des composés d'intérêt entre la phase solide et le jus. Réfléchir et concevoir un dispositif permettant de conduire des vinifications de petits lots de vendange (<1 kg) en phase hétérogène a demandé de mettre en place une méthode de prototypage afin de relever ce défi technique. Ainsi, au sein du partenariat IFV/INRAE de l'UMT Minicave, ce projet a eu pour problématique la mise au point d'un dispositif automatisé, nommé Vinimag, équipé pour permettre le suivi en ligne de divers paramètres : fermentation, température, extraction de la couleur. Cet article présente la conception du système automatisé de vinifications en petit volume (<1 kg) en rouge, dimensionné de manière adéquate, permettant :

- la maîtrise et la reproductiblité des expérimentations viti-vinicoles impliquant des vinifications, par la mise en œuvre systématique de triplicats ;
- la gestion automatisée des échanges jus/marc;
- le suivi en ligne de la cinétique fermentaire;
- le suivi en ligne de l'extraction de la couleur.

Aucun outil automatisé n'existait pour ce type de vinification en petit volume en rouge. Le projet a permis de développer ce dispositif avec des contraintes acceptables en matière de temps de mise en œuvre, de quantité de raisins, de coût, permettant de réaliser un grand nombre de vinifications avec des mesures en ligne fiables et répétables.

1.2. Etat de l'art sur la microvinification à l'échelle du litre et du kilogramme

Un certain nombre de publications se base sur des expérimentations utilisant des micro-vinifications en phase hétérogène (Belda *et al*. 2016 ; Bindon, Kassara, *et al*. 2014 ; Cerpa-Calderon et Kennedy 2008 ; Chalmers *et al*. 2010 ; Dambergs et Sparrow 2010 ; Sampaio *et al*. 2007 ; Sparrow et Smart 2015). Deux études ont été menées afin de comparer les extractions de polyphénols lors de vinifications de petits volumes (250 mL, 1 L, 1,5 L, 4 L et 20 L) par rapport à des échelles plus grandes (360 L et 780 L) (Sampaio *et al*. 2007 ; Sparrow et Smart 2015). Lors des essais, différents récipients ont été utilisés

comme fermenteurs : des béchers (Sparrow *et al*. 2015), des bocaux en verre (Sampaio *et al*. 2007), des cafetières à pistons (Bindon *et al*. 2014 ; Sparrow et Smart 2015 ; Dambergs et Sparrow 2010), ou plus simplement des seaux en plastique (Sparrow et Smart 2015). La technique de la cafetière à piston utilisée par l'AWRI (Australian Wine Research Institute, Photo 1) permet d'immerger facilement le chapeau de marc et d'effectuer des « pigeages » une à deux fois par jour, sans avoir à ouvrir le fermenteur (Dambergs et Sparrow 2010 ; Bindon *et al*. 2014 ; Sparrow et Smart 2015).



Photo 1 : Cafetière à piston illustrant le maintien du marc immergé par le piston (Dambergs *et al.* 2010).

Dans d'autres études, le chapeau est maintenu immergé tout au long de la fermentation par l'intermédiaire d'une plaque en plastique (Sampaio *et al* 2007 ; Sparrow *et al*. 2015). Lors de certaines expérimentations, des mesures sont réalisées seulement en fin de fermentation pour confirmer l'absence de sucres résiduels (Chalmers *et al*. 2010 ; Sparrow *et al*. 2015). Enfin, lorsque les fermentations sont terminées, les phases solides et liquides sont séparées. Cette séparation est aisée pour les cafetières à piston où ce dernier est maintenu en position basse. Dans les autres cas, le chapeau peut être filtré (Sampaio *et al* 2007), ou pressuré à la main, à l'aide d'un tamis en fibre de verre (Sparrow *et al*. 2015). Dans tous les cas, les moûts sont levurés et les fermenteurs sont placés dans des salles thermo-régulées aux alentours de 25°C-30°C.

Ces expérimentations démontrent la faisabilité et l'intérêt de l'utilisation des fermentations en petit volume mais ces outils ne sont pas optimisés. De plus, les différentes étapes et suivis ne sont pas automatisés, ce qui est problématique pour réaliser en parallèle un grand nombre de fermentations et faire des triplicats pour apporter de la robustesse aux expérimentations ainsi que pour obtenir des données en cours de fermentation.

2. Matériels et méthodes

2.1. Méthode de prototypage : la conception de Vinimag

Les enjeux autant que les attentes autour de la conception d'un dispositif automatisé de fermentation en rouge en petit volume nous ont conduits à mettre en place un processus formalisé qui nous permette de relever ce défi. La démarche choisie reprend des méthodes de travail classiquement mises en œuvre dans le prototypage et/ou le développement de nouveaux produits. La première étape a été la mise en place d'un groupe de prototypage de 12 personnes INRAE et IFV, aux compétences très variées et complémentaires. Six ingénieurs et techniciens IFV avec des compétences en procédés et en œnologie sont venus compléter le savoir-faire et l'expérience en recherches fermentaires de l'INRAE. Marc Perez (INRAE, UMR SPO) formé lors d'une école technique aux méthodes pour la création de prototypes a animé ce groupe et mis en place la méthode de prototypage (Perez, 2018).

2.1.1. Analyse du besoin

Le travail de ce collectif a débuté par l'analyse du besoin. Cette phase est primordiale, car dans ce type de démarche et au fur et à mesure de son avancement, un biais apparait qui conduit en fin de processus, à une partie du besoin non satisfaite et une réponse à un besoin non demandé. Plusieurs facteurs peuvent se combiner et conduire à cette dérive : besoin mal exprimé, mal compris, mauvais choix technique, etc (Figure 1).

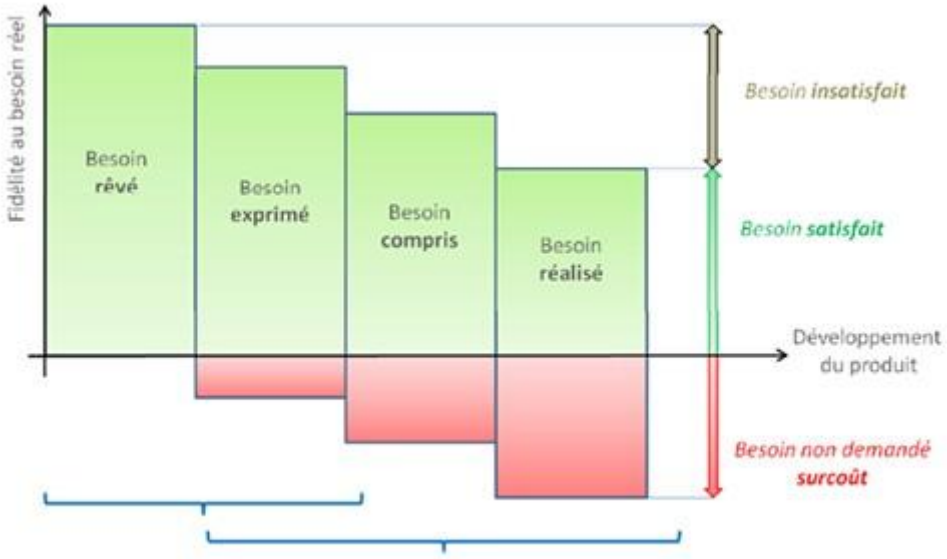


Figure 1 : Gestion du risque par rapport à la satisfaction du besoin.

Des échanges cadrés ont donc été mis en place sous forme d'atelier entre « demandeur » et « concepteur ». L'objectif était (i) d'amener le demandeur, qui est face à un problème à énoncer un besoin (sans référence aux solutions), (ii) de permettre au concepteur de recueillir la demande et si nécessaire d'obtenir des précisions. A partir de ces premiers échanges, le concepteur a réalisé un travail d'analyse du besoin (Figure 2). L'analyse du besoin a conduit à identifier les phases d'usages du futur dispositif.

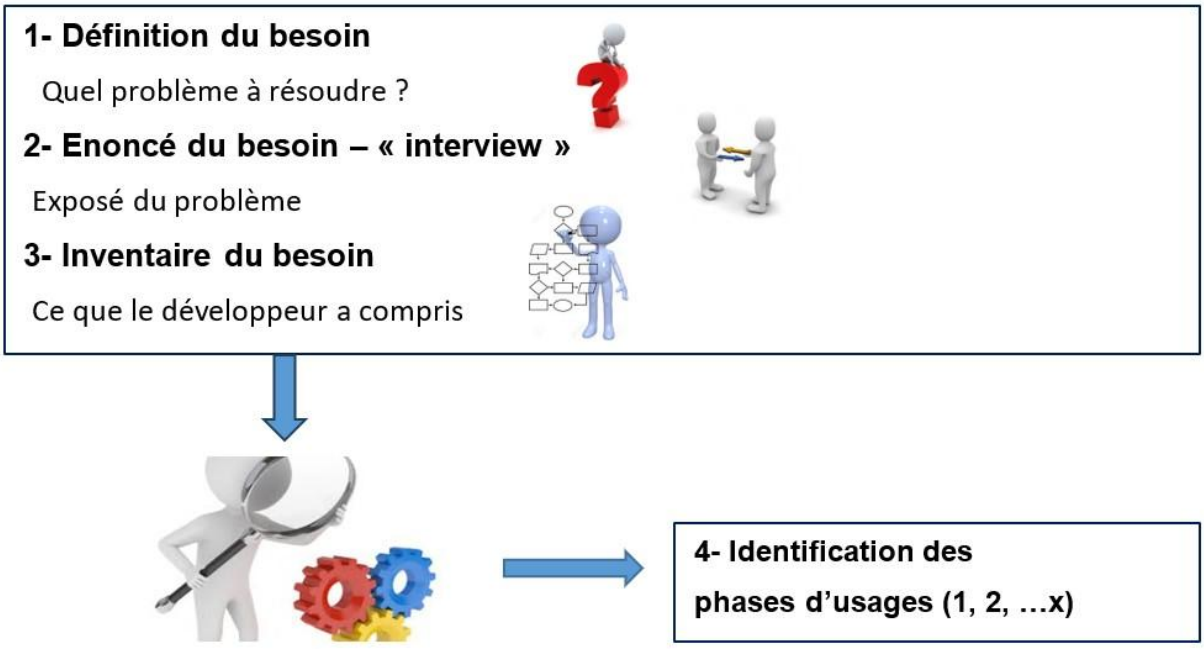


Figure 2 : Principe des ateliers « demandeurs/concepteurs ».

Dans ce projet de conception d'un dispositif automatisé de fermentation en rouge en petit volume, il est apparu que l'analyse du besoin devait se faire en priorité sur des tests de solutions de régulation de température de suivi de fermentation et de la couleur sur un seul fermenteur avant d'aborder l'aspect

automatisation et multiplication des essais. Cinq phases d'usages ont été identifiées sur le fermenteur : le remplissage, la macération, la fermentation, l'ajout d'intrant, le pressurage.

2.1.2. Analyse fonctionnelle

Les phases d'usages identifiées, l'étape suivante a consisté à réaliser une analyse fonctionnelle pour chacune de ces phases. L'objectif à ce stade est de rechercher les fonctions principales (service, action) qui satisfont les besoins, et les fonctions de contrainte (environnement, règles…) qui imposent une limitation dans la conception et/ou la réalisation. La Figure 3 et le Tableau 1 est l'exemple de l'analyse fonctionnelle pour la phase de remplissage du fermenteur. L'outil à développer est placé au centre du graphique, les éléments avec lesquels le fermenteur sera en interaction au cours de cette phase sont placés autour. Les fonctions principales (FP) et de contraintes (FC) sont figurées par des liens entre les différents éléments.

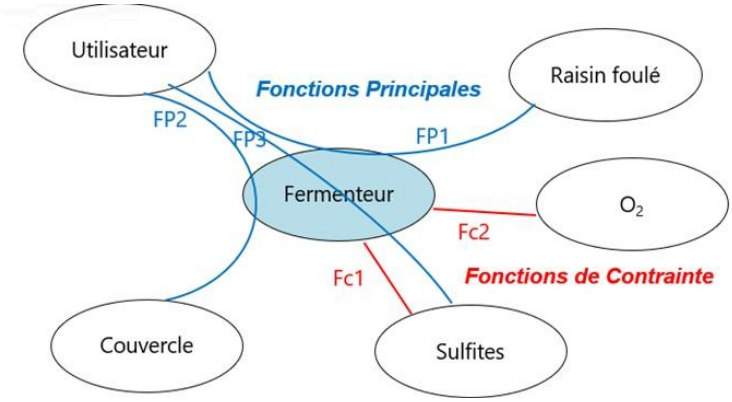


Figure 3 : Analyse fonctionnelle de la phase d'usage « remplissage du fermenteur ».

Tableau 1 : Fonctions principales (FP) et de contraintes (Fc) de la phase d'usage « remplissage du fermenteur ».

n° fonctions	Fonctions
FP1	L'utilisateur doit introduire le raisin foulé dans le fermenteur
FP2	L'utilisateur doit manipuler le couvercle
FP3	L'utilisateur doit ajouter des sulfites
Fc1	Suite au sulfitage, homogénéisation nécessaire
Fc2	Protection du mout vis-à-vis de l'oxygène

Les fonctions recensées pour la phase sont ensuite ordonnées et caractérisées selon des critères d'appréciation, et des niveaux de flexibilité. Le Tableau 2 illustre l'exemple de la caractérisation des fonctions de la phase d'usage « remplissage ». Le critère correspond au caractère retenu pour évaluer la manière dont une fonction est remplie ; le niveau, à la grandeur visée pour le critère d'appréciation ; la flexibilité F, l'ensemble d'indications exprimées par le demandeur sur les possibilités de moduler le niveau recherché pour un critère. La classe de flexibilité : (F0 à F3) est une indication placée auprès d'un critère d'appréciation permettant de préciser son degré de négociabilité. La limite d'acceptation est le niveau du critère d'appréciation où au-delà, le besoin est jugé non satisfait.

Tableau 2 : Caractérisations des fonctions de la phase d'usage « remplissage »

Fonctions	Critères	Niveaux	Flexibilité	Limite d'acceptation
Remplir de baies	Poids	1 kg	F1	+/-100 g

foulées				
Ajouter SO_2	Volume	0 à 5 g/hL	F3	Suivant objectif du protocole
Protection du moût	O_2	Durée préparation des moûts	F1	A standardiser pour robustesse des essais

Le groupe prototypage a réalisé ce travail d'analyse fonctionnelle et de caractérisation des fonctions sur toutes les phases d'usage identifiées.

Cette démarche basée sur une analyse fonctionnelle a conduit le groupe d'experts à réfléchir sur les solutions techniques envisageables pour le suivi de la température, de la fermentation et de la couleur d'abord sur un fermenteur. De plus, le dispositif final « le Vinimag » étant complexe, il était nécessaire de formuler le besoin sous forme de plusieurs fonctions que devra réaliser le dispositif. La dernière étape a donc été de réaliser l'analyse fonctionnelle pour l'ensemble du système automatisé (Figure 4 et Tableau 2).

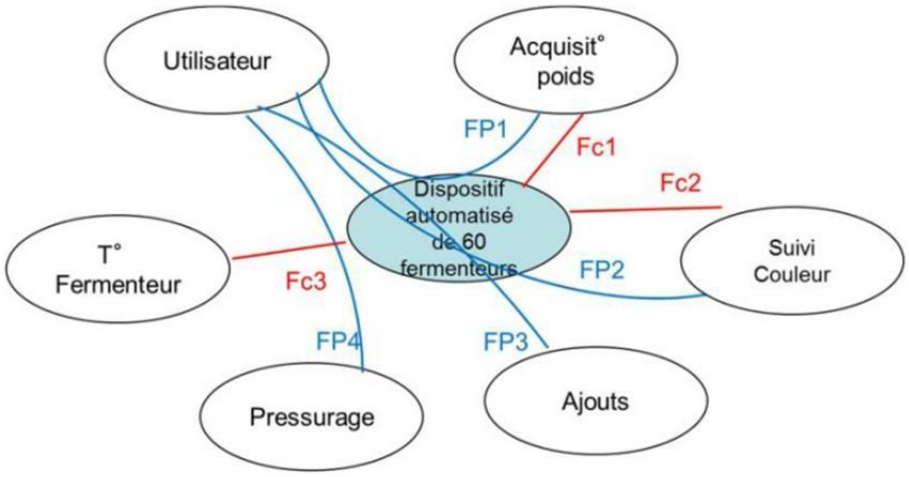


Figure 4 : Analyse fonctionnelle et expression globale des fonctions du système automatisé.

Tableau 3 : Fonctions principales (FP) et de contraintes (Fc) du système.

n° fonctions	Fonctions
FP1	L'utilisateur peut programmer une mesure de poids et de façon automatisée sur chacun des fermenteurs
FP2	L'utilisateur peut programmer une mesure de de la couleur des fermenteurs par capteur optique de façon automatisée
FP3	L'utilisateur peut programmer des ajouts liquide ou gazeux ponctuels de façon automatique
FP4	L'utilisateur peut intervenir sur la plateforme pour transférer de façon manuelle un fermenteur pour une opération de pressurage en cours ou en fin de fermentation alcoolique
Fc1	La fréquence du suivi de la cinétique fermentaire ≤ 1h
Fc2	La fréquence du suivi de la couleur ≤ 1h

Fc3	La température du fermenteur est mesurée et maitrisée pendant les différentes opérations

L'ensemble de ce travail de prototypage a permis la rédaction d'un cahier des charges techniques précis qui a servi de base pour établir le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) du marché public du dispositif Vinimag.

2.2. Solutions techniques pour optimiser les suivis en ligne (température, CO_2, couleur)

Afin d'optimiser les suivis, un fermenteur unique a été équipé pour être suivi en ligne : une balance pour mesurer le dégagement de CO_2, 2 prototypes de régulation de température, un capteur L*,a*,b* (coordonnées tristimulaires CIELAB) en réflectance pour la couleur.

2.2.1. Suivi du dégagement du CO_2

Le fermenteur est placé sur une balance. Lors de la fermentation, le sucre est transformé en alcool et en CO_2. Le dégagement de CO_2 entraîne une perte de poids mesurée à l'aide de la balance. Le suivi de la perte de poids (Figure 5) permet ainsi de déduire la quantité de CO_2 dégagé (Figure 6) ainsi que l'éthanol produit et le sucre consommé (le rendement de conversion est identique pour toutes les souches, moûts et température de fermentation).

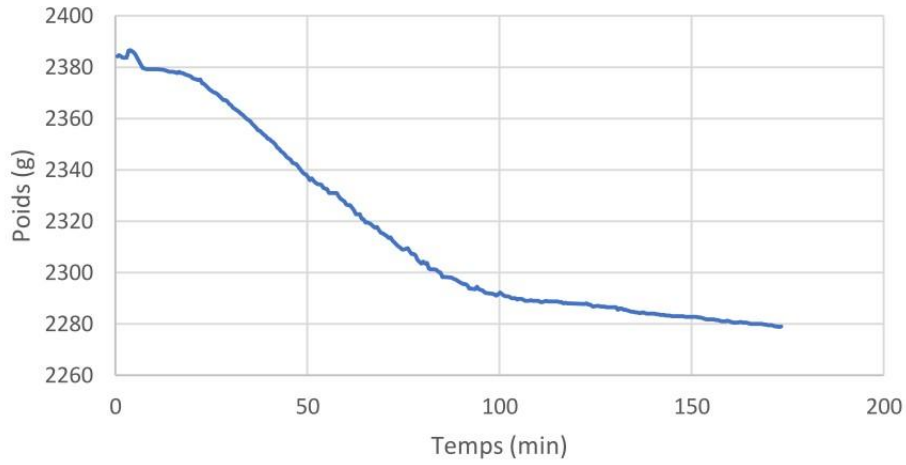


Figure 5 : Suivi de la perte de poids du fermenteur au cours de la fermentation d'un mout de Grenache.

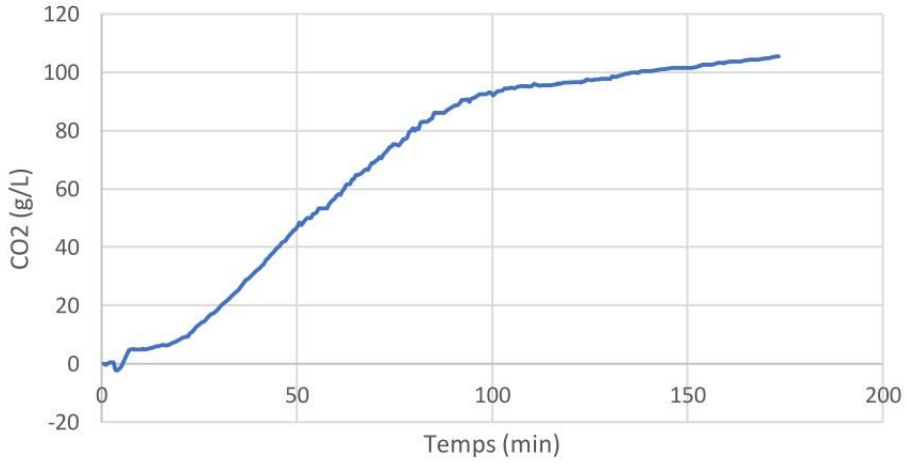


Figure 6 : Calcul et suivi du CO_2 dégagé à partir de la perte de poids mesuré au cours de la fermentation.

Ces premières mesures sur un fermenteur unique ont montré que le signal était légèrement bruité pour des mouts en phase hétérogène. Sur le système automatisé, une cadence de mesure relativement élevée et un lissage du poids ont donc été envisagé pour affiner le suivi fermentaire par dégagement du CO_2.

2.2.2. Contrôle et régulation de température

La réaction de fermentation avec dégagement de CO_2 est exothermique et doit être régulée en température. Le fermenteur est placé dans une pièce thermorégulée à froid et un système de chauffage a été envisagée pour réguler les fermentations en température. Deux prototypes de régulation ont été testés (société ISP Aquitaine, Société Occion) pour la régulation de température.

Prototype avec ceinture chauffante et sonde insérée dans l'enveloppe en contact avec le fut inox entourant le fermenteur (système ISP Aquitaine) :

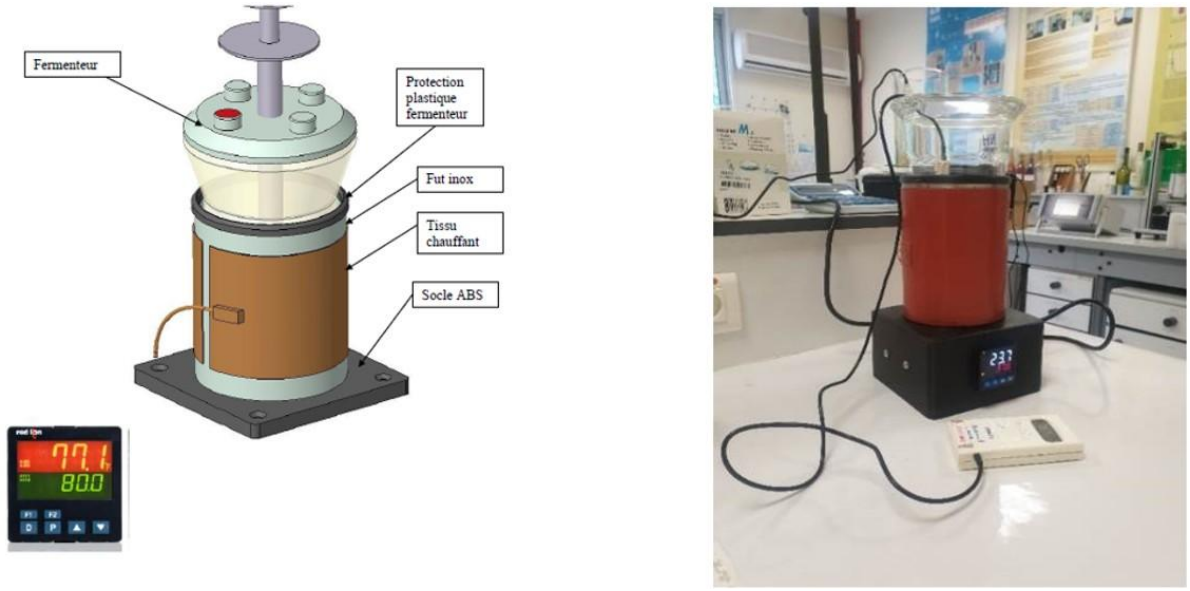


Figure 7 : Principe de système de régulation de température par ceinture chauffante (ISP Aquitaine).

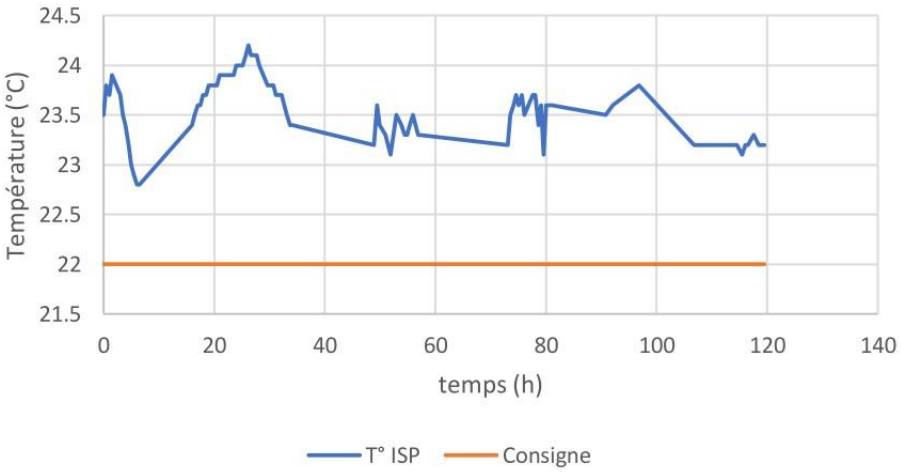


Figure 8 : Exemple de régulation de température durant une fermentation de moût rouge avec le système à ceinture chauffante.

Le système (Figure 7) est placé dans une pièce à 18°C, une température de consigne à 22°C est appliquée durant la fermentation d'un mout rouge (phase hétérogène). La température est suivie durant

120 h de fermentation. La Figure 8 montre que le système n'arrive pas à réguler à 22°C ; en moyenne il reste à 23.5°C. Le froid de la pièce (18°C) et la régulation de la température par la ceinture chauffante ne permettent pas dans cette configuration de baisser la température à la consigne de 22°C. La prise au froid du fermenteur n'est pas assez grande.

Prototype avec plaque chauffante et 3 capteurs de mesure de température infrarouge (IR) à différents niveaux du fermenteur (système Occion)

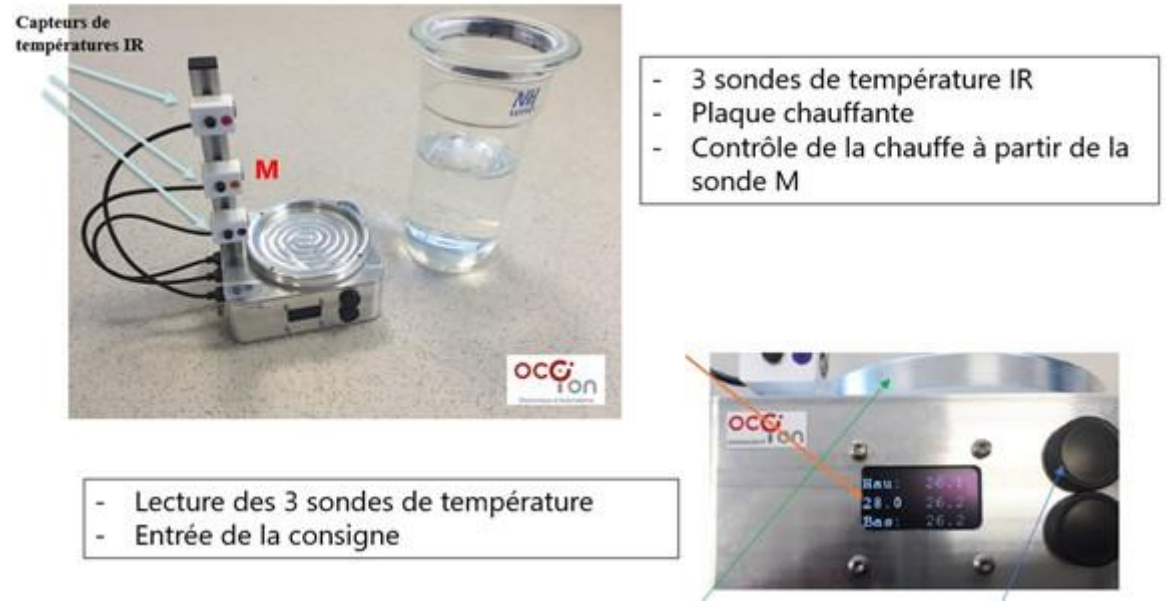


Figure 9 : Principe de système de régulation de température par plaque chauffante (Occion).

Des essais sur l'eau, sur des fermentations à température constante (isotherme) et à température variable (anisotherme) ont été réalisées sur les deux prototypes.

Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus (Figure 10) avec le système doté de la plaque chauffante et de 3 capteurs de température (décrit en Figure 9).

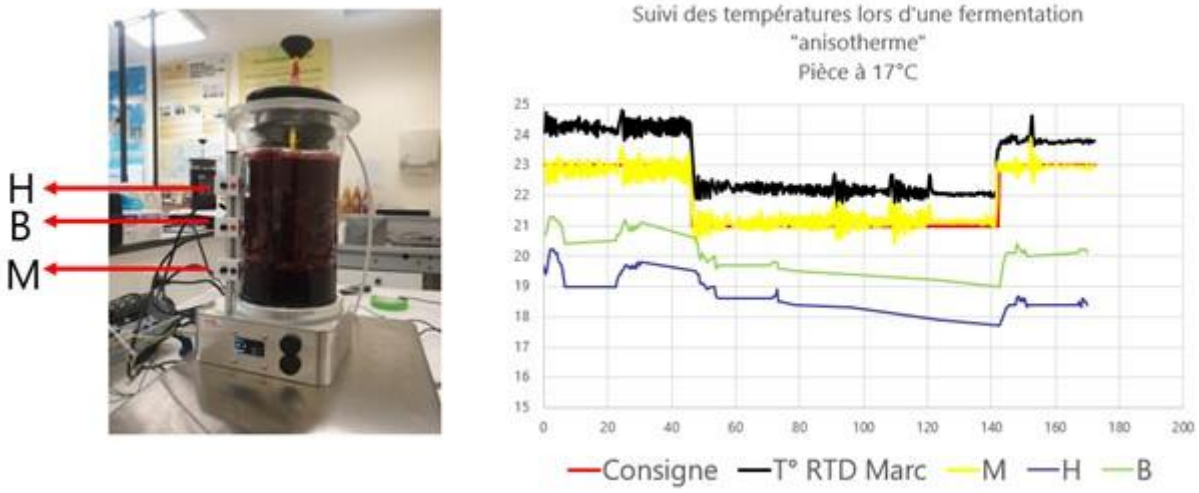


Figure 10 : Régulation de la température par le système à plaque chauffante doté de 3 capteurs IR lors d'une fermentation dite « anisotherme » (variation de la température de consigne au cours de la fermentation) : M, B, H position des capteurs, RTD : sonde de référence de température.

Ce système a l'avantage de pouvoir mesurer la température *in situ* du fermenteur sans contact grâce à un capteur IR. Les trois capteurs ont permis de voir les températures des différentes parties (marc/jus) en cours de fermentation et d'appréhender la non-homogénéité au sein du fermenteur (vinification phase hétérogène, température non homogène) (Figure 10), ce qui est classiquement observé également à l'échelle industrielle sur des fermentations en phase hétérogène. Le placement du capteur le plus approprié pour une bonne régulation se situe en bas sur jus près de la plaque chauffante.

L'ensemble des essais réalisés sur la régulation de la température d'un fermenteur nous ont permis d'affiner nos besoins pour le système automatisé final. Ce système devra pouvoir utiliser le froid de la pièce thermorégulée pour pouvoir refroidir le fermenteur et également pouvoir chauffer. La mesure de la température à 3 niveaux du fermenteur est souhaitable pour appréhender les phénomènes de non-homogénéité lors de fermentations de vins rouges.

2.2.3. Suivi de la couleur

Pour suivre l'extraction de la couleur, le choix s'est porté sur un capteur des coordonnées tristimulaires L*a*b par réflectance. Ce type de paramètres couleurs permet de refléter la perception de l'œil humain mais également permet une mesure sans contact (Photo 2) facilement intégrable sur un système automatisé. La composante a* représente la composante de la couleur rouge, adaptée au suivi de la couleur dans le cas des vins rouges. Pour pouvoir mesurer la couleur sur le jus en fermentation, le capteur est placé sur le jus au-dessus du piston et donc du marc immergé. Plusieurs essais ont permis d'optimiser les paramètres du capteur.

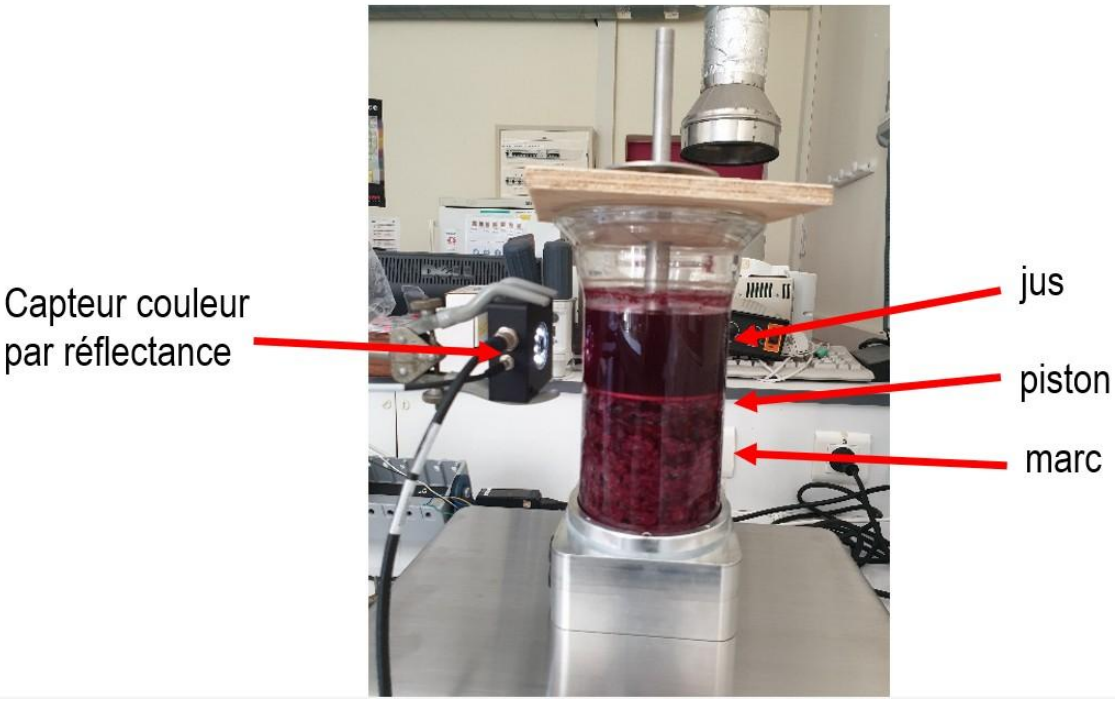


Photo 2 : Mise en place et suivi de l'extraction de la couleur au cours de la fermentation par un capteur L*a*b* par réflectance (crédits : IFV).

Les Figures 11 et 12 illustrent le suivi des coordonnées L*(clarté), a* (composante rouge) et b*(composante jaune) durant la fermentation d'un mout de grenache. La fermentation a duré 11 jours avec une mesure toutes les heures et une action sur le piston une fois par jour. Au début de la fermentation (37 premières heures), la mesure est perturbée par le trouble dans le jus dû à la levure, aux bourbes et prise du levain. Les pics observés sur les trois graphes traduisent les actions du piston (pigeage). Trois phases sont observables sur les graphiques : le démarrage troublé par la levure de 0 à 37 h, la phase d'extraction de 37 à 110 h et la phase de stabilisation (plateau) de 110 à 270 h. On

constate également que la phase d'extraction de la composante a* (composante rouge due aux pigments rouges présents dans le vin) est plus importante que celle de la composante b*. Sur la courbe L*, une baisse est observée jusqu'à atteindre un plateau. Cela traduit l'évolution de la clarté du vin.

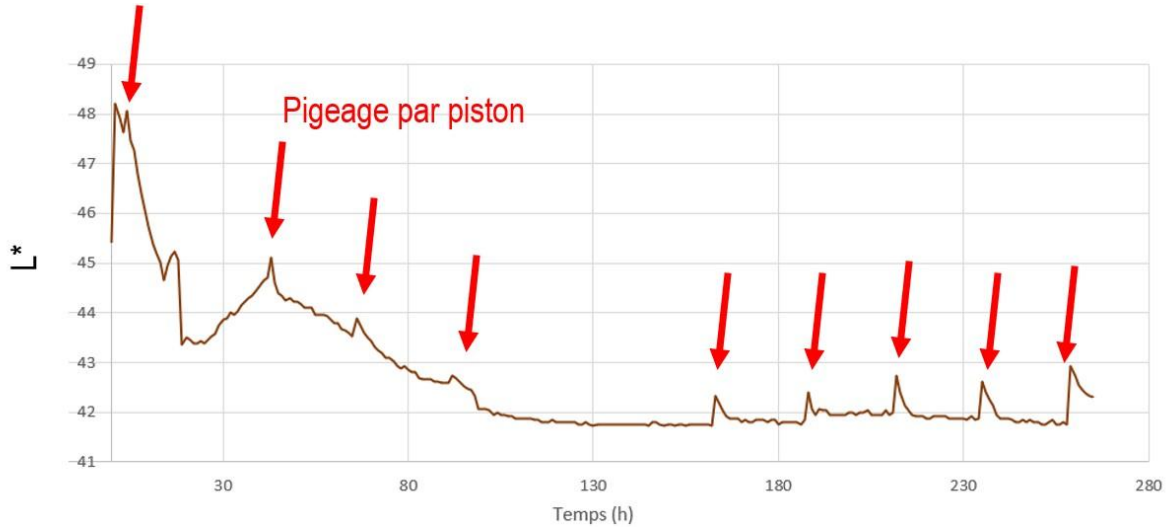


Figure 11 : Suivi de la clarté (coordonnée L*) au cours de la fermentation d'un moût de Grenache.

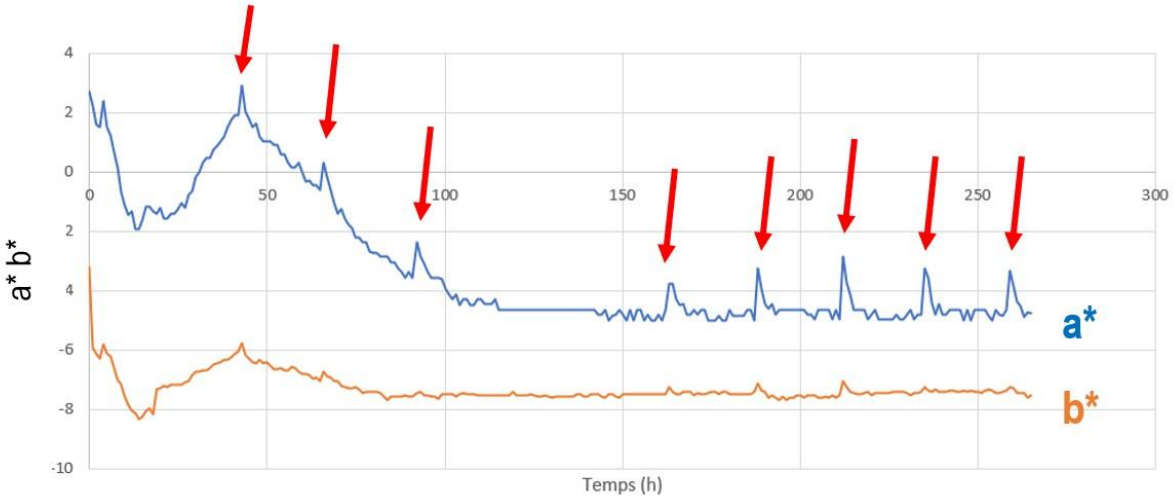


Figure 12 : Suivi de la composante rouge (a*) et jaune (b*) au cours de la fermentation d'un moût de Grenache.

Suite à plusieurs essais de suivi couleur, l'intégration de ce capteur sur le dispositif automatisé a été mis dans le cahier des charges.

3. Résultats et discussion

Le prototypage (analyse fonctionnelle, caractérisation des fonctions), les différentes solutions techniques prétestées (régulation température, mesure du poids, capteur couleur par réflectance) ont permis d'aboutir et d'affiner un cahier des charges garantissant de bien définir le dispositif automatisé souhaité. Le marché public concernant Vinimag a été attribué à la société ISP Aquitaine. La Photo 3 représente le système Vinimag et la Figure 13 le synoptique de ses fonctions. Le système possède un bras collaboratif appelé cobot. Il réalise le suivi en ligne de la vinification sur 1 kg de raisin de 60 fermenteurs. Les 60 postes sont contrôlés en température par trois capteurs infra-rouge et régulés

indépendamment grâce au froid de la pièce, à leur ceinture chauffante et à l'action d'un ventilateur qui répartit le froid de la pièce le long des parois du fermenteur. La cinétique fermentaire est suivie par pesée et l'extraction de la couleur par réflectance en L a b avec une cadence d'une mesure par heure. Le logiciel (Vispa) gère les données brutes et µVinifView (logiciel développé en interne par l'INRAE) traite les données en ligne et permet de piloter le process : envoi de la consigne température par fermenteur, déclenchement d'ajouts automatisés d'intrants en fonction de l'avancement de la fermentation. Les homogénéisations sont réalisées avec l'action d'un piston qui maintient le marc immergé pendant la fermentation.



Photo 3 : Dispositif automatisé Vinimag (crédits : IFV).

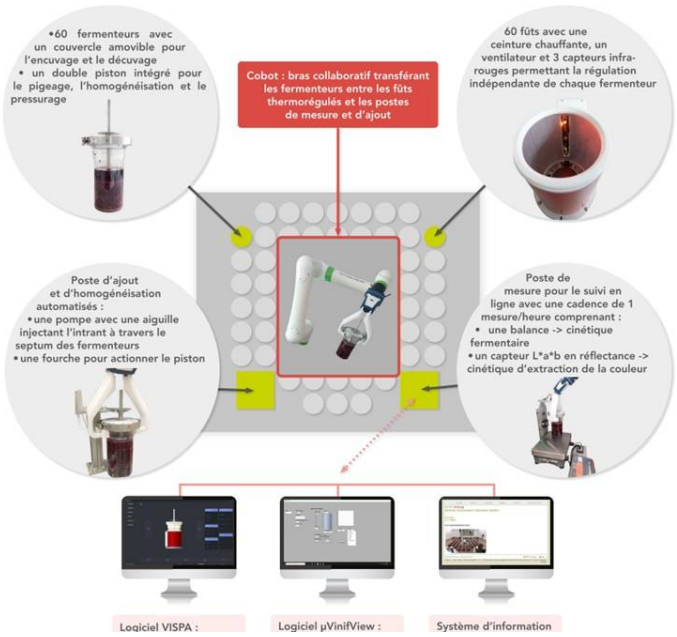


Figure 13 : Synoptique des fonctions de Vinimag.

4. Conclusions et perspectives

La méthodologie appliquée et les solutions testées ont permis de relever le défi technique et la réussite de prototypage de ce système de microvinification (<1 kg) dédié aux vins rouges. Suite à ce projet, ce travail a fait l'objet d'une déclaration d'invention et d'une licence de savoir-faire sur l'itinéraire de

microvinification (<1 kg) complet pour les vins rouges : de l'échantillonnage jusqu'au pressurage en petit volume. Vinimag a reçu un trophée d'argent aux trophées de l'innovation du salon viti-vinicole international Vinitech-Sifel en 2022 et un prix de l'innovation au salon viti-vinicole suisse Agrovina en 2023. Actuellement, la société ISP Aquitaine commercialise ce dispositif sous le nom Hakko auprès des acteurs de la filière viti-vinicole.

La maîtrise de la fermentation en petit volume avec ce type de dispositif automatisé nous ouvre de nombreuses applications potentielles :

- L'intégration très tôt dans la sélection des nouvelles variétés de raisin de leurs potentiels œnologiques, et plus globalement ce type de dispositif haut débit demandant de faibles quantités de raisins répond aux besoins de l'innovation variétale ;
- La multiplication aisée des vinifications dans les essais de différents produits œnologiques en phase hétérogène, en conditions répétables et transposables à grande échelle (criblage de levures, d'enzymes et autres intrants) ;
- La conduite d'études plus fondamentales sur des phénomènes encore mal connus en vinification en phase hétérogène comme les interactions entre levures et polyphénols ou l'extraction des composés d'intérêt.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Le projet Vinimag a été piloté par Marie-Agnès Ducasse et Marc Perez. La méthodologie et le cahier des charges du système Vinimag ont été réfléchis et mis au point par l'ensemble des 12 auteurs de la publication et a fait l'objet d'une déclaration d'invention. Les données des expérimentations dans l'article ont été acquises et traitées par Amélie Roy, Marc Perez et Marie-Agnès Ducasse. Cet article a été rédigé par Marie-Agnès Ducasse et Marc Perez. Les auteurs ont participé à la révision et à la validation de la publication.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des stagiaires et CDD ayant participé au projet ainsi que la société ISP Aquitaine, la société Occion, la société SOCMA. Le nom du dispositif Vinimag est un hommage à notre collègue Magali Bes partie trop tôt avant d'avoir vu l'aboutissement de son travail.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été financé par le CASDAR et le dispositif a été co-financé par la région Occitanie (Projet DepVaresoc), l'ACTIA (UMT Minicave) et l'Institut Carnot Plant2Pro (Projet PhenoPress : financement des double-pistons).

Références bibliographiques

Belda I., Conchillo L.B., Ruiz J., Navascues E., Marquina D., Santos A., 2016. Selection and use of pectinolytic yeasts for improving clarification and phenolic extraction in winemaking. International Journal of Food Microbiology 223, 1-8.

Bindon K.A., Kassara S., Cynkar W.U., Robinson E.M.C., Scrimgeour N., Smith P.A., 2014. Comparison of Extraction Protocols To Determine Differences in Wine-Extractable Tannin and Anthocyanin in Vitis vinifera L. cv. Shiraz and Cabernet Sauvignon Grapes. Journal of Agricultural and Food Chemistry 62, 4558-4570.

Casalta E., Aguera E., Picou C., Rodriguez-Bencomo JJ., Salmon JM., Sablayrolles JM, 2010. A comparison of laboratory and pilot-scale fermentations in winemaking condition. Appl Microbiol Biotechnol. 87, 1665–1673.

Cerpa-Calderón FK., Kennedy J.A. 2008. Berry integrity and extraction of skin and seed proanthocyanidins during red wine fermentation. J Agric Food Chem. 2008 Oct 8 ;56(19):9006-14.

Chalmers Y., Downey M., Krstic M., Loveys B., Dry P.R., 2010. Influence of sustained deficit irrigation on colour parameters of Cabernet Sauvignon and Shiraz microscale wine fermentations. Australian Journal of Grape and Wine Research 16, 301-313.

Dambergs R.G., Sparrow A., 2010. The « Bodum French Press »: a simple, reliable, small-lot fermentation method. Poster, 14th AWITC.

Ducasse M-A., Aguera E., 2018. L'UMT Minicave : outil de multi-vinifications en petit volume. (21 mars 2018). Communications orales. 10ème journée scientifique Vigne-Vin. Montpellier Supagro.

Ducasse M-A., Roy A., Caboulet D., Saurin N., Aguera E., Bes M., 2019. Validation of microscale red wine fermentations (<1kg) on oenological parameters, color and aroma compounds: an easy red wine fermentation method to perform many experiments on vines and wines. 11ème symposium international d'oenologie de Bordeaux, 24-28 juin 2019.

Mouret J.R., Aguera E., Perez M., Farines V., Sablayrolles J.M., 2021. Study of Oenological Fermentation: Which Strategy and Which Tools? Fermentation, 7(3), 155. https://doi.org/10.3390/fermentation7030155.

Perez M., 2018. Retour sur l'école technique : Méthodes pour la création et la valorisation de prototypes. 15eme journée de la Mesure et de la Métrologie. 8-11 octobre 2018, CAES du CNRS Viellie Perrotine.

Sampaio T. L., Kennedy J.A., Vasconcelos M.C., 2007. Use of microscale fermentations in grape and wine research. American Journal of Enology and Viticulture 58, 534-539.

Sparrow A.M., Smart R.E., 2015. Fermentation Volume Studies for Red Wine Experimentation. South African Journal of Enology and Viticulture 36, 343-346.

Pour citer cet article : Marie-Agnès Ducasse, Amélie Roy, Denis Caboulet, François Davaux, Jean-Michel Desseigne, *et al*.. Vinimag : système automatisé de microvinification (<1 kg) dédié aux vins rouges pour l'expérimentation viti-vinicole. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.328-341. 10.17180/ciag-2025-vol107-art24

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

ADAMOS - Un nouveau regard sur les écosystèmes microbiens laitiers et fromagers apporté par les méthodes omiques

Christophe Monnet[1], Eric Dugat-Bony[1], Céline Delbès[2], Cresciense Lecaudé[3], Yvette Bouton[4], Elisa Michel[2], Isabelle Verdier-Metz[2], Sarah Chuzeville[5], Cécile Charles[6], Ronan Lasbleiz[7], Blandine Polturat[3]

[1] INRAE, UMR SayFood - 22 Place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau, France

[2] Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR545 Fromage, 20 côte de Reyne, 15000 Aurillac, France

[3] CERAQ - 40 rue du Terraillet, 73190 Saint Baldoph, France

[4] CIGC - 1, rue de la Maison du Comté, 39801 Poligny, France

[5] ACTALIA - Département de Microbiologie Laitière, 74800 La Roche sur Foron, France

[6] ENILV - 212 Rue Anatole France, 74800 La Roche-sur-Foron, France

[7] CNAOL - 42 Rue de Chateaudun, 75009 Paris, France

Correspondance : blandine.polturat@ceraq.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art25

Résumé

Les méthodes omiques sont des outils précieux pour étudier les communautés microbiennes. Ces méthodes intéressent particulièrement les filières fromagères, car la gestion des écosystèmes microbiens laitiers et fromagers participe largement à l'élaboration des caractéristiques organoleptiques finales des fromages. Le projet Adamos avait pour objectif de leur rendre accessibles ces nouvelles méthodes d'analyse, et ainsi d'apporter un nouveau regard sur les écosystèmes microbiens des laits et des fromages. Le projet a permis de faciliter l'utilisation des méthodes omiques par les filières fromagères, en rendant disponibles des méthodologies adaptées à leur contexte, en les testant sur des questionnements concrets, en créant un réseau dynamique pour les accompagner et en mettant à leur disposition des ressources pour les informer du potentiel des méthodes omiques pour répondre à leurs interrogations.

Mots-clés : fromage ; communauté microbienne ; metabarcoding ADN ; métatranscriptomique ; terroir.

Abstract: ADAMOS - New insights into dairy and cheese microbial ecosystems through omics methods

Omics methods are valuable tools for studying microbial communities. These methods are of particular interest to the cheese sector, as the management of dairy and cheese microbial ecosystems plays a major role in determining the final organoleptic characteristics of products. The aim of the Adamos project was to make these new methods accessible to this sector, thereby providing a new perspective on the microbial ecosystems of milk and cheese. The project has facilitated the use of omics methods, by providing stakeholders with methodologies adapted to their context and testing them on concrete issues, creating a dynamic network to support them, and providing resources to inform them about the potential of omics methods to address their questioning.

Keywords: cheese; microbial community; DNA metabarcoding; meta-transcriptomics; terroir.

1. Introduction

La gestion des écosystèmes microbiens laitiers et fromagers participe largement à l'élaboration des caractéristiques finales des fromages produits par les filières fromagères valorisant leur terroir, en contribuant à leurs caractéristiques organoleptiques, leur durée de conservation et leur qualité en matière de sécurité sanitaire (Montel *et al*., 2014).

Avec le développement des outils d'analyse haut débit, de nouvelles méthodes, dites omiques (pour métagénomique, transcriptomique, métabolomique…) deviennent progressivement accessibles. A terme, il serait ainsi théoriquement possible de décrire l'activité et le rôle des différents micro-organismes et ce, à chaque étape de la fabrication, favorisant un pilotage optimal des communautés microbiennes, de la production du lait jusqu'au fromage affiné.

Le projet Adamos (CASDAR 2019 - 2023), affilié au RMT Fromages de Terroirs, avait pour objectif de rendre accessibles aux filières fromagères ces nouvelles méthodes d'analyse du matériel génétique, et ainsi d'apporter un nouveau regard sur les écosystèmes microbiens des laits et des fromages. Plus précisément, le projet avait pour finalités (1) d'adapter les méthodes omiques au contexte des filières fromagères, (2) de les tester sur des questionnements « filière », et (3) de permettre leur appropriation en créant des conditions favorables à leur utilisation.

Pour cela, le projet Adamos a rassemblé à la fois des organismes de recherche et des centres techniques (INRAE, Génoscope, Université de Caen, Actalia, CIGC, CTFC), des structures accompagnant les filières dans leur démarche de recherche et développement (CERAQ, Pôle Fromager AOP Massif Central), des représentants directs de ces dernières (dont CNAOL) et des centres de formation (ENILV, école d'ingénieurs de Purpan).

Cet article présente une synthèse des principaux résultats du projet Adamos.

2. Adaptation des méthodes omiques aux spécificités des filières fromagères

Dans le projet Adamos, les méthodes omiques retenues pour répondre à des questions d'intérêt pour les filières fromagères sont basées, soit sur l'analyse de l'ADN des micro-organismes présents dans les fromages (metabarcoding ADN), soit sur celle de l'ARN (métatranscriptomique). En pratique, l'appropriation des analyses metabarcoding ADN est moins difficile que celle des analyses métatranscriptomiques. Au cours du projet, nous nous sommes plus particulièrement focalisés sur l'harmonisation des méthodes existantes dans le cas des analyses metabarcoding ADN, tandis que les analyses métatranscriptomiques ont nécessité de nouveaux développements méthodologiques.

2.1. La réalisation d'une expérience de metabarcoding ADN en pratique

Parmi les méthodes omiques, le séquençage massif d'amplicons, également appelé metabarcoding ADN ou métagénétique, est désormais considéré comme une méthode de routine dans les laboratoires de recherche pour décrire la composition des communautés microbiennes présentes dans des échantillons complexes. Le principe consiste à extraire l'ADN présent dans un échantillon puis à amplifier par PCR (polymerase chain reaction / réaction en chaîne par polymérase) un fragment cible à l'aide d'un couple d'amorces prédéfini. Ces produits PCR, après ajout de barcodes (oligonucléotides uniques pour chaque échantillon) et d'adaptateurs de séquençage, sont ensuite séquencés tous en même temps. A l'issue du séquençage, les séquences obtenues sont triées par échantillon grâce aux barcodes puis assignées à des taxons par comparaison avec des séquences de référence. Beaucoup de méthodes et outils d'analyse ont été développés pour obtenir une vision la plus précise possible des écosystèmes étudiés. Cependant, les techniques de préparation puis d'analyse des échantillons dépendent de l'écosystème considéré, de la nature des échantillons, des questions auxquelles on souhaite répondre et de la technologie de séquençage utilisée.

Afin de permettre l'appropriation de cette méthode omique par les professionnels des filières fromagères, il est nécessaire de fournir des conseils avisés sur toute la chaîne de traitement et de proposer des choix méthodologiques pertinents au regard des contraintes rencontrées sur le terrain. Un guide méthodologique recensant des conseils pratiques depuis la préparation des échantillons jusqu'à l'analyse statistique des données a ainsi été rédigé en français. La dernière version est accessible en téléchargement depuis l'outil d'auto-formation en ligne Fromic (Dugat-Bony *et al*., 2024). Il est structuré en sept parties couvrant les principales étapes et questionnements dans la mise en œuvre de la méthode : prélèvement et conservation des échantillons, extraction de l'ADN, amplification par PCR, importance et rôle des contrôles, choix du pipeline bioinformatique, analyse bioinformatique des données de metabarcoding ADN avec FROGS, analyse de la table d'abondance.

Ce guide vise ainsi à constituer un point d'entrée pour les professionnels des filières fromagères souhaitant entreprendre des expériences de metabarcoding ADN.

2.2. Développement de procédures d'analyse métatranscriptomique de fromages

2.2.1. Contexte

Dans les fromages, l'ARN provient des bactéries, levures et moisissures qui se développent au cours de la fabrication. Il est composé en majeure partie par de l'ARN ribosomique (ARNr), impliqué dans la synthèse des protéines. L'ARNr fournit relativement peu d'informations intéressantes. Son analyse peut toutefois servir à connaître les espèces actives dans le fromage. Les analyses d'ARN messager (ARNm), quant à elles, permettent de déterminer l'activité de l'ensemble des gènes microbiens codant pour des protéines, au moment du prélèvement. On parle d'analyse métatranscriptomique (transcriptome de l'ensemble des espèces de la communauté microbienne). Le séquençage et la quantification de ces ARNm fournissent des informations sur toutes les espèces et gènes exprimés. Ces résultats peuvent être analysés de différentes façons, l'une d'entre elles consistant à étudier séparément les transcriptomes de chaque espèce microbienne dans des échantillons différents. L'analyse indique alors quels sont les gènes sous-exprimés ou sur-exprimés par l'espèce étudiée dans l'échantillon considéré, par rapport à une condition de référence. A partir de cela, on peut tirer des conclusions concernant par exemple l'induction ou la répression de métabolismes d'intérêt pour l'affinage du fromage, ou des informations sur la physiologie de la cellule (carences, stress, substrats catabolisés etc.). Ces renseignements sont potentiellement utiles pour mieux comprendre l'impact de paramètres technologiques ou l'apparition de défauts et d'irrégularités organoleptiques.

2.2.2. Objectifs

Dans les fromages, les analyses concernant les ARNm sont assez complexes, pour plusieurs raisons. Il faut tout d'abord être en mesure d'extraire l'ARN de tous les micro-organismes de la communauté, à partir d'une matrice complexe, en bloquant rapidement les processus métaboliques. Il est également indispensable de parvenir à éliminer une grande partie de l'ARNr, qui est constitué d'ARNr intègre ou plus ou moins dégradé, et qui provient d'espèces variées. Enfin, il faut développer un pipeline bioinformatique permettant, à partir des séquences brutes, d'obtenir des informations d'intérêt, par exemple la nature des gènes sur- et sous-exprimés dans une condition par rapport à une autre. Dans le projet Adamos, nous avons cherché à améliorer ces trois aspects, afin de faciliter les analyses métatranscriptomiques de fromages.

2.2.3. Extraction d'ARN

Un cahier des charges des prélèvements destinés aux analyses métatranscriptomiques de fromages a été défini. Le protocole utilisé permet de stabiliser rapidement les échantillons de fromages en vue d'une extraction ultérieure d'ARN, grâce à l'ajout de composés chimiques combiné à une étape de broyage avec des microbilles. Une variante de ce protocole basée sur une étape initiale de congélation dans de l'azote liquide a également été développée, permettant ainsi de réaliser dans un laboratoire

distant les étapes nécessitant des réactifs chimiques et des appareils de laboratoire. L'ARN est ensuite obtenu par une méthode d'extraction directe, n'impliquant pas d'étape de séparation des cellules microbiennes du fromage (ce protocole est disponible sur la plateforme RD-Agri). La méthode fonctionne sur les cellules bactériennes et fongiques (levures et moisissures) et nous avons ainsi pu obtenir de l'ARN pour tous les échantillons étudiés. Toutefois, les rendements étaient très variables (entre 1 et 363 µg ARN par gramme de fromage). Certains fromages, notamment des fromages à affinage long, fournissent peu d'ARN, en raison probablement de la mortalité cellulaire. D'autre part, des analyses de qualité de l'ARN par électrophorèse capillaire montraient des différences d'intégrité de l'ARN selon les échantillons, qui résultent de dégradations plus ou moins importantes, probablement principalement en conséquence de la mortalité cellulaire.

2.2.4. Enrichissement en ARNm et séquençages

Pour tous les échantillons de fromages, nous avons constaté que la proportion d'ARNr parmi l'ARN total était particulièrement élevée, de l'ordre de 99 %. Ceci résulte probablement d'une très faible activité de transcription des cellules microbiennes lors de l'affinage des fromages, qui a lieu à une température inférieure aux optimums de croissance et avec de possibles limitations nutritionnelles. Une autre cause possible est la présence de cellules mortes, sachant que dans les cellules mortes, l'ARNr est plus stable que l'ARNm. Nous avons testé et comparé trois méthodes différentes d'enrichissement en ARNm. La méthode retenue combine les kits FastSelect « 5S/16S/23S » et « yeasts » (Qiagen). Elle permet de réduire fortement la teneur en ARNr, à la fois bactérien et fongique, même pour des échantillons comportant beaucoup d'ARNr dégradé. Elle s'est avérée efficace pour pouvoir générer ultérieurement suffisamment de séquences d'ARNm à partir des échantillons de fromages. Nous avons également pu vérifier que cette procédure d'enrichissement en ARNm n'induisait pas de biais notable dans les profils des ARNm, qu'ils soient bactériens ou fongiques. Les résultats concernant l'efficacité de l'extraction d'ARN de fromages et de l'enrichissement en ARNm ont fait l'objet d'une publication scientifique (Carbonne *et al.*, 2022).

2.2.5. Traitements bioinformatiques et exploitation des données métatranscriptomiques

Un pipeline bioinformatique a été mis en place pour pouvoir visualiser des phénomènes de sur- ou sous-expression de gènes des espèces fromagères dans une condition par rapport à une condition de référence. Il est tout d'abord nécessaire d'obtenir la séquence génomique des espèces présentes. Ceci est possible par séquençage du génome des espèces ensemencées, et/ou par séquençage de l'ADN des échantillons de fromage (on obtient alors, pour les espèces dominantes, des MAGs : « metagenome-assembled genomes »). Les séquences d'ARN issues des fromages (on génère environ 100 millions de séquences par échantillon) subissent alors plusieurs étapes : filtrage selon la qualité, élimination des séquences résiduelles d'ARNr, alignement des séquences sur les génomes de référence, comptage des séquences alignées sur chaque gène, normalisation des comptages, et analyse statistique permettant de déterminer les gènes sur- et sous-exprimés. Dans le cas d'essais réalisés avec de la Tomme de Savoie et du Comté, il a ainsi été possible d'obtenir un transcriptome quasi-complet de 3 à 4 espèces majoritaires de chaque fromage. Pour ces espèces, certains phénomènes physiologiques (stress, changements de substrat carboné) ont pu être mis en évidence au vu des transcriptomes. Toutefois, le travail d'interprétation des résultats est très chronophage et nécessite des connaissances en génomique et en physiologie microbienne afin de pouvoir relier les profils d'expression transcriptomique observés à des phénomènes biologiques ou au processus de fabrication fromagère. De plus, et en particulier pour les levures et moisissures, une partie des gènes dont l'expression est modifiée est de fonction inconnue, et il n'est alors pas possible d'en tirer des conclusions biologiques. Dans le cas des espèces minoritaires, seule une proportion minoritaire de gènes est quantifiable, et l'intérêt des analyses transcriptomiques est alors plus limité. Ceci permet toutefois d'obtenir des indicateurs d'activité globale de ces souches dans les fromages.

2.2.6. Bilan

En résumé, une procédure technique comportant différentes étapes en vue du séquençage du métatranscriptome a été développée puis validée sur différents types de fromages. Des procédures bioinformatiques adaptées ont également été mises en place. Toutefois, ces techniques sont coûteuses et complexes du point de vue de leur mise en œuvre et de l'interprétation des résultats, freinant ainsi une large diffusion à court terme. Ceci pourrait toutefois évoluer, en fonction des progrès techniques réalisés par ailleurs sur les capacités de séquençage et de traitement des jeux de données métatranscriptomiques.

3. Application des méthodes et approfondissement des connaissances sur l'écologie microbienne des fromages

Il s'agissait d'expérimenter, sur trois terrains d'étude (Auvergne, Franche-Comté et Savoie), des démarches méthodologiques pour adresser une question d'une filière fromagère par l'utilisation des méthodes omiques d'analyse de l'ADN. Ceci a nécessité sur chaque terrain un travail collectif pour instruire la question scientifique et construire un dispositif expérimental adéquat. La préparation des échantillons en vue des analyses métagénétiques et le traitement des données de séquences d'amplicons obtenues ont été conduits sur chaque terrain en s'appuyant sur le guide méthodologique construit précédemment (cf. 1.1) et sur les référents en bioinformatique préalablement identifiés pour chaque terrain.

3.1. Bleu d'Auvergne - Comprendre l'apparition d'un défaut en lien avec des interactions entre les micro-organismes ensemencés comme ferments et la composition biochimique du lait

3.1.1. Contexte

Le Bleu d'Auvergne est un fromage à pâte persillée au lait de vache sous Appellation d'Origine Protégée (AOP), fabriqué en Auvergne. Caractérisé par une pâte blanche à ivoire parsemée de veines bleues à verdâtres, causées par la croissance de la moisissure *Penicillium roqueforti* (Donnelly et Kehler, 2016), le Bleu d'Auvergne, comme nombre de pâtes persillées, doit sa popularité à ses caractéristiques sensorielles fortes et uniques (Cantor *et al*., 2017). L'amertume est une des composantes de sa typicité organoleptique. En excès, celle-ci est considérée comme un défaut dont l'apparition reste encore mal connue. L'objectif de cette étude était de mieux comprendre l'origine d'une amertume excessive par l'évaluation des liens potentiels entre la composition des communautés microbiennes des fromages, la composition biochimique des laits et des fromages, et les paramètres technologiques.

3.1.2. Matériels et méthodes

Des fromages Bleu d'Auvergne au lait pasteurisé ont été produits dans un atelier de transformation selon une technologie standardisée et maîtrisée avec les mêmes ferments (*Penicillium roqueforti*, bactéries lactiques, levures). Après 30 jours d'affinage, leur degré d'amertume a été évalué par un jury de dégustation spécifiquement constitué et entraîné pour cette étude. Cinq lots de 6 fromages (n=30) jugés « très amers » et 5 autres (n=30) jugés « peu amers » ont été sélectionnés et analysés d'un point de vue physicochimique et microbiologique selon diverses approches (metabarcoding ADN 16S et ITS, analyses de métagénome (ADN) et de métatranscriptome (ARN)). Les mêmes analyses ont été réalisées sur les fromages après 30 jours d'affinage supplémentaires soit 60 jours d'affinage. La composition physicochimique des laits mis en fabrication a également été caractérisée.

3.1.3. Résultats

3.1.3.1. Evaluation sensorielle des fromages

A 30 jours d'affinage, les fromages jugés « très amers » ont été perçus moins salés, malgré la teneur en sel équivalente entre fromages peu ou très amers. Après 60 jours d'affinage, les fromages des deux classes présentaient une amertume similaire. Les analyses ont montré une diminution de l'amertume des fromages « très amers » dont la texture en bouche s'est révélée plus fondante.

3.1.3.2. L'amertume comme facteur de différenciation des fromages

L'amertume a semblé être un facteur de différenciation marqué des communautés bactériennes et fongiques aussi bien par les analyses de metabarcoding ADN que métagénomique et métatranscriptomique. Selon le niveau d'amertume, des différences d'équilibre dans les fromages des populations de ferments lactiques ajoutés pendant les phases de pré-maturation et de fabrication ont été observées. De façon similaire, l'expression des gènes de la communauté microbienne a également été fonction du niveau d'amertume et de la durée d'affinage.

3.1.3.3. Ecosystèmes microbiens des fromages

La communauté fongique était dominée par *Penicillium roqueforti.* Cependant, une plus grande diversité microbienne et une prévalence des levures plus importante dans les fromages « peu amers » ont été mises en évidence. La communauté bactérienne était dominée par des bactéries lactiques, des espèces analogues à celles qui composent les ferments lactiques ajoutés pour la fabrication.

Les fromages « peu amers » ont présenté des abondances relatives plus élevées en variants de séquences (Amplicon Sequence Variant, ASVs) assignés à *Streptococcus thermophilus* (ferment de maturation chaude), *Paucilactobacillus nenjiangensis*, *Debaryomyces sp.* (ferment de surface), *Diutina catenulata* et *Penicillium camemberti* (utilisés dans l'atelier de fabrication). Les fromages « très amers » avaient des abondances relatives plus élevées en ASVs assignés à *Lactococcus lactis sp. cremoris* (ferment de maturation froide), *Pseudomonas sp.* et *Penicillium roqueforti.* Ces résultats feront l'objet d'une publication spécifique.

3.2. Comté - Impact de la température de chauffage du caillé en cuve sur la dynamique des communautés bactériennes au cours de l'affinage du fromage

3.2.1. Contexte

Le Comté est un fromage à pâte pressée cuite et à affinage long, produit à partir de lait cru de vache. Lors de sa fabrication, le mélange caillé-lactosérum est chauffé jusqu'à une température finale pouvant atteindre 57°C. L'objectif de cette étude était de mieux comprendre le rôle de ce paramètre technologique sur la dynamique des espèces bactériennes de la pâte au cours de l'affinage et sur la qualité finale du produit, en combinant des approches microbiologiques, biochimiques, méta-omiques et sensorielles.

3.2.2. Matériels et méthodes

Pendant trois jours consécutifs, à partir des mêmes laits et levains, six fromages ont été fabriqués chaque jour dans deux cuves de fabrication d'une fromagerie, à raison d'une température de chauffage par cuve (54°C vs. 57°C). Les dix-huit fromages obtenus ont été affinés dans les mêmes conditions. Les communautés bactériennes de la pâte ont été décrites au cours de l'affinage (de J1 à J250) par des approches cultures dépendantes (dénombrement des bactéries lactiques cultivables) et cultures indépendantes (metabarcoding ADN 16S). Six fromages (deux fromages par jour pendant trois jours) ont fait l'objet d'analyses complémentaires par dénombrement des bactéries propioniques cultivables et séquençage ARN. Des mesures physico-chimiques et biochimiques (protéolyse, acides gras volatils) ont également été effectuées ainsi qu'une dégustation par un jury d'analyses sensorielles.

3.2.3. Résultats

3.2.3.1. Caractéristiques biochimiques et sensorielles des fromages en fin d'affinage

Les six fromages dégustés présentaient en fin d'affinage, des caractéristiques physico-chimiques et des notes globales de pâte et de goût similaires. Toutefois, des différences de composition biochimique et de profils aromatiques ont été mises en évidence. La température de chauffage à 54°C a permis une fermentation propionique plus poussée et une protéolyse à tendance plus élevée. Les arômes « lactique-chauffé », « fruité-miellé », « bouillon de légumes » et dans une moindre mesure l'arôme « torréfié-grillé » étaient plus intenses dans les fromages issus des cuves chauffées à 54°C. Les fromages fabriqués dans les cuves chauffées à 57°C avaient tendance à dévoiler une « note verte » globale plus marquée.

3.2.3.2. Dynamique des espèces bactériennes au cours de l'affinage

Au cours de l'affinage, la dynamique des populations bactériennes cultivables était conforme aux résultats généralement obtenus pour ce type de fromage. Un effet de la température a toutefois été mis en évidence. Les niveaux des populations cultivables de lactobacilles mésophiles et de bactéries propioniques présumées étaient plus faibles dans les fromages issus des cuves chauffées à 57°C. A contrario, les niveaux de streptocoques thermophiles présumés étaient plus importants après la période de pré-affinage. Aucun effet n'a été observé sur les niveaux de lactobacilles thermophiles présumés. L'ADN de *Streptococcus thermophilus* et de *Lactobacillus helveticus* restait abondant pendant toute la période d'affinage.

3.2.3.3. Diversité microbienne des fromages

La diversité taxonomique (alpha-diversité) présente dans chacun des échantillons a été évaluée à partir des indices de richesse observée (nombre d'ASVs, Amplicon Sequence Variants) et des indices de Shannon. Les valeurs de ces indices n'étaient pas modifiées par la température de chauffage du caillé en cuve.

En revanche, la température de chauffage en cuve avait un effet significatif sur les profils des communautés bactériennes (Beta-diversité) de la pâte, principalement en fin d'affinage où 37 % de la variabilité entre échantillons étaient expliqués par ce facteur. Plusieurs taxons assignés à l'espèce *Lactobacillus delbrueckii* présentaient des abondances relatives plus élevées dans les fromages issus de la cuve chauffée à 57°C alors que d'autres, assignés aux espèces *Propionibacterium freudenreichii, Lentilactobacillus parabuchneri* et *Limosilactobacillus fermentum* étaient plus abondants dans les fromages fabriqués dans la cuve chauffée à 54°C.

3.2.3.5. Analyse métatranscriptomique

En début de cave froide, l'abondance relative des transcrits de *Propionibacterium freudenreichii* était plus importante à 54°C qu'à 57°C indiquant une activité plus importante à 54°C qu'à 57°C. Concernant les bactéries lactiques thermophiles, une forte activité de *Streptococcus thermophilus* et une faible activité de *Lactobacillus helveticus* ont été mises en évidence en début de cave froide (J100) alors que la proportion d'ADN restait stable. Il ressort également que le nombre de gènes différentiellement exprimés pour une même espèce de bactérie lactique à 57°C vs 54°C était plus faible que le nombre de gènes différentiellement exprimés à J100 vs J1.

3.2.4. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'impact de la température de chauffage du mélange caillé-lactosérum sur les profils des communautés microbiennes de la pâte ainsi que sur les profils biochimiques et aromatiques des fromages en fin d'affinage. L'analyse métatranscriptomique suggère

que la température de chauffage en cuve a un impact beaucoup plus faible sur les transcriptomes des espèces de bactéries lactiques thermophiles que le temps d'affinage entre J1 et J100.

3.3. Tomme de Savoie - Exploration de l'effet de trois méthodes d'ensemencement et de maturation sur les microbiotes des laits et fromages et leurs qualités organoleptiques

3.3.1. Contexte

La Tomme de Savoie (IGP = indication géographique protégée) est un fromage à pâte pressée non cuite, avec un affinage d'au moins 30 jours. Une étape importante de la fabrication est la maturation du lait qui, après ajout des ferments, permet de l'enrichir en bactéries lactiques et d'initier l'acidification. Cette étape peut être plus ou moins longue et précédée d'une pré-maturation en cas de report du lait de la veille pour la fabrication. Cette pré-maturation du lait de report, suivie d'une maturation chaude, est associée à une dose de ferment moins forte. La filière Tomme de Savoie se pose la question de savoir si cette pratique pourrait permettre à la microflore du lait de se développer davantage qu'avec d'autres pratiques de maturation utilisant des doses plus fortes de ferments. Le développement de la microflore du lait cru pourrait présenter des avantages organoleptiques.

3.3.2. Matériels et méthodes

Différentes méthodes d'ensemencement ont été comparées dans cette étude. La méthode M1 correspond à une prématuration de 12 h pendant le report du lait à des températures pouvant aller de 4 à 11°C selon les ateliers, puis une maturation de 60 min à 33°C et une dose de ferment inférieure de 25 % à la dose usuelle de l'atelier avant la maturation. La méthode M2 correspond à la méthode usuelle, une maturation dite longue de 90 min à 33°C avec une dose de ferments habituelle. La méthode M3 correspond à une maturation courte de 30 min, avec une dose de ferments supérieure de 25 % à la dose usuelle. Les essais ont été réalisés dans 2 ateliers fermiers « D » et « E » et un atelier laitier « F ». Les laits crus, les laits ensemencés, les pâtes des fromages à 2 h et au 20ème jour ont été échantillonnés. Trois répétitions de chacun des essais ont été réalisées. Les pH ont été mesurés à différents stades de la transformation, du lait cru jusqu'à la fin de l'affinage. Les dégustations et notations organoleptiques ont été réalisées par des professionnels de la filière. Les analyses métatranscriptomiques n'ont été réalisées que pour l'atelier laitier. Pour ces dernières, 3 réplicats au sein de la même fabrication ont été prélevés pour chaque méthode de maturation testée, afin de mesurer la variabilité entre fromages et de s'assurer de la constance des expressions génétiques. Différents stades au cours de la transformation ont été analysés : 2 h, jour 1, jour 7, et jour 20. Les fabrications M2 et M3 proviennent du même lait, les échantillons ayant été récupérés le même jour, tandis que ceux de la fabrication M1 proviennent d'un lait différent.

3.3.3. Résultats

3.3.3.1. Analyses metabarcoding :

Cet essai montre que l'atelier a un effet majeur sur les communautés bactériennes des Tomme de Savoie, et que l'effet « méthode d'ensemencement » n'atteint que 8 % dans les laits en fin de maturation. L'effet atelier atteint 55 % à ce stade, et augmente jusqu'à 73 % à 20 jours. Cela s'explique en grande partie par le fait que les laits et les ferments sont très différents selon les ateliers. Dans les laits ensemencés en F, on remarque que *Lactobacillus delbrueckii* est prédominant en M1/M2 avec *Streptococcus thermophilus*, on observe par contre une majorité de *Lactococcus lactis* en M3 avec 25 % de plus de ferments et une maturation courte. L'atelier D montre de grandes disparités selon les répétitions, ce qui ne permet pas de mesurer un effet méthode. On retrouve globalement plus de *Lactococcus lactis* en M2, plus de *Streptococcus thermophilus* en M1 avec un échantillon saturé en *Lactobacillus plantarum* et plus de *Brevibacterium aurantiacum* en M3 avec un échantillon saturé en *Lactococcus lactis*. L'atelier E montre également une grande disparité selon les répétitions, avec plus de *Streptococcus thermophilus* en M1, et plus de *Lactobacillus delbrueckii* en M3.

L'acidification n'était pas suffisante quand le lait était prématuré avec une dose de ferment inférieure de 25 % à la dose usuelle. A partir de 1 heure après moulage, les dynamiques de pH montrent des différences significatives et dépendantes des ateliers. L'atelier D montre une décroissance du pH plus importante en M2 comparé à M1, et le pH en M3 est significativement plus haut que celui en M2. L'atelier E est le seul atelier pour lequel les deux modalités M2 et M3 ne montrent aucune différence de pH. Le pH en M1 est significativement plus haut qu'en M2, et qu'en M3. Enfin, l'atelier F montre que les pH en M1 sont significativement plus hauts que ceux en M2. Les autres comparaisons ne montrent pas de différences significatives. La diversité de Shannon des pâtes à 20 jours montre également des différences selon les modalités et les ateliers. On observe, dans l'atelier D, une diversité microbienne plus faible en M3 comparée à M1. Aucune différence de richesse microbienne n'est détectée dans cet atelier. L'atelier E ne montre pas de différence significative. De la même manière, la richesse en ASV n'est pas différente selon les modalités. En F, on observe que la diversité en M1 est supérieure à celle en M2, et que celle en M3 est supérieure à celle en M2. La richesse d'ASV en M1 est supérieure à celle en M3. L'atelier D montre des pâtes à J40 plus acides quand le lait est reporté et que la dose de ferments est inférieure de 25 % à la dose usuelle. Les pâtes sont plus ouvertes quand la dose de ferments est forte et la maturation courte. Les pâtes présentant les richesses aromatiques les plus élevées sont celles réalisées avec la méthode usuelle (M2). L'atelier E montre des pâtes à J40 plus aromatiques quand la dose de ferments est plus forte, et des défauts comme trop d'amertume quand la dose de ferment était la moins forte avec report du lait. Le collant est lié à la méthode usuelle. Enfin, l'atelier F montre de grandes similarités entre la méthode usuelle et celle avec dose de ferments plus forte et maturation courte. C'est la méthode avec report de lait qui se différencie le plus des deux autres, et qui est corrélée négativement à la richesse aromatique. C'est surtout la méthode M2 qui montre des richesses aromatiques plus élevées.

3.3.3.2. Analyses métatranscriptomiques

Les analyses métatranscriptomiques réalisées dans l'atelier laitier ont permis de mesurer l'activité de deux souches : *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii bulgaricus*. Les différents métabolismes dépendent majoritairement du stade d'affinage, mais quelques métabolismes ont montré des différences relativement marquées en fonction des méthodes d'ensemencement. On retrouve notamment une activité moindre en M1 à 2 h pour *Streptococcus thermophilus* sur les métabolismes des sucres, du soufre, des terpénoïdes et de la cystéine/méthionine. Un opéron tryptophane complet est réprimé pour cette souche, en M2, à J1, J7 et J20. *Lactobacillus delbrueckii* est plus sensible aux différentes conditions de maturation, en particulier en comparant la modalité M1 aux 2 autres modalités M2 et M3. *Lactobacillus delbrueckii* montre notamment un métabolisme des sucres en M1 bien inférieur aux deux autres méthodes à J7 et J20. Beaucoup de systèmes de restriction/modification sont sur-exprimés en M1 que dans les deux autres méthodes, laissant présumer une attaque de phage. Enfin, la voie métabolique de Ehrlich qui mène à la production d'alcools primaires est sous-exprimée en M1 par rapport aux autres méthodes.

3.3.4. Conclusion

Cette étude a permis de montrer qu'en Tomme de Savoie, les particularités de chaque atelier ont un rôle majeur sur la dynamique du microbiote des fromages, leur diversité et leurs qualités organoleptiques. Également, le microbiote ne dépend que peu des méthodes de maturation, avec un effet maximal de 8 % seulement au moment de l'ensemencement. Pour autant, les notations organoleptiques montrent des différences marquées par atelier et une dépendance aux méthodes d'ensemencement. On peut émettre l'hypothèse qu'au début de l'affinage de nombreux métabolites sont produits et amènent à observer ces différences méthodes dépendantes dans les pâtes à 40 jours, conjointement à ce qui est observé en métatranscriptomique. L'hypothèse faite qu'un report du lait avec moins de ferments permet une plus grande diversité dans les pâtes est invalidée, du fait que l'on n'observe jamais une plus haute diversité seulement en M1. Il en va de même concernant la richesse

en ASV. Également, le report du lait avec moins de ferments ne montre pas d'intérêt gustatif et, au contraire, est plutôt corrélé à des défauts d'acidité ou de texture. Les activités relevées des deux souches majoritaires sont grandement dépendantes des stades, mais quelques métabolismes d'intérêt organoleptique ont également montré des différences d'expression suivant les méthodes de maturation et la fabrication. Les prochains essais devront être réalisés toutes choses égales par ailleurs, y compris l'origine du lait pour des questions impliquant l'activité métabolique, celle-ci pouvant être impactée par le substrat de départ.

3.4. Beaufort - Etude de l'impact des ferments cultivés en Beaufort, de leur effet sur les dynamiques microbiennes des pâtes et des qualités organoleptiques des fromages

Les ferments utilisés en Beaufort (AOP) sont dérivés d'une culture microbienne traditionnelle. La préparation de ces cultures peut varier suivant les ateliers, ce qui impacte leur composition microbienne. Le but de cette étude conduite dans 14 ateliers était d'obtenir une nouvelle image plus complète de la diversité et richesse des ferments, et de déterminer si certaines synergies de taxa pouvaient être liées aux qualités organoleptiques des fromages. Dans l'ensemble des ferments, 104 espèces ont été détectées pour 202 ASV. Deux espèces étaient majoritairement représentées : *Lactobacillus helveticus* et *Lactobacillus delbrueckii*. Les ferments ont pu être classés en 6 groupes, en fonction de leur composition bactérienne par clustering. Ni la richesse spécifique n'était significativement différente selon les groupes de ferments, ni la richesse en ASV. La diversité en ASV était en revanche significativement différente, avec le groupe 5 en particulier qui présentait une diversité particulièrement basse. De même, la diversité en espèces de ce groupe était significativement plus basse que celle de tous les autres groupes. Ce groupe montre donc des proportions de taxons moins homogènes que les autres. Les qualités organoleptiques des fromages à 240 jours ont pu être corrélées à certains groupes. Le groupe 1 était lié à des pâtes moins amères et plus intenses aromatiquement. Le groupe 2 à des fromages faiblement amers et divers aromatiquement. Le groupe 3 n'a pas montré de liens avec les qualités des pâtes, les fromages obtenus n'avaient pas de particularités. Le groupe 4 était lié à des fromages avec une bonne intensité aromatique. Le groupe 5, le moins divers, était lié à des fromages présentant des défauts d'amertumes, une faible diversité aromatique, une faible intensité aromatique et une acidité insuffisante des pâtes. Enfin, le groupe 6 présentait des pâtes très peu amères, et une diversité aromatique intermédiaire. Également, la diversité de Shannon des ferments était liée significativement à la diversité aromatique des fromages. Plus cette dernière était élevée, plus la diversité de Shannon l'était aussi. La fermeté des fromages était également dépendante de la diversité des ferments, plus cette dernière était élevée, plus les fromages présentaient des notes de fermeté recherchées.

3.5. Tome des Bauges - Etude de l'impact de la température de report du lait sur les communautés bactériennes et fongiques des fromages, et leurs qualités organoleptiques

La fabrication de la Tome des Bauges (AOP) permet le report du lait lors de ses fabrications, et donc l'utilisation du lait de la veille pour les fabrications du matin. Le but de cette étude était de déterminer si le report du lait à deux températures différentes (9°C et 13°C) avait un impact sur la dynamique microbienne bactérienne et fongique lors de l'affinage et sur les qualités organoleptiques des fromages. Des témoins ont également été réalisés avec une température de report de 6°C mais ces laits n'ont pas donné lieu à des fabrications fromagères. Cet essai a rencontré des problèmes techniques, les deux températures ciblées n'ayant pu être obtenues que dans un seul atelier sur les trois faisant partie de l'étude. Les deux autres ateliers ont montré des gradient thermiques atelier dépendants. Également, les analyses organoleptiques n'ont pu être réalisées en raison du confinement. Les diversités de Shannon des laits crus, des laits reportés et des laits à 6°C n'étaient pas différentes en fonction des ateliers. Dans l'atelier ayant le plus respecté les températures de report, l'indice de diversité de Shannon des ASV bactériennes des pâtes des fromages était corrélé négativement à la température de report des

laits, avec un alpha de 10 %. Tout atelier confondu, une interaction entre le pH du lait de report et la température du lait de report a été détectée sur la diversité des pâtes. Plus le pH du lait reporté était faible, plus l'augmentation de la température de report diminuait fortement la diversité de Shannon des pâtes. Les diversités étaient plus fortes quand les pH étaient plus faibles et la température de report également. Ces observations étaient plus fortes concernant l'atelier ayant respecté les températures de report. La durée de maturation a montré une corrélation positive forte avec la diversité bactérienne des pâtes. Les deux ateliers avec suffisamment d'écarts de températures ont montré plus d'espèces du lait cru dans les pâtes à 40 jours quand la température de report était plus froide. La diversité des ASV fongiques des pâtes à 40 jours était corrélée négativement avec le pH du lait reporté. L'effet température n'a pas été détecté concernant ces communautés.

3.6. Conclusion

Cette action fera école en proposant des exemples de démarches méthodologiques intégrant des approches physico-chimiques, sensorielles et multi-omiques pour aborder des questionnements portés par les terrains. Cependant, ces démarches ne sont pas généralisables telles quelles. La définition d'une question scientifique suffisamment spécifique à partir de la question de terrain et la construction d'un dispositif expérimental adapté sont des étapes critiques pour que les approches omiques puissent apporter des éléments de réponse. Pour le déploiement de ces approches sur d'autres questions ou filières à l'issue du projet, il sera important de mobiliser dès cette étape à la fois des acteurs techniques des filières et des scientifiques (cf. 3).

4. Accompagnement des filières : ressources et réseau d'experts

4.1. Une panoplie de ressources pour les filières fromagères

L'enjeu de ce projet était notamment de proposer aux filières fromagères sous signe de qualité une panoplie de ressources pour leur permettre d'étudier des écosystèmes microbiens et de répondre à des problématiques technologiques en utilisant les méthodes omiques.

Pour cela, le collectif de partenaires a été attentif à :

- vérifier la capacité de ces méthodes à **répondre à des questionnements des filières** - la réalisation d'expérimentations sur des terrains très différents et la capitalisation des études précédentes ont permis d'obtenir une panoplie de démarches méthodologiques et de retours d'expériences qui sont compilés dans un guide, disponible pour les filières ;
- vérifier la capacité de ces méthodes à être utilisées **sur toutes les technologies fromagères** - le choix des terrains d'essais et des protocoles a permis de tester différents types de fromages et de réaliser des prélèvements à différents temps technologiques ;
- obtenir des résultats sous une forme **utilisable par les professionnels** - cela se traduit par la création de ressources numériques (cf.3.2.) et documentaires (disponible sur la plateforme RD-Agri) pour favoriser l'accompagnement des filières à la compréhension et à l'appropriation des résultats, l'organisation d'événements pour sensibiliser et former les professionnels (niveau national et régional), mais aussi l'identification de structures terrain relais pour accompagner les filières dans la mise en place d'expérimentation et l'exploitation des résultats et l'implication des filières dans la construction et l'analyse des essais ;
- faire en sorte que ces méthodes puissent être **utilisées sur le terrain** - pour cela des réseaux scientifiques et techniques nationaux ont été mis en place avec l'identification de pôles de ressources au niveau régional, via une cartographie des compétences (cf.3.3.). Le consortium

travaille également au maintien et au transfert des compétences scientifiques entre les partenaires nationaux et régionaux.

Les membres du consortium peuvent s'appuyer sur le RMT Fromages de Terroirs pour la communication autour des résultats du projet.

4.2. Fromic : un outil numérique pour l'autoformation des filières fromagères de terroir sur les microbiotes et les méthodes omiques

Fromic est un **outil numérique**, interactif et libre d'accès, créé pour les acteurs des filières fromagères, sur la thématique des microbiotes (de la prairie au fromage) et des méthodes omiques. Il a pour objectif de faciliter l'utilisation des méthodes omiques par les filières, de les sensibiliser aux enjeux des écosystèmes microbiens et d'accompagner l'autoformation des acteurs (filières, conseillers, étudiants…) sur ces thématiques.

Méthodologie - La réalisation de Fromic a nécessité une implication conséquente des partenaires du projet Adamos et également de membres du RMT Fromages de Terroirs. La structure de l'outil et les objectifs pédagogiques ont été définis collectivement, ainsi que l'ossature globale et la priorisation des contenus à produire. Les contenus à intégrer ont été produits dans le cadre d'ateliers, puis validés collectivement avant d'être mis en ligne. Les avis des utilisateurs ont été collectés lors d'ateliers et par un questionnaire accessible sur la page d'accueil de l'outil.

Résultats - Le projet Adamos a permis de construire une première version fonctionnelle de Fromic, qui peut être utilisée en auto-formation ou par des formateurs, et présente l'avantage de pouvoir centraliser de nombreuses informations et ressources sur les méthodes omiques et les écosystèmes microbiens. L'outil est structuré en plusieurs parties, selon les objectifs des utilisateurs : s'informer sur les méthodes omiques, s'informer sur les écosystèmes microbiens, se former à l'application des méthodes omiques (mise en place d'un essai) et se former à l'interprétation des graphiques. Une attention particulière a été portée à la pédagogie des contenus, avec l'intégration d'infographies, de vidéos et de quizz. Pour les utilisateurs plus experts des thématiques abordées, des ressources sont téléchargeables (fiches, modèles, guide méthodologique). Les utilisateurs sont unanimes sur l'intérêt global de l'outil, la forme et la structure de l'outil en particulier ont été appréciées. Les nombreux retours collectés permettront de poursuivre l'amélioration de l'outil, qu'il est prévu de compléter dans le cadre du projet CASDAR Assimilaic (2024-2027).

4.3. Cartographie des compétences

Le projet Adamos a mobilisé trois terrains d'étude et des terrains associés (Normandie et Occitanie). Les méthodes d'analyses ont été testées, adaptées et améliorées sur tous les cas rencontrés. A la fin du projet, les enjeux sont multiples :

- s'assurer du maintien en compétence des personnes présentes sur les terrains du projet - cela se fera via les réseaux mis en place ;
- déployer ces méthodes à l'ensemble du territoire en fournissant des ressources à l'ensemble des filières fromagères sous signe de qualité - pour cela l'idée est de s'appuyer sur les experts régionaux déjà formés pour qu'ils deviennent des relais sur leurs territoires.

Pour faciliter l'accès à ces personnes ressources, un outil numérique en ligne a été créé en utilisant la technologie Google My Maps. Il s'agit d'une cartographie des compétences. Le support numérique permet une évolution éventuelle de cet outil. Il s'agit d'une carte sur laquelle sont localisées les personnes ressources. En cliquant sur l'icône de la structure-relai, l'utilisateur a accès aux renseignements suivants : nom du contact, compétences, coordonnées mails et postales.

Pour faciliter la recherche et faire le lien avec la structuration de l'outil Fromic, des catégories ont été créées. Elles reprennent les différentes étapes de la réflexion à mener lorsque l'on souhaite réaliser une expérimentation. Ainsi, l'utilisateur choisit la compétence recherchée, sélectionne la catégorie et a accès à toutes les ressources correspondantes via une carte de type Google Maps. Il peut facilement naviguer et trouver les coordonnées des personnes les plus proches.

Cette cartographie des compétences est accessible via l'outil numérique Fromic (http://tinyurl.com/fromic), dans chaque rubrique où cela est pertinent.

4.4. Constitution d'un réseau d'experts sur les méthodes omiques

Les travaux engagés sur l'adaptation des méthodes omiques aux filières fromagères ainsi que l'expérience issue de leur application sur trois territoires ont appuyé une montée en compétences collective à l'interface entre la recherche et les filières. Ce projet a amené à approfondir les liens de travail entre les personnes de ces différents réseaux. Par ailleurs, ce champ scientifique étant en développement constant, les acteurs du projet ont jugé nécessaire de se mobiliser collectivement au-delà du projet pour maintenir cette dynamique et cette compétence collective.

L'inscription du projet Adamos au sein du RMT Fromages de Terroirs a permis de fournir un cadre d'organisation permettant d'envisager la suite. En ce sens, les membres du RMT et du projet Adamos ont validé la création d'un réseau d'experts pérenne sur les méthodes omiques et leur application dans le domaine fromager, en lien avec le groupe « Écosystèmes microbiens » déjà existant dans le RMT.

L'objectif de ce réseau est de porter le partage et le transfert méthodologique sur les méthodes omiques. Cela se traduit par des échanges sur la veille scientifique, les projets en cours et des retours d'expériences. Ce réseau devra également faciliter le transfert des nouvelles méthodologies développées au niveau national vers les relais régionaux plus à même d'adapter ces éléments aux problématiques des filières fromagères locales. Ensemble, les participants pourront contribuer à la mise à jour des outils et documents techniques issus du projet Adamos également pour les adapter dans le temps. Enfin, les relais régionaux pourront faire remonter au réseau, leurs besoins et leurs réflexions sur les outils omiques et contribuer ainsi à la formation de questions d'intérêt au niveau national.

Ce réseau rassemble ainsi des centres techniques et des académiques en lien direct avec les filières et des académiques spécialisés sur les méthodes omiques. Une animatrice issue d'un centre technique, Actalia, également engagé dans le RMT Fromages de Terroirs, a ainsi été identifiée. Elle a pour mission de faire vivre ce réseau notamment en organisant des rencontres régulières pour faciliter les échanges et en mobilisant un outil de communication interactif et fluide pour maintenir le lien au fil de l'eau.

5. Conclusion

Le projet ADAMOS a permis de faciliter l'utilisation des méthodes omiques par les filières fromagères, en rendant disponibles des méthodologies adaptées à leurs contextes, par exemple un guide méthodologique pour le metabarcoding ADN et un protocole pour l'extraction et le séquençage de l'ARN. Ces méthodes ont été appliquées à des questionnements concrets des filières sur trois terrains (Auvergne, Franche-Comté et Savoie), dans le cadre de cinq études complémentaires, portant sur des technologies différentes. Un réseau dynamique est prêt à accompagner les filières fromagères dans ces démarches, avec des experts identifiables grâce à un outil de cartographie de compétences et la mise en place du réseau « méthodes omiques » à l'interface entre la recherche et l'accompagnement des filières fromagères. Enfin, l'organisation d'évènements et la mise à disposition de ressources, notamment via l'outil Fromic, ont permis de sensibiliser les filières fromagères à la question des écosystèmes microbiens et de les informer sur le potentiel et les limites des méthodes omiques pour traiter leurs questionnements.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les demandes concernant les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont à adresser à l'auteur de correspondance de l'article, qui se chargera de transmettre aux personnes concernées.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Christophe Monnet : https://orcid.org/0000-0003-2647-272X

Eric Dugat-Bony : https://orcid.org/0000-0002-5182-0063

Cresciense Lecaude : https://orcid.org/0009-0006-8167-6927

Yvette Bouton : https://orcid.org/0000-0002-9308-6020

Elisa Michel : https://orcid.org/0000-0003-4888-0732

Isabelle Verdier-Metz : https://orcid.org/0000-0001-6002-3878

Blandine Polturat : https://orcid.org/0009-0004-4920-8627

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont contribué de manière significative à la rédaction et/ou à la révision critique de cet article, et ont approuvé la version finale soumise pour publication.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs et autrices remercient chaleureusement l'ensemble des partenaires du projet Adamos ainsi que du RMT Fromages de Terroirs, les filières qui se sont investies dans le projet ainsi que les ateliers de transformation qui ont participé aux études.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a bénéficié de financements du ministère de l'Agriculture et de l'alimentation (CASDAR) et des conseils départementaux de Savoie et Haute-Savoie (Plan filière lait cru), que nous remercions pour leur soutien.

Références bibliographiques

Cantor M.D., Van den Tempel T., Hansen T.K., Ardö Y., 2017. Blue Cheese. Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology 2, 929–954.

Carbonne C., Labadie K., Cruaud C., Brun E., Barbe V., Monnet C., 2022. Metatranscriptomics of Cheese Microbial Communities: Efficiency of RNA Extraction from Various Cheese Types and of mRNA Enrichment. International Journal of Food Microbiology 373. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109701

Donnelly C., Kehler M., 2016. The Oxford companion to cheese. Oxford University Press. https://hal.science/hal-01511991v1.

Dugat-Bony E., Polturat B., Delbès C., Achilleos C., Lecaudé C., Tormo H., Dalmasso M., Orieux N., Chuzeville S., Theil S., Bouton Y., 2024. Guide méthodologique pour la réalisation d'une expérience de métabarcoding ADN à partir d'échantillons de lait ou de fromages à destination des experts et laboratoires. https://hal.inrae.fr/hal-04817672v1.

Montel M.-C., Buchin S., Mallet A., Delbes-Paus C., Vuitton D.A., Desmasures N., Berthier F., 2014. Traditional cheeses: rich and diverse microbiota with associated benefits. International Journal of Food Microbiology 177, 136–154.

Pour citer cet article : Christophe Monnet, Eric Dugat-Bony, Céline Delbès, Cresciense Lecaudé, Yvette Bouton, *et al*.. ADAMOS - Un nouveau regard sur les écosystèmes microbiens laitiers et fromagers apporté par les méthodes omiques. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.342-356. 10.17180/ciag-2025-vol107-art25

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

DiVin Cidre : Développement d'itinéraires techniques pour optimiser le caractère fruité des vins et des cidres

Pascal POUPARD [1], Frédéric CHARRIER [2], Philippe COTTEREAU [3], Stéphane DELPECH [4], Elise SALANOUVE [4], Laurent DAGAN [4], Erick CASALTA [5], Jean-Roch MOURET [5], Rémi BAUDUIN [1]

[1] IFPC - Domaine de la motte, 35650 Le Rheu, France

[2] IFV - Château de la Frémoire, 44120 Vertou, France

[3] IFV - 7, Avenue Yves Cazeaux, 30230 Rodilhan, France

[4] NYSEOS - La Jasse de Maurin, 34970 Lattes, France

[5] INRAE SPO - 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France

Correspondance : pascal.poupard@ifpc.eu

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art26

Résumé

Pour les vins et les cidres, l'arôme est un élément essentiel dans l'appréciation des produits par les consommateurs qui recherchent globalement des produits avec un profil aromatique « fruité ». A ce jour, peu de paramètres de qualité des moûts permettent aux professionnels de prévoir le profil aromatique des vins et des cidres « à coup sûr », même lorsque les itinéraires techniques sont parfaitement maîtrisés. L'approche proposée dans ce projet Casdar DiVin Cidre visait à prendre en considération plusieurs facteurs nutritionnels des levures (azote, lipides) entrant dans la composition des moûts, pour mieux expliquer la formation des composés aromatiques marqueurs du « fruité. Ces travaux mettent en évidence la possibilité d'utiliser différents leviers pour moduler la composante aromatique des cidres et des vins : 1) la qualité de la matière première (variétés, maturité des fruits…), 2) les conditions pré-fermentaires (macération, stabulation…), 3) la teneur en azote assimilable des moûts, 4) la teneur en lipides des moûts en lien avec la gestion des bourbes, 5) le rapport de concentration azote / lipides. La mise en œuvre de ces leviers permet d'envisager des solutions de pilotage afin obtenir des produits avec des profils aromatiques diversifiés

Mots-clés : arômes, boissons fermentées, fermentation, nutriments, azote, lipides

Abstract: Development of technical practices to optimize the fruity character of French ciders and wines.

For wines and French ciders, aroma is an essential element in the appreciation of products by consumers who generally look for products with a « fruity » aromatic profile. To date, few must quality parameters allow professionals to predict the aromatic profile of wines and French ciders « for sure », even when the technical practices are perfectly controlled. The proposed approach in the Casdar DiVin Cidre project aimed to take into consideration several nutritional factors of yeast (nitrogen, lipids) entering into the composition of musts, to better explain the formation of aromatic compounds that are markers of « fruitiness ». Highlighting the nutritional factors that have the greatest impact on the « fruitiness » of wines and French ciders allows us to propose a more relevant analytical diagnosis of the « fruity aromatic potential » of musts, but also to select technical itineraries that favor them.

Keywords: aroma, wine, cider, fermentation, nutrients, nitrogen, lipids

1. Introduction

La qualité aromatique des cidres et des vins est un élément important de l'appréciation des produits par les consommateurs. Sa maîtrise est donc essentielle mais reste un défi à chaque millésime pour les élaborateurs car cela implique le contrôle de nombreux paramètres allant de la qualité de la matière première jusqu'à la conservation des produits finis.

Les travaux de recherche sur les arômes des vins et des cidres sont nombreux et ont permis d'identifier une multitude de composés volatiles dont certains ont un rôle clé sur la composante aromatique des produits (Ferreira, 2010 ; Ferreira and Cacho, 2009). Parmi ceux-ci, les esters d'acétates et éthyliques, ainsi que les thiols variétaux jouent un rôle important dans l'équilibre sensoriel et la perception « fruitée » des vins et des cidres (Bauduin *et al*., 2012 ; Lytra *et al*., 2012 ; Pineau *et al*., 2009). Même s'ils n'expliquent pas toute la diversité aromatique, ils offrent la possibilité, en fonction des concentrations de chacune des molécules, de construire une diversité de profils sensoriels.

Les thiols variétaux dont le 3-sulfanylhexan-1-ol (3SH), l'acétate de 3-sulfanylhexyle (ac3SH) et la 4-mercapto-4-méthylpentan-2-one (4MMP), ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières décennies. Ces composés ont suscité un intérêt certain car, même à de très faibles concentrations, ils peuvent avoir un impact olfactif important, du fait de leur seuil de perception très bas. Ainsi, leurs seuils de perception en solution hydro-alcoolique sont respectivement de 60 ng/L, 4,2 ng/L et 0,8 ng/L (Du Plessis and Augustyn, 2017 ; Tominaga *et al*., 2000). Ces composés sont connus pour apporter aux produits des notes puissantes d'agrumes, de fruits de la passion et de cassis dans les vins (Darriet, 1993 ; Tominaga *et al*., 2000 ; Wilson, 2017). Les esters d'acétate et éthyliques produits lors de la fermentation, jouent également un rôle essentiel dans la composante aromatique « fruitée » des vins et des cidres (Ferreira and Cacho, 2009 ; José Anton *et al*., 2014 ; Lytra *et al*., 2012). Cependant, à fortes concentrations, certains esters tels que l'acétate d'éthyle apportent des notes de solvant peu recherchées.

Les esters et les thiols sont produits selon différentes voies métaboliques qui impliquent systématiquement des levures (Dubourdieu *et al*., 2006 ; Murat *et al*., 2001). C'est donc au cours de la fermentation alcoolique que la construction du profil aromatique connaît une progression décisive pour la qualité des boissons fermentées. Au-delà des paramètres technologiques (température…) et biotechnologiques (choix de la souche de levures…), un certain nombre de paramètres (azote et lipides) liés directement à la qualité des moûts, va influencer le métabolisme des levures, ainsi que la cinétique fermentaire et la révélation des arômes.

Dans les moûts, la teneur en azote assimilable a un impact sur la cinétique fermentaire et le bouquet aromatique des vins : (1) la teneur en esters augmente avec la concentration en azote assimilable (Mouret *et al*., 2014 ; Rollero *et al*., 2015) ; (2) une forte concentration en ammonium entraîne une baisse de la révélation des thiols (Subileau *et al*., 2008 ; Thibon *et al*., 2008). D'autre part, des travaux ont montré que les acides aminés sont assimilés de manière différente par les levures (Crépin *et al*., 2012). En effet, pour des niveaux d'azote assimilable équivalents, des variations dans le profil en acides aminés des moûts entraînent des variations dans la conversion des précurseurs de thiols et la révélation des thiols variétaux, des esters et des alcools supérieurs (Alegre *et al*., 2017).

Les lipides sont un paramètre nutritionnel clé pour la multiplication et la viabilité des levures en fin de fermentation (Tumanov *et al*., 2015a, 2015b). Ces lipides composés d'acides gras et de phytostérols sont essentiels pour deux mécanismes : l'assimilation de l'azote par la levure au cours de la fermentation (Casalta *et al*., 2019) et le maintien de l'intégrité de la membrane cellulaire (Lafon-Lafourcade *et al*., 1979). La levure participe également à la production des acides gras par voie anabolique mais également pas voie catabolique, en présence d'oxygène (Schreier and Jennings, 1979). Dans les moûts, ces lipides sont apportés par les particules solides en suspension, et plus particulièrement par ce que l'on appelle communément les bourbes. Leur teneur, mesurée

indirectement par la turbidité, dépend donc du niveau de clarification appliquée, même si la corrélation entre lipides et turbidité n'est pas évidente (Casalta *et al*., 2019).

Plusieurs études montrent que les bourbes (Alexandre, 1994) et la nature des lipides (Tumanov *et al*., 2015b) jouent un rôle sur les cinétiques fermentaires. Bien que la formation des composés aromatiques durant la vinification dépende de plusieurs facteurs (Styger *et al*., 2011), la disponibilité des lipides dans les moûts impacte la formation d'esters d'acétate et d'esters éthyliques, dans les vins (Rosi and Bertuccioli, 1992 ; Varela *et al*., 2012). De manière plus spécifique, plusieurs études montrent que la modification de la composition en acides gras entraîne des modifications de ces mêmes composés aromatiques fermentaires, mais également des thiols variétaux (Casu *et al*., 2016 ; Deroite *et al*., 2018 ; Ochando *et al*., 2017 ; Pinu *et al*., 2014 ; Tumanov *et al*., 2018). De la même façon, les phytostérols influencent la production d'esters d'acétate et d'esters d'éthyliques (Rollero, 2015). Leur dosage dans les bourbes pourrait être une alternative aux mesures de turbidité dans les moûts et permettre un meilleur contrôle de la fermentation (Casalta *et al*., 2019). Les stérols et les acides gras jouent ainsi un rôle majeur au cours de la fermentation alcoolique. Par conséquent, pour aider au pilotage de la fermentation, un meilleur contrôle de la balance azote/lipide par l'analyse d'un nouvel indicateur lipidique, apparaît pertinent (Duc *et al*., 2017 ; Liu *et al*., 2018 ; Tesnière *et al*., 2013).

A ce jour, les élaborateurs n'ont pas une vision précise et exhaustive de la qualité des moûts par manque d'information. Certains paramètres tels que l'azote assimilable constituent une information fiable et opérationnelle pour évaluer la potentialité des moûts (durée de fermentation et révélation des arômes). Toutefois, l'impact parfois fort du millésime sur la révélation des arômes montre qu'il est difficile d'anticiper précisément un profil aromatique sur la base de ces seuls paramètres. L'application d'itinéraires constants et maîtrisés ne garantit pas l'obtention du profil souhaité. Les élaborateurs expriment donc le besoin d'évaluer les potentialités aromatiques du futur produit de manière anticipée pour faire un choix technique raisonné en fonction de la cible produit fixée.

Les objectifs poursuivis dans le cadre du projet Casdar DiVinCidre étaient donc de :

- comprendre l'impact de la composition des moûts sur la génération de composés volatils « fruités » (esters d'acétate, esters éthyliques et arômes variétaux de type thiols) dans les cidres et les vins ;
- évaluer l'impact du choix de la matière première (variété, maturité…) et des opérations pré-fermentaires (cuvage, stabulation, macération…) sur les critères clés de la composition des moûts ;
- définir des stratégies de pilotage du « fruité » des vins et des cidres par la maîtrise préalable de la qualité des moûts (choix de la matière première et des opérations pré-fermentaires…) et mettre ces solutions de pilotage à disposition des filières cidricole et viti-vinicole.

2. Résultats et discussion

2.1. Caractérisation de la composition des moûts

2.1.1. Cas des moûts de pomme

Au cours du millésime 2019, une vingtaine de moûts a été collectée par l'IFPC (Institut français des productions cidricoles) pour évaluer la diversité de composition des moûts (azote assimilable, acides gras libres et précurseurs de thiols). Les moûts provenaient, soit de différents élaborateurs de la filière, soit de fabrications à l'échelle pilote en conditions contrôlées, sur la base d'itinéraires techniques supposés comme favorisant la diversité.

La Figure 17A présente la distribution de la teneur en azote assimilable dans une vingtaine de moûts de pomme. Ainsi, pour les moûts collectés en 2019, la teneur en azote assimilable variait de 6 à 84 mgN/L

avec une teneur moyenne de 42 mgN/L, ce qui est globalement un peu plus faible que dans les moûts de raisin (Figure 18A).

La Figure 17B fait apparaître la distribution des moûts de 2019 en précurseurs de thiols (précurseurs du 3SH) avec une teneur moyenne de 168 nM. Ces précurseurs peuvent être à l'origine de thiols variétaux dont le 3SH et son acétate qui sont connus pour leur contribution à la composante aromatique « fruité » des cidres. A noter que les teneurs en précurseurs de thiols sont bien inférieures à ce que l'on peut rencontrer dans les moûts de raisin (Figure 18B). Toutefois même si, en comparaison, les valeurs paraissent faibles, l'effet aromatique pourrait être considérable si l'ensemble de ce gisement était converti en composés volatils odorants.

La Figure 17C illustre la teneur moyenne en acides gras libres (AGL) présents dans différents types de moûts. Les moûts obtenus par clarification haute ont des teneurs moyennes en AGL plus importantes que ceux obtenus par dépectinisation. Ces résultats suggèrent une plus grande extraction des lipides provenant des bourbes, lors de la clarification haute.

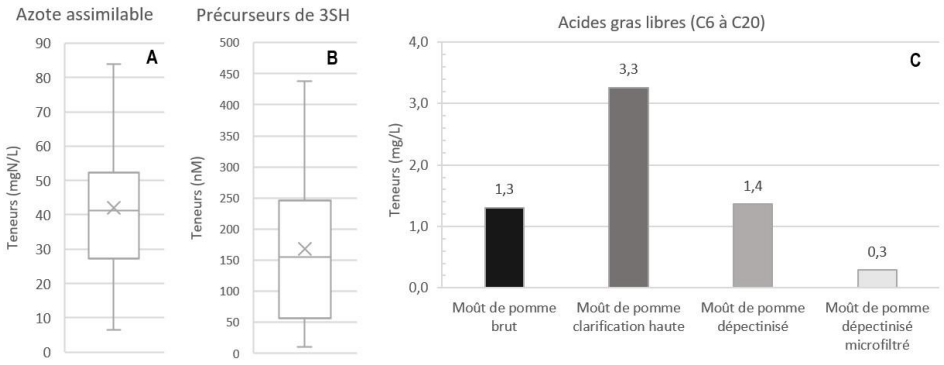


Figure 17 : Diagrammes de Tukey des teneurs en azote assimilable (A), en précurseurs du 3-sulfanylhexan-1-ol (3SH) (B) dans les moûts de pomme ; Teneurs en acides gras libres (C6 à C20) selon le type de produits (C)

2.1.2. Cas des moûts de raisin

Au cours du millésime 2019, vingt-neuf moûts issus de différents cépages (Melon B., Sauvignon, Chardonnay, Pinot N., Chenin, Grolleau et Floréal) ont été collectés par l'IFV (Institut français de la vigne et du vin) pour évaluer la diversité de composition des moûts (azote assimilable, acides gras libres et précurseurs de thiols). Les moûts provenaient des régions du Val de Loire et du Languedoc.

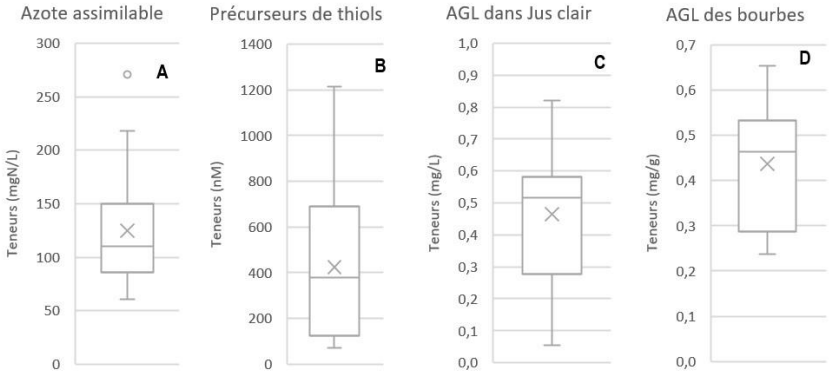


Figure 18 : Diagrammes de Tukey des teneurs en azote assimilable (A), en précurseurs de thiols (B) dans les moûts de raisins ; Teneurs en acides gras libres (C6-C20) dans les jus clair (C) et dans les bourbes (D)

La Figure 18A présente la distribution de la teneur en azote assimilable dans les différents moûts de raisins. La teneur moyenne retrouvée en 2019 est de 125 mgN/L, la majorité des jus étudiés se trouve donc carencé en azote. En effet, un moût est considéré comme carencé quand la valeur d'azote assimilable est inférieure à 140 mgN/L pour 12 % d'alcool potentiel.

La Figure 18B montre les teneurs en précurseurs de thiols. Les valeurs des quartile 1 et quartile 3 sont très différentes, 133 nM et 675 nM, respectivement. Il y a donc une forte variabilité entre les différents moûts qui laisse présager d'un potentiel en thiols très différent selon les matrices collectées, et notamment suivant les cépages.

La Figure 18C montre les concentrations d'acides gras libres (C6 à C20) dans les jus clairs après une centrifugation de 5 minutes à 10 000 RPM. Les teneurs en acides gras libres solubilisés dans les moûts complètement débourbés restent relativement faibles, ce qui est cohérent avec le fait que les lipides se retrouvent principalement dans les bourbes, comme le confirme la Figure 18D. En effet, pour 10 g de bourbes par litre de jus, celles-ci apporteraient en moyenne 90 % des acides gras libres. La Figure 18D indique également que la quantité de lipides apportée varie selon les bourbes, avec un écart de 2,8 entre les valeurs minimale et maximale.

2.2. Identification des facteurs nutritionnels clés favorisant la production d'arômes « fruités »

Des plans expérimentaux ont été mis en œuvre par l'INRAE SPO pour évaluer l'effet de l'azote assimilable et des lipides (apportées par les bourbes), sur la composante « fruité » des cidres et des vins.

2.2.1. Cas des cidres

Pour les cidres, l'analyse statistique des données fait ressortir le rôle prépondérant des nutriments azotés dans la synthèse **des arômes fermentaires**. Cette étude met notamment en évidence **l'effet positif de l'azote initial sur la formation d'esters d'acétate et éthyliques**. En effet, dans les conditions testées, plus il y a d'azote initialement présent dans le moût, plus la production en esters est importante dans les cidres. Cette observation constitue un résultat d'intérêt pour la filière cidricole, car ces esters contribuent de manière importante à la composante aromatique « fruité » des cidres.

La Figure 19 illustre bien l'effet positif de la concentration initiale en azote dans le moût sur la génération d'esters d'acétate, dans le cidre final. Dans les conditions testées, la teneur en acétate d'isoamyle (aux notes de banane) est ainsi multipliée par un facteur de 9 (Figure 19A) lorsque la teneur initiale en azote est multipliée par 3. Pour rappel, la teneur en azote assimilable dans les moûts collectés en 2019, était en moyenne de 42 mgN/L ce qui signifie que ces moûts se situaient dans la partie basse des graphiques, en matière de teneurs initiales en azote (Figure 19).

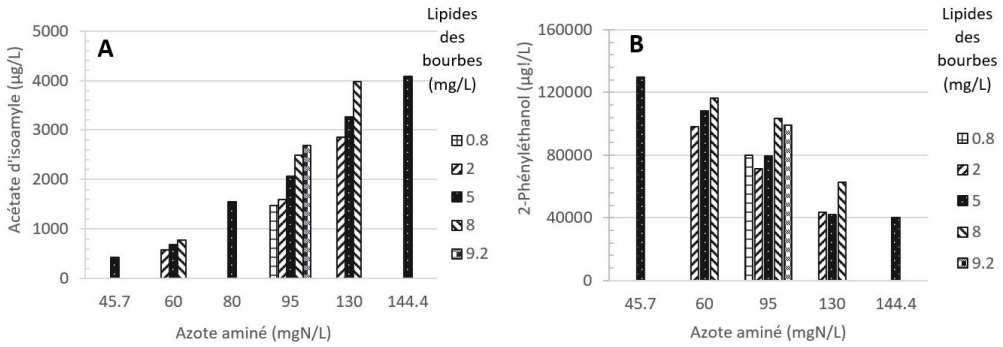


Figure 19 : Teneurs en acétate d'isoamyle (A) et 2-phényléthanol (B) des cidres, selon la teneur initiale en nutriments azotés et lipidiques des moûts de pomme

Cet effet positif de l'azote est également observé sur la formation d'autres esters d'acétates, dont l'acétate d'hexyle (aux notes de poire) avec un facteur multiplicatif de 7 (données non présentées). *A contrario*, le 2-phényléthanol (aux notes florales/rose) est impacté négativement par l'azote (Figure 19B). Ces résultats viennent confirmer ceux déjà obtenus dans le cadre d'autres projets menés par l'IFPC et laissent envisager la possibilité de moduler le profil aromatique des cidres et de diversifier ainsi la gamme.

La Figure 19 montre également un effet positif des lipides (apportés par les bourbes) sur la génération d'acétate d'isoamyle (notes de banane) et de 2-phényléthanol (notes florales/rose). Dans le contexte cidricole, les lipides des bourbes ont donc un effet positif sur la génération de ces composés volatils, même si cet effet est moindre que celui de l'azote.

2.2.2. Cas des vins

Pour les vins, la Figure 20 illustre bien l'effet positif de l'azote assimilable initialement présent dans le moût de raisin sur la génération d'esters d'acétate, dans le vin final. Ainsi, la teneur en acétate d'isoamyle (aux notes de banane) est multipliée par un facteur de 5,5 dans les vins lorsque la concentration initiale en azote augmente d'un facteur 2,4 (Figure 20A). Contrairement aux cidres, la teneur en lipides a un effet négatif sur la production d'acétate d'isoamyle, ce qui est cohérent avec une inhibition du processus d'acétylation (Casu *et al*., 2016).

Concernant le 3-sulfanylhexan-1-ol (3SH, aux notes de pamplemousse), les teneurs diminuent avec l'augmentation de la teneur en azote assimilable dans les moûts de raisin (Figure 20B), tandis que la concentration de son acétate augmente (données non présentées). Les lipides apportés par les bourbes ont un effet positif sur la production de 3SH, probablement par une augmentation de la teneur en précurseurs de thiols et une inhibition de l'acétylation du 3SH, dans les conditions testées.

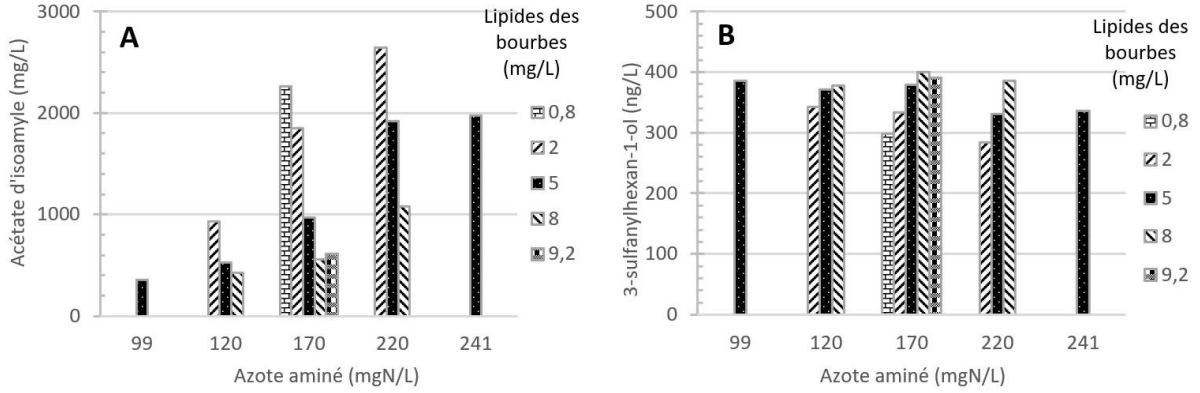


Figure 20 : Teneurs en acétate d'isoamyle (A) et 3-sulfanylhexan-1-ol (B) des vins, selon la teneur initiale en nutriments azotés et lipidiques des moûts de raisin.

2.3. Impact de la matière première et des conditions pré-fermentaires sur la composition aromatique des cidres et des vins

2.3.1. Cas des cidres

D'autres expérimentations ont été conduites pour évaluer l'effet de la maturité à la récolte et de la conservation post-récolte sur la composante aromatique des cidres. Le plan d'expérience prenait en compte deux maturités à la récolte (une récolte anticipée de 15 jours (J0-15 j.) et une récolte à (J0) soit à 50 % de chute des fruits) ainsi que trois durées de conservation post-récolte (+1j., +15j. et +30j.). Cette durée correspond à la période de conservation des fruits entre la récolte et leur transformation en jus. A noter que les fruits ont été récoltés à la main pour s'affranchir des problèmes de conservation qu'il peut y avoir après une récolte mécanique. Pour chacune des 5 modalités, les moûts issus de la

variété Guillevic, ont été mis à fermenter à l'échelle pilote, en conditions contrôlées. Les moûts ont ainsi été ensemencés avec *Saccharomyces uvarum*, une souche de levure d'origine cidricole.

L'analyse statistique des données montre l'importance de la maturité des fruits à la récolte et de la durée de conservation post-récolte sur la composante aromatique des cidres. Pour l'acétate d'hexyle (aux notes de poire), la durée de conservation post-récolte a un effet positif sur la génération de ce composé (Figure 21A). Ceci s'explique par une quantité plus importante de son précurseur (l'hexanol) dans les moûts correspondants, en lien avec la maturité des fruits (données non présentées). Ainsi, plus les pommes sont mûres, plus la teneur en hexanol est importante dans les moûts, et plus la teneur en acétate d'hexyle (aux notes de poire) sera importante dans les cidres.

Pour les thiols variétaux, la maturité à la récolte et la durée de conservation ont un effet sur la teneur en 3SH (notes de pamplemousse) dans les cidres (Figure 21B). Dans les conditions testées, la teneur en 3SH est maximale pour des fruits pressés à la maturité (J0) et pour la durée de conservation post-récolte la plus courte (pressage +1j. après la récolte).

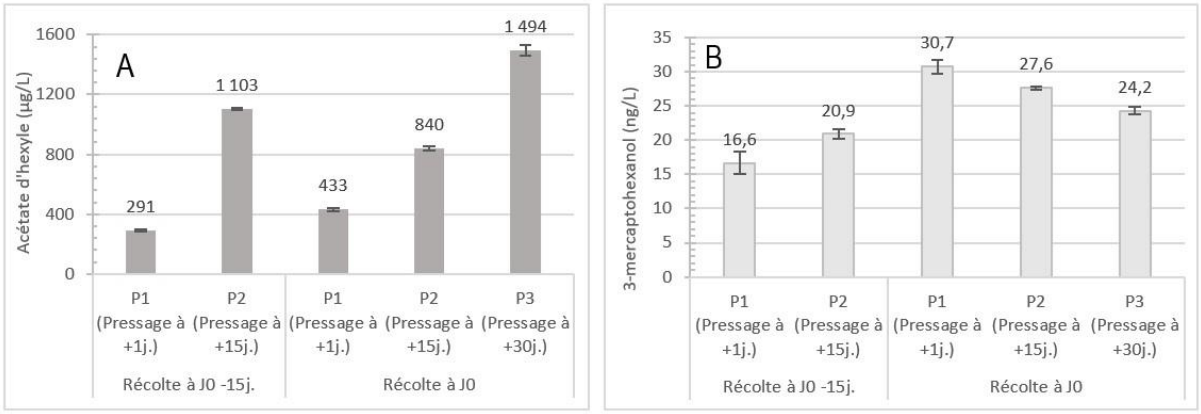


Figure 21 : Effet de la maturité à la récolte et de la durée de conservation post-récolte sur la génération d'arômes fruités dans les cidres issus de la variété Guillevic : (A) acétate d'hexyle (aux notes de poires) ; (B) 3-sulfanylhexan-1-ol (aux notes de pamplemousse).

2.3.2. Pour les vins

Des expérimentations ont été conduites à l'échelle pilote sur des raisins du cépage sauvignon de manière à préciser l'impact des traitements pré-fermentaires sur la qualité aromatique des vins, et plus particulièrement les teneurs en acétate d'isoamyle et 3-sulfanylhexan-1-ol (3SH).

Il est clairement confirmé que les teneurs en acétate d'isoamyle sont avant tout dépendantes du niveau de turbidité du moût et de leur teneur en azote assimilable (Figure 22A). Ainsi, les vins sont d'autant plus riches en acétate d'isoamyle que la turbidité du moût est faible et que la teneur en azote assimilable est élevée. Concernant le 3SH, les différences sont moins nettes, le composé étant avant tout dépendant du potentiel de précurseurs présents dans la matière première (Figure 22B). Pour autant, une turbidité du moût plus élevée semble plutôt favorable à la présence de ce composé dans les vins.

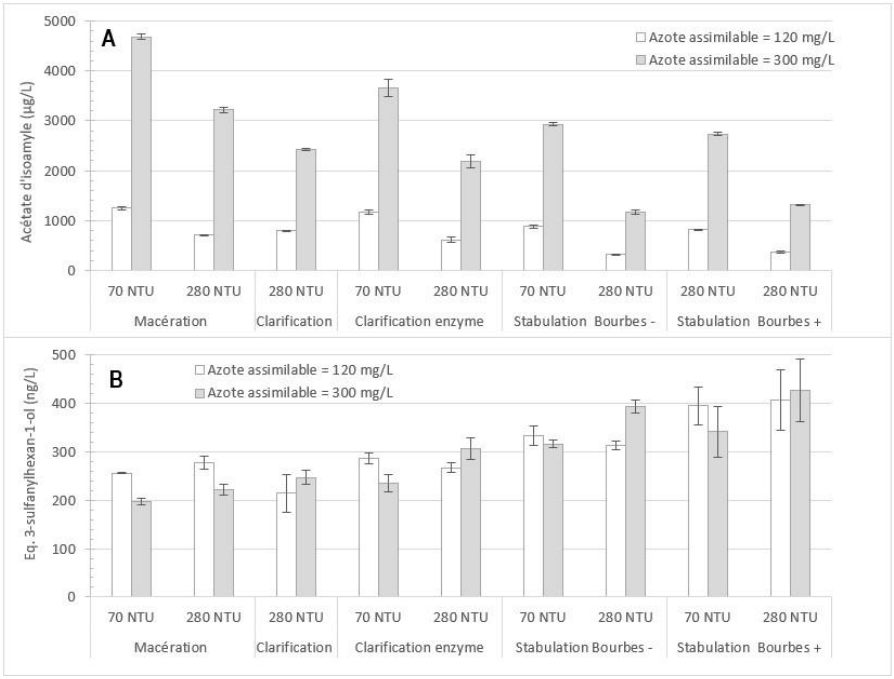


Figure 22 : Effet des traitements pré-fermentaires sur la composition aromatique des vins : acétate d'isoamyle (A) et 3-sulfanylhexan-1-ol (B). Macération pelliculaire et clarification avec enzymes pectolytiques ; Clarification spontanée ; Clarification avec enzymes pectolytiques ; Stabulation sur bourbes et clarification avec enzymes pectolytiques (SB - : jus clair ; SB+ : jus non débourbé). Azote assimilable modulée par apport de phosphate diammonique. NTU = Nephelometric turbidity unit (unité standard de mesure de la turbidité).

L'analyse des teneurs en lipides dans les moûts contribue à préciser ces observations. Une corrélation forte est mise en évidence entre le ratio azote / lipides et le taux d'acétylation de l'alcool isoamylique. La tendance est similaire concernant l'acétylation du 3SH. Ce ratio constitue donc un nouvel indicateur pertinent pour piloter la composition aromatique d'un vin à partir d'un moût donné (Figure 23).

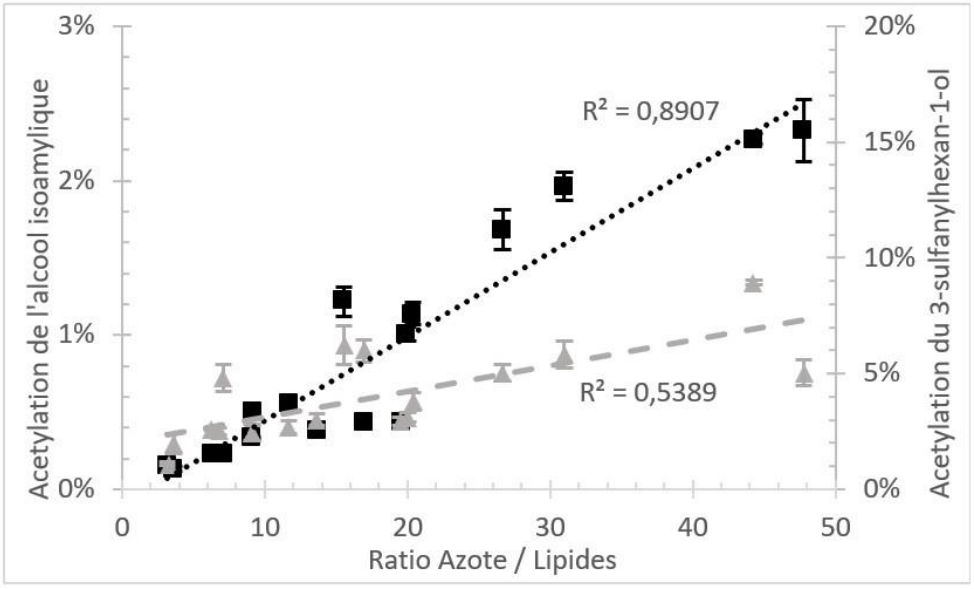


Figure 23 : Effet du ratio azote assimilable / lipides (acides gras libres + stérols) sur l'acétylation de l'alcool isoamylique (carré noir) et du 3-sulfanylhexan-1-ol (triangle gris).

Contrairement à la teneur en azote assimilable (liée à la constitution du raisin), les quantités de lipides contenues dans le moût sont très dépendantes des conditions opératoires avant fermentation alcoolique : macération pelliculaire, stabulation sur bourbes, emploi d'enzymes pectolytiques, niveau de clarification (Figure 24). Les différents itinéraires technologiques mis en œuvre lors des étapes pré-fermentaires constituent donc un levier pour moduler les teneurs en lipides des moûts. La mesure de la turbidité, quoi qu'utile en pratique, reste un indicateur technologique insuffisant pour évaluer finement la quantité de lipides présente dans le moût.

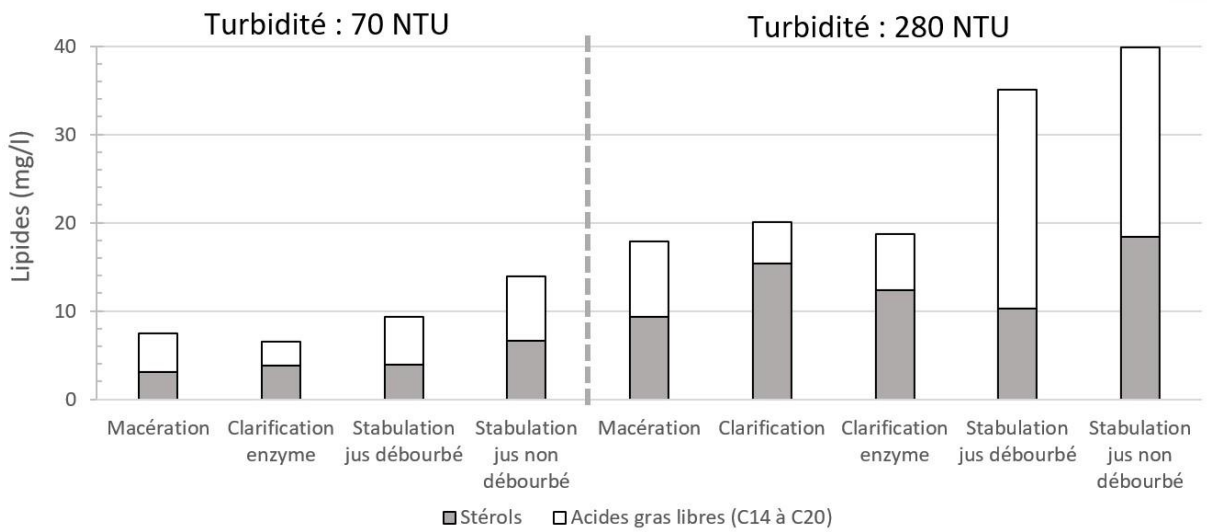


Figure 24 : Effet des traitements pré-fermentaires sur les teneurs en lipides (acides gras libres C14 à C20 et stérols) dans les moûts. NTU = Nephelometric turbidity unit (unité standard de mesure de la turbidité).

3. Conclusion

Le projet Casdar DiVin Cidre a permis de mettre en évidence l'importance de la composition des moûts en facteurs nutritionnels (azote, lipides) dans la production de composés aromatiques marqueurs du caractère « fruité » des vins et des cidres. L'azote et les lipides apparaissent comme des nutriments clés à contrôler pour moduler le profil aromatique de ces deux boissons.

En complément du rôle clé des nutriments, ce projet a également mis en lumière l'impact des opérations pré-fermentaires sur la composition en précurseurs et en nutriments des moûts et donc indirectement sur la composante aromatique des vins et cidres. Ces travaux apportent donc des éléments supplémentaires pour une meilleure compréhension de la génération d'arômes fruités de ces deux boissons.

Ces travaux mettent en évidence la possibilité d'utiliser différents leviers pour moduler la composante aromatique des cidres et des vins : 1) la qualité de la matière première (variétés, maturité des fruits…), 2) les conditions pré-fermentaires (macération, stabulation…), 3) la teneur en azote assimilable des moûts, 4) la teneur en lipides des moûts en lien avec la gestion des bourbes, 5) le rapport de concentration azote / lipides. La mise en œuvre de ces leviers permet d'envisager des solutions de pilotage afin obtenir des produits avec des profils aromatiques diversifiés. A titre d'exemple, pour les vins, les différentes typologies sont :

- profil « thiol » : turbidité élevée (200 – 250 NTU), rapport azote / lipides « équilibré » ;
- profil fermentaire : turbidité faible (100 NTU maxi), teneur en azote forte, rapport azote / lipides élevé ;
- des profils mixtes sont envisageables, en optimisant le rapport azote / lipides.

Enfin, l'obtention de vins et de cidres « fruités » est à raisonner de manière globale, et doit notamment tenir compte de l'état sanitaire des fruits, mais aussi s'accompagner de mesures d'hygiène pour éviter le développement de flores d'altération, notamment *Brettanomyces* connu pour son rôle dans la dégradation de marqueurs du fruité (Guichard *et al*., 2019).

Ce projet Casdar multi-filière a permis de confirmer le rôle clé de l'azote et des lipides sur la genèse des arômes en fermentation alcoolique. L'un des principaux enseignements de ce projet est la nécessité d'une gestion combinée de ces deux nutriments pour maximiser les concentrations en arômes impliqués dans la composante aromatique « fruitée » des vins et des cidres.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Pascal POUPARD : https://orcid.org/0000-0001-6755-9560

Contributions des auteurs

Conceptualisation : Pascal POUPARD, Frédéric CHARRIER, Philippe COTTEREAU, Laurent DAGAN, Elise SALANOUVE, Stéphane DELPECH, Erick CASALTA, Jean-Roch MOURET

Acquisition des données : Pascal POUPARD, Frédéric CHARRIER, Philippe COTTEREAU, Elise SALANOUVE, Stéphane DELPECH, Jean-Roch MOURET

Rédaction - préparation de la version originale : Pascal POUPARD, Frédéric CHARRIER, Jean-Roch MOURET

Rédaction - révision et édition : Pascal POUPARD, Frédéric CHARRIER, Stéphane DELPECH, Jean-Roch MOURET

Administration du projet et acquisition des fonds : Pascal POUPARD, Frédéric CHARRIER, Philippe COTTEREAU, Laurent DAGAN, Elise SALANOUVE, Stéphane DELPECH,

Jean-Roch MOURET, Rémi BAUDUIN

Tous les auteurs ont lu et approuvé la version publiée du manuscrit.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Le projet a reçu le soutien financier du fonds CASDAR du ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté Alimentaire et de la Forêt. « La responsabilité du ministère en charge de l'agriculture ne saurait être engagée ».

Références bibliographiques

Alegre, Y., Culleré, L., Ferreira, V., Hernández-Orte, P., 2017. Study of the influence of varietal amino acid profiles on the polyfunctional mercaptans released from their precursors. Food Research International 100, 740–747. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.081

Alexandre, H., 1994. Contribution à l'étude des bourbes: influence sur la fermentescibilité des moûts.

Bauduin, R., Gilles, Y., Guichard, H., Poupard, P., 2012. Les Arômes Des Cidres - partie 1. Pomme à Cidre 30, 15–18.

Casalta, E., Salmon, J.-M., Picou, C., Sablayrolles, J.-M., 2019. Grape Solids: Lipid Composition and Role during Alcoholic Fermentation under Enological Conditions. Am J Enol Vitic. 70, 147. https://doi.org/10.5344/ajev.2018.18049

Casu, F., Pinu, F.R., Fedrizzi, B., Greenwood, D.R., Villas-Boas, S.G., 2016. The effect of linoleic acid on the Sauvignon blanc fermentation by different wine yeast strains. FEMS Yeast Research 16, fow050. https://doi.org/10.1093/femsyr/fow050

Crépin, L., Nidelet, T., Sanchez, I., Dequin, S., Camarasa, C., 2012. Sequential use of nitrogen compounds by Saccharomyces cerevisiae during wine fermentation: a model based on kinetic and regulation characteristics of nitrogen permeases. Appl Environ Microbiol 78, 8102–8111. https://doi.org/10.1128/AEM.02294-12

Darriet, P., 1993. Recherches sur l'arôme et les précurseurs d'arôme du Sauvignon : applications technologiques. Thèse de Doctorat, Bordeaux 2, France.

Deroite, A., Legras, J.-L., Rigou, P., Ortiz-Julien, A., Dequin, S., 2018. Lipids modulate acetic acid and thiol final concentrations in wine during fermentation by Saccharomyces cerevisiae × Saccharomyces kudriavzevii hybrids. AMB Express 8, 130. https://doi.org/10.1186/s13568-018-0657-5

Du Plessis, C.S., Augustyn, O.P.H., 2017. Initial study on the guava aroma of Chenin Blanc and Colombar wines. South African Journal of Enology and Viticulture 2, 101–103.

Dubourdieu, D., Tominaga, T., Masneuf, I., Peyrot des Gachons, C., Murat, M.L., 2006. The Role of Yeasts in Grape Flavor Development during Fermentation: The Example of Sauvignon blanc. American Journal of Enology and Viticulture 57, 81–88. https://doi.org/10.5344/ajev.2006.57.1.81

Duc, C., Pradal, M., Sanchez, I., Noble, J., Tesnière, C., Blondin, B., 2017. A set of nutrient limitations trigger yeast cell death in a nitrogen-dependent manner during wine alcoholic fermentation. PLoS ONE 12.

Ferreira, V., 2010. Volatile aroma compounds and wine sensory attributes, in: Reynolds, A. (Ed.), Managing Wine Quality, Viticulture and Wine Quality. pp. 3–28. https://doi.org/10.1533/9781845699284.1.3

Ferreira, V., Cacho, J., 2009. Identification of Impact Odorants of Wines, in: Moreno-Arribas, M.V., Polo, M.C. (Eds.), Wine Chemistry and Biochemistry. Springer New York, New York, NY, pp. 393–415. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74118-5_18

Guichard, H., Poupard, P., Legoahec, L., Millet, M., Bauduin, R., Le Quere, J.-M., 2019. *Brettanomyces anomalus*, a double drawback for cider aroma. LWT-FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY 102, 214–222. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.033

José Anton, M., Suarez Valles, B., Garcia Hevia, A., Picinelli Lobo, A., 2014. Aromatic Profile of Ciders by Chemical Quantitative, Gas Chromatography-Olfactometry, and Sensory Analysis. Journal of Food Science 79, S92–S99. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12323

Lafon-Lafourcade, S., Larue, F., Ribereau-Gayon, P., 1979. Evidence for the Existence of « Survival Factors » as an Explanation for Some Peculiarities of Yeast Growth, Especially in Grape Must of High Sugar Concentration. Applied and Environmental Microbiology 38, 1069–1073. https://doi.org/10.1128/aem.38.6.1069-1073.1979

Liu, P.-T., Yu, K.-J., Li, Y.-T., Duan, C.-Q., Yan, G.-L., 2018. The content of linoleic acid in grape must influences the aromatic effect of branched-chain amino acids addition on red wine. Food Research International 114, 214–222. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.016

Lytra, G., Tempere, S., Revel, G. de, Barbe, J.-C., 2012. Impact of Perceptive Interactions on Red Wine Fruity Aroma. J. Agric. Food Chem. 60, 12260–12269. https://doi.org/10.1021/jf302918q

Mouret, J.R., Camarasa, C., Angenieux, M., Aguera, E., Perez, M., Farines, V., Sablayrolles, J.M., 2014. Kinetic analysis and gas–liquid balances of the production of fermentative aromas during winemaking fermentations: Effect of assimilable nitrogen and temperature. Food Research International 62, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.044

Murat, M.-L., Masneuf, I., Darriet, P., Lavigne, V., Tominaga, T., Dubourdieu, D., 2001. Effect of Saccharomyces cerevisiae Yeast Strains on the Liberation of Volatile Thiols in Sauvignon blanc Wine. American Journal of Enology and Viticulture.

Ochando, T., Mouret, J.-R., Humbert-Goffard, A., Sablayrolles, J.-M., Farines, V., 2017. Impact of initial lipid content and oxygen supply on alcoholic fermentation in champagne-like musts. Food Research International 98, 87–94. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.11.010

Pineau, B., Barbe, J.-C., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., 2009. Examples of Perceptive Interactions Involved in Specific « Red- » and « Black-berry » Aromas in Red Wines. J. Agric. Food Chem. 57, 3702–3708. https://doi.org/10.1021/jf803325v

Pinu, F.R., Edwards, P.J.B., Jouanneau, S., Kilmartin, P.A., Gardner, R.C., Villas-Boas, S.G., 2014. Sauvignon blanc metabolomics: grape juice metabolites affecting the development of varietal thiols and other aroma compounds in wines. Metabolomics 10, 556–573. https://doi.org/10.1007/s11306-013-0615-9

Rollero, S., 2015. Impact des paramètres environnementaux sur la synthèse des arômes fermentaires par Saccharomyces cerevisiae en fermentation œnologique, Thèse de Doctorat, SupAgro, Montpellier.

Rollero, S., Bloem, A., Camarasa, C., Sanchez, I., Ortiz-Julien, A., Sablayrolles, J.-M., Dequin, S., Mouret, J.-R., 2015. Combined effects of nutrients and temperature on the production of fermentative aromas by Saccharomyces cerevisiae during wine fermentation. Applied Microbiology and Biotechnology 99, 2291–2304. https://doi.org/10.1007/s00253-014-6210-9

Rosi, I., Bertuccioli, M., 1992. Influences of Lipid Addition on Fatty Acid Composition of Saccharomyces cerevisiae and Aroma Characteristics of Experimental Wines. Journal of The Institute of Brewing 98, 305–314.

Schreier, P., Jennings, W.G., 1979. Flavor composition of wines: A review. C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition 12, 59–111. https://doi.org/10.1080/10408397909527273

Styger, G., Prior, B., Bauer, F.F., 2011. Wine flavor and aroma. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology 38, 1145–1145. https://doi.org/10.1007/s10295-011-1018-4

Subileau, M., Schneider, R., Salmon, J.-M., Degryse, E., 2008. Nitrogen catabolite repression modulates the production of aromatic thiols characteristic of Sauvignon Blanc at the level of precursor transport. FEMS yeast research 8 5, 771–80.

Tesnière, C., Delobel, P., Pradal, M., Blondin, B., 2013. Impact of nutrient imbalance on wine alcoholic fermentations: nitrogen excess enhances yeast cell death in lipid-limited must. PLoS One 8, e61645. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061645

Thibon, C., Marullo, P., Claisse, O., Cullin, C., Dubourdieu, D., Tominaga, T., 2008. Nitrogen catabolic repression controls the release of volatile thiols by Saccharomyces cerevisiae during wine fermentation. FEMS Yeast Research 8, 1076–1086. https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2008.00381.x

Tominaga, T., Baltenweck-Guyot, R., Gachons, C.P.D., Dubourdieu, D., 2000. Contribution of Volatile Thiols to the Aromas of White Wines Made From Several Vitis vinifera Grape Varieties. Am J Enol Vitic. 51, 178. https://doi.org/10.5344/ajev.2000.51.2.178

Tumanov, S., Bulusu, V., Kamphorst, J.J., 2015a. Chapter Six - Analysis of Fatty Acid Metabolism Using Stable Isotope Tracers and Mass Spectrometry, in: Metallo, C.M. (Ed.), Metabolic Analysis Using Stable Isotopes, Methods in Enzymology. Academic Press, pp. 197–217. https://doi.org/10.1016/bs.mie.2015.05.017

Tumanov, S., Pinu, F.R., Greenwood, D.R., Villas-Bôas, S.G., 2018. Effect of free fatty acids and lipolysis on Sauvignon Blanc fermentation. Australian Journal of Grape and Wine Research 24, 398–405. https://doi.org/10.1111/ajgw.12352

Tumanov, S., Zubenko, Y., Greven, M., Greenwood, D.R., Shmanai, V., Villas-Boas, S.G., 2015b. Comprehensive lipidome profiling of Sauvignon blanc grape juice. Food Chemistry 180, 249–256. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.134

Varela, C., Torrea, D., Schmidt, S.A., Ancin-Azpilicueta, C., Henschke, P.A., 2012. Effect of oxygen and lipid supplementation on the volatile composition of chemically defined medium and Chardonnay wine fermented with Saccharomyces cerevisiae. Food Chemistry 135, 2863–2871. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.127

Wilson, C., 2017. Chemical evaluation and sensory relevance of thiols in South African Chenin Blanc wines.

Pour citer cet article : Pascal Poupard, Frédéric Charrier, Philippe Cottereau, Stéphane Delpech, Elise Salanouve, *et al*.. DiVin Cidre : Développement d'itinéraires techniques pour optimiser le caractère fruité des vins et des cidres. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.357-369. 10.17180/ciag-2025-vol107-art26

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

FreshQualiTom : étude de l'impact du froid sur les qualités de la tomate, au cours du circuit logistique

Valérie MÉRENDET [1], Onrawee LAGUERRE [2], Sophie ANNIBAL [1], Evelyne DERENS-BERTHEAU [2], Jean MOUREH [2], Denis FLICK [2], Steven DURET [2], Elsa DESNOUES [1], Valentine COTTET [1], Christophe AUBERT [1]

[1] CTIFL, 97 Bd Pereire, 75017 Paris, France

[2] INRAE Unité FRISE, 1 rue Pierre-Gilles de Gènes, 92200 Antony, France

Correspondance : valerie.merendet@ctifl.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art27

Résumé

Le projet FreshQualiTom vise à limiter les pertes de qualité des tomates grâce à une meilleure compréhension des phénomènes intervenant au cours du circuit logistique. Les conditions de stockage après récolte des tomates chez les différents opérateurs sont très variables (de 3 à 35 jours ; de 2 à 20°C). L'écart de température des tomates peut varier jusqu'à 6°C selon leur position dans les colis et dans la palette. L'effet des conditions de circuit logistique sur leur qualité physicochimique, sensorielle et nutritionnelle est limité du fait des pratiques déjà en place tel le stockage après récolte à 12°C. La variété et le stade de maturité des tomates à la récolte sont les facteurs majeurs influençant leur qualité. Les solutions techniques telles le filmage et les coiffes de haut de palette ont un certain impact sur le ralentissement de diffusion de l'air, avec 17 h de décalage parfois constaté à mi-refroidissement entre le cas sans et avec filmage, lors d'une descente de 20 à 4°C. Un modèle thermique et un autre basé sur la qualité de la variété Marbone ont été développés pour prédire respectivement les variations de températures et de qualité des tomates en fonction de temps-température dans un circuit logistique pratiqués par des professionnels.

Mots-clés : stockage, variété, stade de maturité, durée de vie, chaine du froid

Abstract: FreshQualiTom, analysis of impact of cold on tomato quality along the logistic chain

FreshQualiTom project aims to limit losses in tomato quality through a better understanding of the phenomena occurring during the supply chain. The post-harvest storage conditions for tomatoes at different operators vary greatly (from 3 to 35 days; from 2 to 20°C). The temperature of the tomatoes can vary by up to 6°C depending on their position in the packages and on the pallet. The effect of supply chain conditions on their physicochemical, sensory and nutritional qualities is limited due to practices already in place such as storage for a few days at 12°C after harvest. The variety and stage of maturity of tomatoes at harvest are the major factors influencing their quality. Technical solutions such as filming and cap at top of pallet have a certain impact on slowing down air diffusion, with a 17 hour delay sometimes observed at mid-cooling, to go down from 20 to 4°C. A thermal model and another one on the quality of the Marbone variety were developed to predict variations in temperature and tomato quality, respectively, based on time-temperature in a supply chain as in professional practices.

Keywords: storage, variety, maturity, shelf life, cold chain

1. Contexte et objectifs du projet FreshQualiTom

La tomate, le légume préféré des Français (Kantar, 2017), est une source de satisfaction gustative mitigée pour les consommateurs (CLCV, 2017). La température de conservation optimale de la tomate

se situe aux alentours de 12°C (Navez, 2011). En deçà de 10°C, des symptômes de « chilling injury » (altérations dues au froid) peuvent apparaître tels que les défauts de coloration, fermeté, texture et arômes. Ces symptômes sont fonction de la durée d'exposition à cette température, de la variété, du stade de récolte, etc. (Farneti, 2015). Or, plusieurs pratiques des opérateurs peuvent être la cause de ce manque de goût constaté : le choix variétal, le stade de récolte vert-tournant, la mise au froid temporaire en chambre réfrigérée, lors du transport**, etc.**

Pour étudier l'effet de ces différents facteurs sur le maintien de la qualité de la tomate, le CTIFL (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes) s'est associé à l'unité de recherche FRISE[10] d'INRAE et au groupe Filpack, distributeur d'emballages pour fruits et légumes, pour créer le projet FreshQualiTom. Ainsi, ce projet financé par le fonds CASDAR[11] sur la période 2020-2024 du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, a pour objectif d'évaluer l'impact des pratiques de refroidissement et de stockage en circuit logistique sur les qualités organoleptiques et nutritionnelles des tomates commercialisées. Cette étude doit permettre une meilleure compréhension des phénomènes en cause en évaluant conjointement plusieurs segments de tomates (ronde, côtelée, allongée, cerise), différents stades de récolte et les particularités du circuit logistique français. Ainsi, le projet s'articule autour de cinq actions complémentaires (Figure 1) : l'identification des pratiques de stockage au cours du circuit logistique (Action 1) ; des études expérimentales en laboratoire pour mieux comprendre les échanges thermiques au sein d'une palette (Action 2) et identifier leurs impacts sur les qualités des tomates (Action 3) ; des évaluations de solutions techniques pour limiter les dégradations (Action 4) ; la valorisation des résultats auprès des professionnels de la filière (Action 5).



Figure 1 : Schéma d'organisation du projet FreshQualiTom

2. Étude de terrain auprès des opérateurs de la filière tomate

L'objectif de l'étude de terrain est d'acquérir des références de circuits logistiques complets afin de mieux cerner les conditions dans lesquelles les tomates sont acheminées jusqu'au point de vente. Elle comprend des entretiens avec des professionnels de la filière et des suivis de circuits logistiques.

2.1. Suivis logistiques enregistrés

Dans ce projet, quatre circuits logistiques distincts de la filière tomate ont été suivis, dont un de façon particulièrement détaillée. Quatorze palettes de tomates ont ainsi été instrumentées sur les plans supérieur, médian et inférieur. Une à 3 palettes par camion sont suivies pour tester différents emplacements. Pour mesurer l'évolution des températures, des enregistreurs étalonnés sont placés au cœur de la tomate et plaqués sur sa surface (mesure de la température d'air à proximité) dans le cas du suivi logistique détaillé. Un enregistreur de température et d'hygrométrie est placé en haut de la palette pour mesurer la température et l'hygrométrie de l'air ambiant. Pour les trois autres suivis, les enregistreurs sont placés directement dans les colis de tomates.

[10] Génie des Procédés FRIgorifiques pour la Sécurité alimentaire et l'Environnement

[11] Compte d'Affectation Spécial Développement Agricole et Rural

Quel que soit le circuit emprunté, les hygrométries mesurées de l'air sont très variables et assez instables. Elles se situent cependant, dans l'immense majorité des cas, entre 60 et 90 % d'humidité relative, avec une moyenne proche de 80 %.

Dans les colis constitutifs d'une palette, il ressort que la température de l'air à proximité du produit est très proche de celle à coeur du produit lui-même (0,5°C d'écart) : c'est le cas pour les 20 tomates suivies instrumentées. La seule exception relevée concerne les colis du niveau supérieur qui sont immédiatement au contact de l'air ambiant, pour lesquels la température de l'air réagit plus rapidement que celle du produit, d'autant plus dans le cas d'une ventilation forcée comme en transport frigorifique (écart de 2,5°C constaté). La Figure 2 présente l'évolution de la température de l'air ambiant et celle de quatre tomates situées à différents niveaux de la palette : supérieur, médian et inférieur.

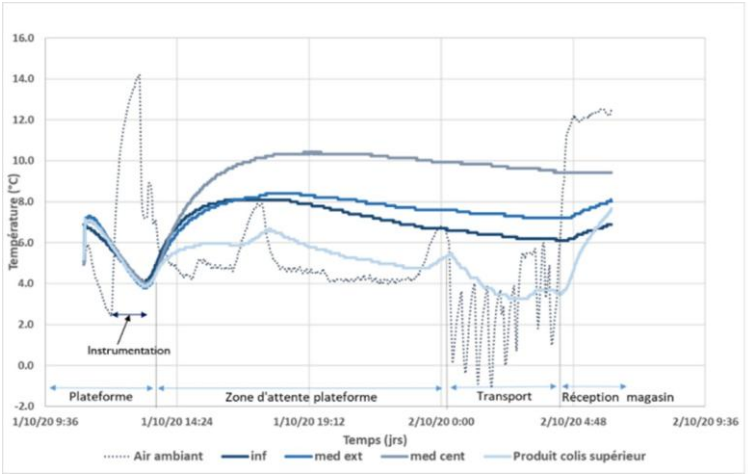


Figure 2 : Hétérogénéité de température de l'air ambiant et de tomates situées à différents niveaux dans une palette. Inf : niveau inférieur, med ext : niveau médian extérieur, med cent : niveau médian central.

La circulation d'air influence directement le niveau supérieur d'une palette. Le colis du niveau supérieur (courbe bleu clair) réagit rapidement aux variations thermiques, puisqu'il se trouve à l'air libre, alors que les colis des niveaux médian et inférieur, plus protégés car superposés, conservent une certaine inertie. Le niveau supérieur présente les températures les plus basses, suivi par le niveau inférieur (courbe bleu foncé) qui est refroidi par la reprise d'air passant sous la palette. Sur le niveau médian, les tomates placées au centre de la palette, plus chaudes, et celles disposées à l'extérieur présentent un écart thermique de 2°C. Cette différence s'explique par une inertie thermique plus importante au centre de la palette, mais aussi par la chaleur de respiration des tomates qui s'évacue plus lentement dans cette zone.

Globalement, la température des tomates dans une palette au cours du circuit logistique est hétérogène et l'écart peut varier jusqu'à 6°C selon le positionnement des produits considérés. De plus, un comportement différent est observé selon le positionnement de la palette dans le camion. La palette proche du groupe froid est influencée par l'air froid diffusé à proximité, tandis que la palette située au milieu de la caisse du camion l'est beaucoup moins. En revanche, cette palette est beaucoup plus sensible aux ouvertures de portes, se traduisant par un pic de température (Annibal, 2021).

Des différents suivis, il ressort :

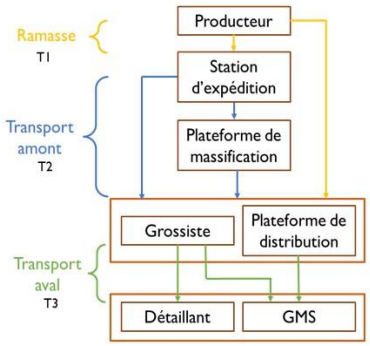
- une bonne approximation de la température interne des produits par la température d'air mesurée dans les colis près des produits (sauf dans les zones très ventilées) ;
- une hétérogénéité de température d'air du colis selon son positionnement dans une même palette ;
- une hétérogénéité de température d'air du colis selon le positionnement de la palette dans le camion ;
- une différence de température selon le véhicule et selon le point de vente de destination ;

- une hygrométrie très variable.

2.2. Synthèse des entretiens avec les opérateurs

Le choix des opérateurs pour les entretiens téléphoniques a été effectué dans la mesure du possible en fonction des circuits de commercialisation les plus représentatifs de la consommation française, à savoir environ 70 % grandes et moyennes surfaces et 30 % commerces de détail indépendants (Kantar, 2017). Les entretiens sont menés auprès d'opérateurs issus de tous les stades de la filière pour connaître le détail des pratiques du circuit logistique.

Au total, 20 opérateurs ont été interrogés : deux producteurs, 3 expéditeurs, un transporteur, 3 grossistes, 3 plateformes de distribution, 3 hypermarchés, deux supermarchés, un détaillant de marché de plein air, un primeur et une enseigne multifrais.



Stade	Circuit représentatif	Circuit à températures basses	Circuit à durées maximales
Producteur	15°C - 28,5 h	**8°C** – 24 h	12°C – **11 h**
Station d'expédition	13,8°C – 92 h	**12°C** - 168 h	12°C – **168 h**
Ramasse (T1)	16,4°C – 0,8 h	**5°C** – 1 h	12°C – **3 h**
Transport amont (T2)	7,9°C - 10,9 h	**2°C** – 24 h	8°C – **96 h**
Stade de gros	7,5°C - 28,2 h	**4°C** – 144 h	8°C – **168 h**
Transport aval (T3)	7,6°C - 2,2 h	**2°C** – 8 h	8°C – **12 h**
Point de vente – stock	9,3°C - 40,1 h	**7°C** – 24 h	10°C – **168 h**
Point de vente - étal	18,3°C - 11,9 h	**1°C** – 10 h	22°C – **48 h**

Figure 3 : Récapitulatif des conditions de circuits représentatifs et extrêmes déclarés (Source : (Annibal, 2023)).

Les résultats de l'enquête montrent que les premiers maillons des circuits logistiques (producteurs et stations d'expédition) conservent les tomates à une température optimale entre 12 et 15°C du fait d'un stockage majoritairement mono-produit (Figure 3). En aval de la filière, les tomates sont mélangées à d'autres produits alimentaires frais et donc souvent conservées à une température plus basse.

Grâce à ce recueil de données, différents types de circuits simplifiés sont construits :

- un circuit représentatif des températures et des durées les plus déclarées pour chacun des maillons, (9 jours, de 8 à 18°C) ;
- des circuits « extrêmes » prenant en compte les conditions les plus défavorables pour le maintien de la qualité de la tomate par rapport aux conditions de stockage optimal : un circuit à températures basses associées à leur durée (17 jours, de 1 à 12°C) et un circuit à durées maximales associées à leurs températures déclarées (33 jours, de 8 à 22°C).

Ces résultats servent ensuite de base aux travaux expérimentaux menés en laboratoire.

3. Caractérisation de la distribution de la température

3.1. Méthodologie appliquée

Le dispositif expérimental mis au point se base sur la configuration d'une palette réelle (Figure 4a). Il est composé de quatre colis de dimensions identiques de 30 x 40 x 11 cm qui correspondent à un demi-niveau d'une palette (Figure 4b). Compte tenu du plan de symétrie, les résultats obtenus sont

également applicables à l'autre demi-niveau de palette. Ce dispositif représente tous les niveaux intermédiaires d'une palette sauf les niveaux inférieur et supérieur. Pour simuler les conditions des niveaux intermédiaires, deux plaques isolantes en polystyrène d'une épaisseur de 4 cm chacune, sont placées en haut et en bas du dispositif au cours de l'expérimentation. Un nid d'abeille fixé en amont de la veine d'air et deux ventilateurs à débit variable installés à une extrémité du dispositif pour aspirer l'air permettent un écoulement homogénéisé et stabilisé, facilitant ainsi l'interprétation des résultats. La Figure 4c présente les dimensions d'un colis. Deux configurations sont étudiées : colis classique avec encoche latérale et colis percé de deux orifices supplémentaires. Ce dispositif est placé dans une cellule d'essai dans laquelle la température ambiante est contrôlée.

Deux types de produits sont utilisés :

- tomates de la variété Cauralina (diamètre moyen 88 mm, 12 tomates par colis) ; parmi le segment des tomates gustatives, cette variété de tomate est l'une des plus vendues en France ;
- produits modèles : sphères en polyéthylène (diamètre externe 75 mm) remplies de gel de Carraghénane conditionnés dans des colis en plexiglass transparent pour pouvoir effectuer des mesures des vitesses d'air par système optique LDV (Laser Doppler Velocimetry) au dessus des tomates.

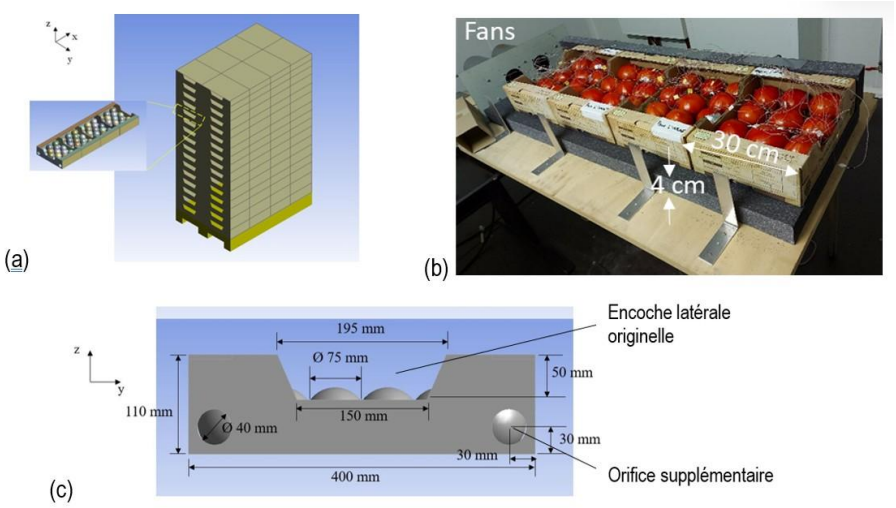


Figure 4 : (a) Schéma d'une palette entière (b) Photo du dispositif ouvert rempli des colis de tomates Cauralina, (c) Schéma du grand côté d'un colis classique avec encoche latérale originelle (configuration 1) et percé de deux orifices supplémentaires (configuration 2). x,y,z : directions de l'espace (Fans=ventilateurs).

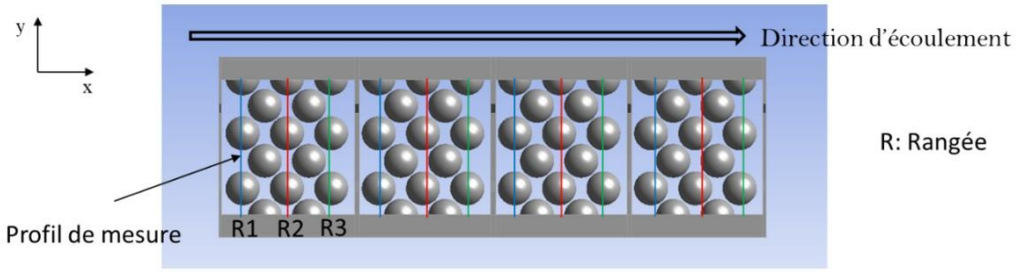


Figure 5 : Position des mesures de vitesse d'air sur trois profiles : R1, R2 et R3 au-dessus de tomates conditionnées dans des colis en plexiglass par LDV (Laser Doppler Velocimetry) - Vue du dessus.

Des thermocouples étalonnés (précision ± 0,2 °C) sont placés à cœur, en surface des tomates Cauralina ou du produit modèle, et aussi dans l'air près du produit, à différentes positions dans le dispositif. La vitesse d'air à l'entrée et à la sortie du dispositif est mesurée par un anémomètre à fil chaud (TESTO 435-4, précision ± 0,03 m.s-1). Le système LDV (Laser Doppler Velocimetry, Dantec FlowExplorer-2D) a également été utilisé pour vérifier l'uniformité des profils des vitesses dans la veine d'air à l'entrée du dispositif.

Les facteurs de variations tels que la vitesse d'air à l'entrée du dispositif sont étudiés afin d'évaluer leur influence sur la cinétique de diminution de température des produits (Figure 5).

3.2. Résultats et analyses

3.2.1. Distribution de températures

La Figure 6 présente les températures à cœur et en surface des tomates Cauralina ainsi que celles de l'air dans différentes positions des quatre colis à mi-refroidissement pour la température de l'air entrant à 4,5°C et les produits initialement à 19,5°C.

Les résultats obtenus représentent la configuration d'une palette complète ventilée par un flux d'air à vitesse et température maitisée. Compte tenu du rechauffement progressif de l'air entre l'entrée et la sortie, les tomates les plus chaudes se situent à l'arrière de la palette soit dans le colis 4. Cette figure montre une hétérogénéité de températures avec une moyenne à cœur des tomates de 11,3 °C. Compte tenu des résistances thermiques à l'intérieur d'une tomate (par conduction) et à l'extérieur (par convection), la température à cœur est supérieure à celle en surface qui est elle-aussi supérieure à la température de l'air. Les écarts constatés entre les températures à cœur des produits et celles de l'air à proximité sont de 1,8 à 5,0 °C, alors qu'entre la température de surface et celle de l'air à proximité ces écarts sont de 1,0 à 2,6 °C.

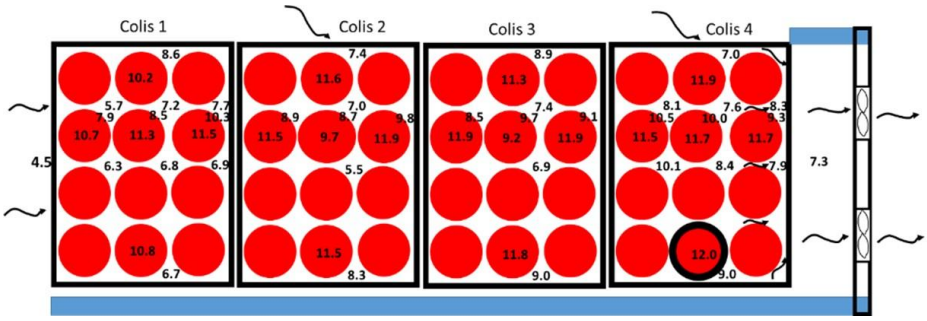


Figure 6 : Distribution des températures à cœur (au centre des cercles rouges), en surface (sur le périmètre des cercles rouges) et de l'air (en interstice) à mi-refroidissement des tomates Cauralina (température initiale 19,5°C) exposées à l'ambiance de 4,5°C et vitesse de l'air de 2,2 m/s à l'entrée du dispositif (Source : (Agyeman, 2023)).

La température de l'air au centre d'un colis est plus faible de 1 à 2°C que celle à proximité des parois ; ceci peut être expliqué par le passage préférentiel de l'air au centre du colis, en face de l'encoche latérale du colis classique. Cependant, le produit au centre de colis n'est pas toujours plus froid que celui près des parois, ce qui peut être expliqué par la complexité du circuit du flux d'air.

Un modèle numérique 3D de dynamique des fluides (CFD) a été développé pour prédire le flux d'air et le transfert de chaleur dans la moitié d'une palette de tomates (Figure 7). Les résultats numériques et expérimentaux ont été comparés et un bon accord a été obtenu entre les deux résultats en utilisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart relatif absolu (ERA) comme critères. Le modèle CFD validé a ensuite été utilisé pour minimiser l'hétérogénéité de la température du produit en optimisant le débit d'air et la conception de la caisse. Un flux d'air descendant le long des parties centrales des caisses et un flux d'air ascendant près des parois latérales des caisses ont été observés.

L'hétérogénéité de températures diminue au fur et à mesure de l'avancement dans le temps, les températures ont tendance à s'homogénéiser et se rapprocher de la température de l'air ambiant réfrigéré (4,5°C). Pour aboutir à un état proche de l'équilibre thermique et une quasi-stabilité des températures, il faut attendre 6 h : la température moyenne des tomates est alors de 5,4°C et celle de la tomate la plus chaude de 6,5°C.

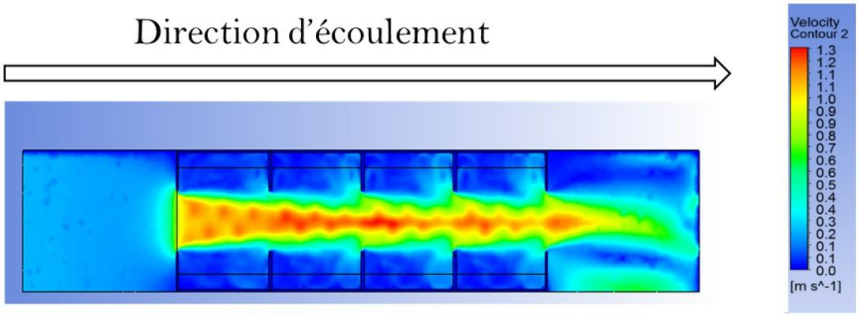


Figure 7 : Résultats de simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) montrant le passage préférentiel de l'air au centre du colis en face de l'encoche latérale (vue du dessus)

3.2.2. Influence de la vitesse d'air à l'entrée du dispositif

L'évolution de la température moyenne à cœur dans le colis a été mesurée pour une vitesse d'air variant de 0,15 m/s à 3,1 m/s, à l'entrée du dispositif. La cinétique de refroidissement des produits augmente avec la vitesse d'air. Ceci s'explique par un meilleur échange entre l'air et le produit à des vitesses élevées. Cependant, l'augmentation de la vitesse au-delà de 2,0 m/s ne permet plus d'améliorer de manière significative la cinétique de refroidissement.

3.2.3. Profil de vitesse d'air dans les colis

Des mesures de la vitesse d'air au-dessus des produits modèles, à trois niveaux (R1, R2 et R3) pour chacun des quatre colis et sur toute la largeur de colis, sont réalisées par LDV (Figure 5). Dans les quatre colis, la vitesse est élevée au milieu du colis, c'est-à-dire en face de l'encoche latérale et les vitesses sont faibles sur les deux côtés près des parois (Figure 8). Ces résultats sont en accord avec les températures mesurées présentées sur la figure 6 : le produit est plus froid au milieu et plus chaud près des parois latérales de colis. Une vitesse plus élevée en amont, par exemple à 0,2 m/s au lieu de 0,05 m/s, induit aussi une vitesse plus élevée au-dessus des tomates dans la zone centrale des colis dans le flux de l'encoche latérale, mais pas du tout sur les 7,5 premiers centimètres sur les côtés.

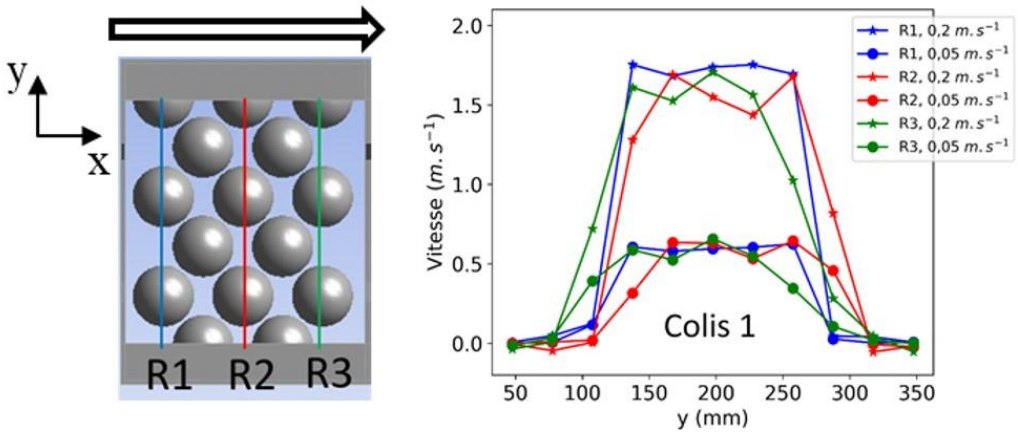


Figure 8 : Influence de la vitesse d'air en amont du colis (0,05 m/s et 0,2 m/s) sur les profils des vitesses d'air suivant la largeur (y) et la profondeur (x) du colis (Source : Laguerre, 2022)

3.2.4. Influence de la présence d'une palette voisine sur le profil de vitesse le long des palettes

Deux palettes, de hauteur 175 cm, espacées de 30 cm et positionnées l'une derrière l'autre, sont placées dans une cellule d'essai. La mesure de vitesse d'air est effectuée devant les orifices d'entrée des colis à différents niveaux de hauteur avec un anémomètre à fil chaud (Figure 9). Au premier niveau, à 20 cm du sol, la vitesse est un peu inférieure à celle du deuxième niveau à 40 cm. Ensuite, une légère diminution de la vitesse est mesurée en remontant, entre 40 et 175 cm de haut. Au niveau le plus haut, la vitesse augmente sensiblement car l'air circule dans l'espace libre au-dessus des palettes. La vitesse est nettement plus faible dans la palette située derrière la première, dans le sens du flux d'air en entraînant ainsi une baisse plus lente de la température dans cette palette.

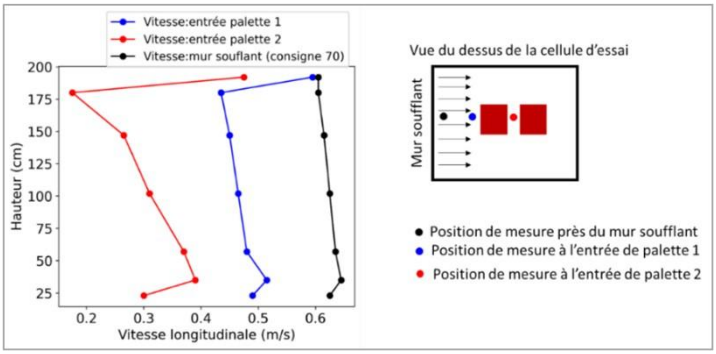


Figure 9 : Évolution de la vitesse d'air en fonction de la hauteur de la palette et de la distance du mur soufflant (Source : Laguerre, 2023).

4. Impact du froid sur les qualités des tomates

L'objectif est de déterminer l'effet des conditions thermiques au cours du circuit commercial, du type variétal et du stade de maturité des tomates sur leur qualité jusque chez le consommateur. Pour définir la qualité des tomates, ont été réalisées différentes mesures instrumentales de la fermeté et de la couleur, le dosage des différents composés biochimiques ainsi que des mesures sensorielles descriptives par un panel entrainé.

4.1. Evaluation de l'effet de la température et du stade de récolte sur la qualité

Des tomates de la variété Marbonne (Gautier) récoltées à deux stades de maturité, définis par le code couleur C5 (rouge-vert) ou C8 (rouge - code couleur CTIFL), ont été conservées à une température stable de 3, 8 ou 15°C. Les qualités physicochimiques, biochimiques et sensorielles de ces tomates ont été mesurées après 4, 7, 11, 14 et 21 jours de conservation.

Lorsque les tomates sont conservées à 3°C après la récolte, leur qualité évolue plus lentement que celle des tomates conservées à 15°C. Les tomates récoltées en C5 et conservées à 15°C ont une acidité titrable inférieure de 23 % par rapport à celles conservées à 3°C, après 21 jours. Les concentrations en sucres sont légèrement supérieures pour les tomates récoltées en C8 et diminuent chez les tomates conservées 21 jours à 15°C (Figure 10). La concentration en lycopène, le pigment majoritaire responsable de la couleur rouge chez la tomate, augmente la première semaine à 15°C avant de se stabiliser et de baisser après deux semaines. Pour les tomates conservées à 3°C et dans une moindre mesure à 8°C, on observe une diminution des concentrations en lycopène qui se traduit visuellement par une couleur orangée des tomates (Figure 11). L'évolution des concentrations des principaux composés volatils responsables de l'arôme de la tomate suit celle de lycopène. Pour les tomates conservées à 3°C, une baisse des concentrations est également observée. Bien que globalement tous les lots aient été perçus peu aromatiques par le panel sensoriel, en moyenne, les tomates conservées à 15°C ont été perçues significativement plus aromatiques. Les concentrations en

vitamine C augmentent à 15°C, ce qui permet aux tomates récoltées en C5 conservées 4 jours d'avoir des concentrations équivalentes aux tomates récoltées en C8.

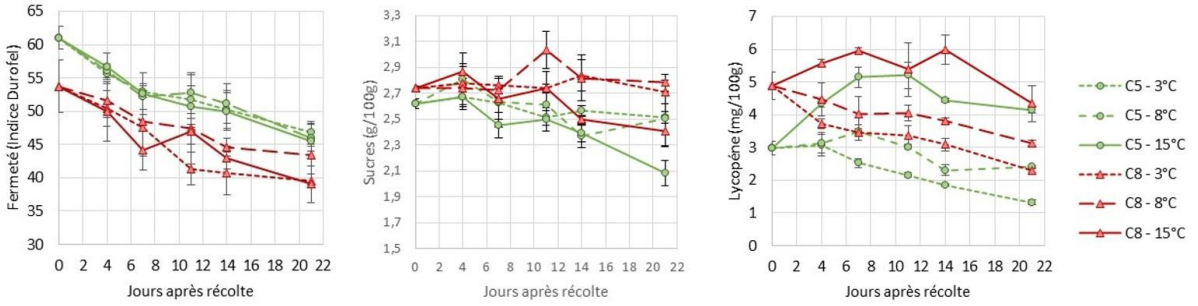


Figure 10 : Évolution des principaux paramètres physiques et biochimiques des tomates Marbonne en fonction de la température de stockage et du stade de récolte (Source : Desnoues, 2024)

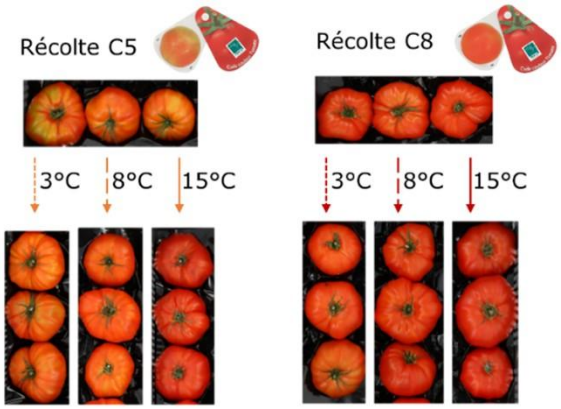


Figure 11 : La couleur des tomates évolue dans le temps en fonction du stade de récolte et de la température de conservation. Les photos montrent l'évolution de la couleur après 21 jours à 3, 8 ou 15°C pour des tomates de la variété Marbonne récoltées à la couleur C5 ou C8 (crédits photo : CTIFL)

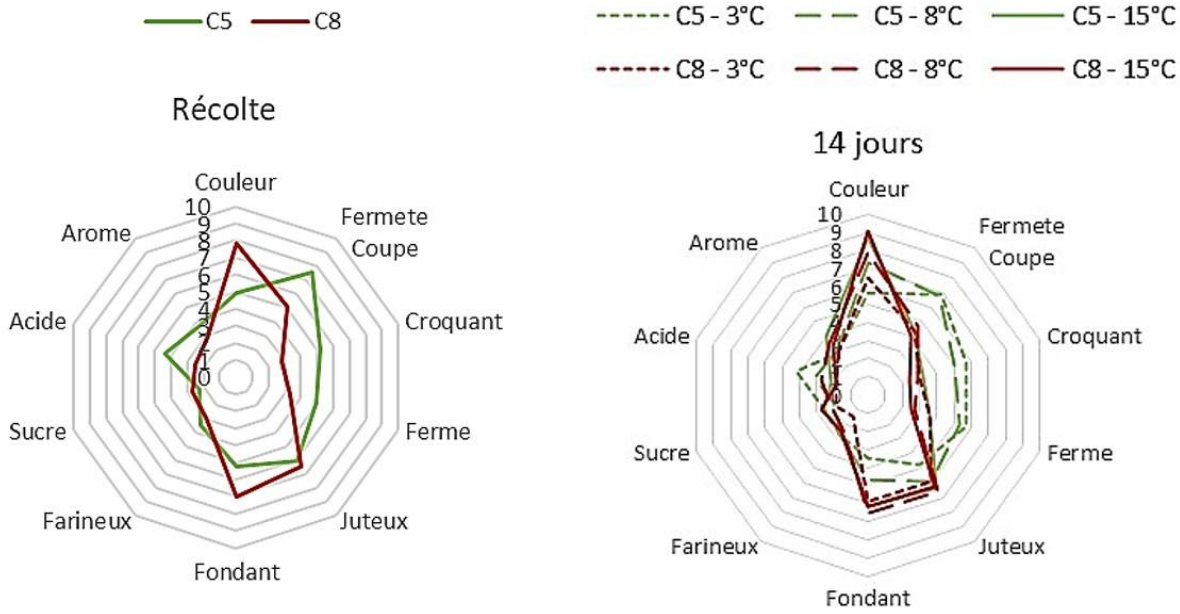


Figure 12 : Évolution des critères organoleptiques des tomates Marbonne en fonction de la température de stockage et du stade de récolte

Au niveau sensoriel, à partir d'un stockage d'une semaine à 15°C, les différences s'estompent entre les deux stades de récolte. A 14 jours, il n'y a plus de différences perçues par le panel entrainé entre une tomate récoltée au stade C5 conservée à 15°C et une tomate récoltée au stade C8 (Figure 12). Pour certains paramètres de la qualité, la durée de conservation a plus d'effet que la température. La mesure de la fermeté en est un parfait exemple. En effet, la fermeté diminue dans le temps de manière constante et ne dépend pas de la température de conservation. Les tomates récoltées en C5 restent plus fermes que celles récoltées en C8 pour la même durée de conservation quel que soit la température appliquée. L'acidité titrable diminue dans le temps mais, contrairement à la fermeté, cette perte dépend de la température de conservation. À 15°C, les tomates perdent plus rapidement des acides qui sont métabolisés lors de la respiration. À 3°C, le métabolisme est ralenti et la tomate puise moins dans ses réserves d'acides.

La Figure 13 synthétise l'effet relatif des différents facteurs étudiés sur les principaux paramètres de la qualité. Par exemple pour la couleur, les principales sources de variations sont la température de conservation combinée au stade de récolte.

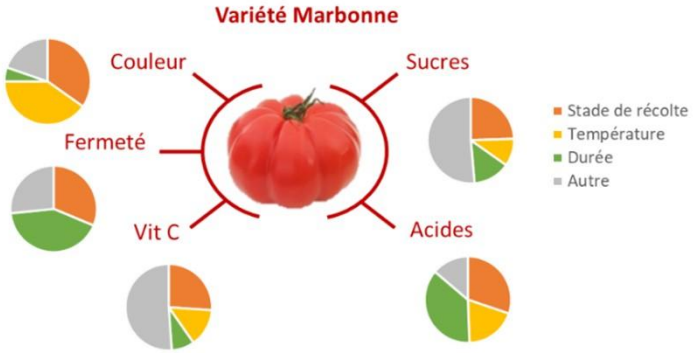


Figure 13 : Représentation de l'effet des pratiques sur la qualité. Proportion de variabilité de chaque paramètre de la qualité expliqué par le stade de récolte, la température et la durée. La partie grise (Autre) représente la variabilité du lot qui n'est pas expliqué par les variables précédentes (Source : Desnoues, 2024).

4.2. Effet des conditions du circuit logistique sur différentes variétés de tomates

La tomate est un produit présentant une grande diversité de formes et de calibres : le poids moyen d'une tomate peut varier de 8 g pour des types cerise à plus de 280 g pour des types charnus « anciens ». Cette différence a un effet sur les durées de refroidissement ou réchauffement à cœur des produits et donc potentiellement sur les effets des températures basses sur la qualité. Afin de prendre en compte cette diversité, 4 variétés de tomates issues de lots commerciaux ont été étudiées dans différentes conditions de circuits logistiques : Climberley (Syngenta) variété de tomate de type ronde en grappe, Gourmandia (Gautier) de type allongé, Marbonne (Gautier) de type côtelé et DRO607 (De Ruiter) de type cerise. Les circuits logistiques simulés proviennent de l'enquête terrain présentée précédemment (figure 14) : un circuit moyen, un circuit extrême froid, un circuit extrême long, et enfin un circuit témoin de 4 jours à 18°C. Seules les tomates de la variété Climberley ont été testées dans le circuit long. Les variétés Marbonne, Gourmandia et DRO607 ont, quant à elles, été testées dans le circuit moyen.

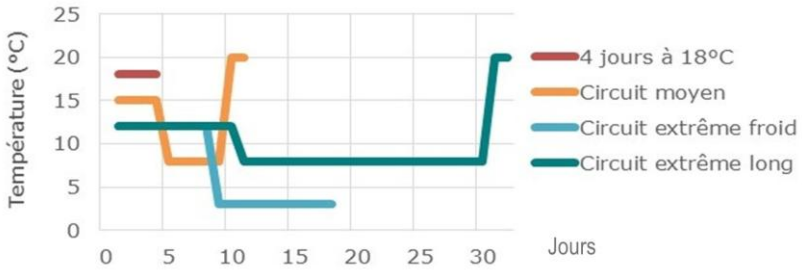


Figure 14 : Caractéristiques des différents circuits « types » simulés issus des données terrains

Les résultats des simulations des circuits logistiques montrent qu'il y a peu d'effet des températures basses sur la qualité des tomates quand elles ont été récoltées à maturité optimale et qu'elles ont été placées 8 jours à 12°C avant d'être conservées 10 jours à 3°C (circuit extrême froid).

La Figure 15 présente l'évolution de plusieurs critères de qualité physicochimique en fonction du circuit pour les 4 variétés. Il y a davantage de différence entre les variétés qu'entre les circuits. L'effet de la durée des circuits est également plus marqué que l'effet de la température : l'acidité titrable diminue dans le temps mais garde la même tendance entre les circuits. À la fin du circuit froid, les tomates sont moins rouges que les tomates des autres circuits pour les 4 variétés. Il n'y a pas de différence de taux de sucres, ni de concentration en sucres individuels (fructose, glucose, saccharose) ou acides (acide malique et citrique) entre les tomates à la fin du circuit froid et les tomates des autres circuits, pour la variété Marbonne et Gourmandia. De faibles différences sont observées pour Climberley et DRO607. Les tomates de la variété Climberley présentent un taux de sucres très légèrement supérieur à la fin du circuit froid (4,6°Brix) par rapport au circuit long (4,3°Brix). Les tomates de la variété DRO607 présentent un taux de sucres légèrement supérieur à la fin du circuit froid (7,3°Brix) par rapport au circuit moyen (6,7°Brix). Elles sont également perçues plus fermes à la coupe en analyse sensorielle.

Les principaux critères de la qualité varient fortement en fonction de la variété. Des études précédentes ont montré que les concentrations en sucres, acides, vitamine C ou la fermeté varient d'un facteur 2 à 5 en fonction de la variété (Navez *et al*. 2004). La tomate cerise présente des concentrations plus importantes pour l'ensemble de ces composés. En revanche, la fermeté est très variable pour la tomate grappe, principalement au sein du circuit extrême long. De plus, l'évolution dans le temps de certains paramètres de la qualité en fonction de la température est différente d'une variété à l'autre. Un exemple marqué est celui d'un composé d'arôme majeur pour la tomate, le (z)-3-hexenal, qui, pour des températures au-dessus de 12°C augmente sur 7 à 10 jours puis diminue pour la variété Marbonne, alors que ce composé reste stable pour les autres variétés.

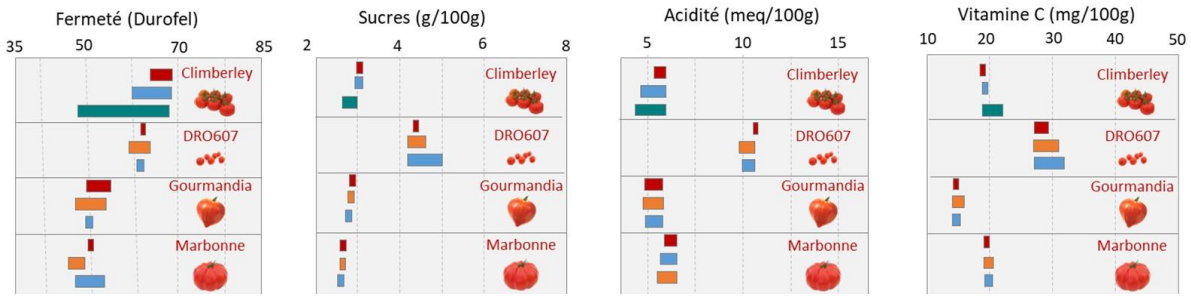


Figure 15 : Variabilité des principaux paramètres de la qualité en fonction des circuits logistiques simulés (rouge : circuit optimal ; orange : moyen ; bleu : extrême bas ; vert : extrême long).

4.3. Stockage en réfrigérateur par le consommateur

Près de la moitié des Français déclarent conserver les tomates dans leur réfrigérateur. Pour évaluer l'impact de telles pratiques sur la qualité des tomates, nous avons simulé le comportement du consommateur en entreposant, à l'issue de chaque circuit logistique, les tomates durant 4 jours à 8°C (réfrigérateur) ou à 20°C (cuisine). Parce que la température d'un produit qui est dégusté est très importante au niveau de son analyse sensorielle (diffusion des composés volatils en bouche, perception du sucré, de l'acidité …), tous les produits ont été dégustés après avoir été laissés au moins 4h à température ambiante. Les résultats ont montré qu'il n'y a pas de différence perçue par le panel entrainé entre les différents échantillons, même si les teneurs de certains composés volatils importants dans la tomate sont plus faibles dans les tomates entreposées à 20°C, en particulier le 2-isobutylthiazole pour les tomates Climberley et Gourmandia. On notera également une couleur perçue légèrement plus rouge pour les tomates entreposées à 20°C à la suite des circuits logistiques.

5. Développement d'un modèle prédictif de la qualité

Les modèles basés sur l'équation Arrhenius ont été développés pour décrire l'évolution de qualité de la tomate à différentes températures de conservation. Les coefficients des modèles ont été identifiés en utilisant une partie des jeux de données expérimentales de qualité des travaux précédents. L'autre partie a été utilisée pour valider les modèles en les comparant avec les valeurs de prédiction.

L'analyse des résultats de simulation d'un grand nombre de tomates (10^4 tomates) empruntant les circuits logistiques identifiés lors de l'étude de terrain auprès des opérateurs de la filière a été réalisée. Cela permet de dresser la distribution des qualités des tomates dans les huit étapes allant du producteur au point de vente en passant par station d'expédition, transport, plateforme de distribution, stockage dans une chambre froide d'un magasin. L'impact de la maturité à la récolte sur la teneur en acides et en lycopène est plus important que celui du profil temps-température d'un circuit logistique comme le montre la Figure 16. On observe bien une dissociation des distributions des teneurs en acides pour les tomates stade rouge (C8) et stade rouge-vert (C5), quel que soit le profil temps-température et quelles que soient les étapes du circuit logistique. Par contre, l'impact du profil temps-température d'un circuit logistique sur la teneur en composés d'arôme tel le (Z) Hexenal est plus important que celui de la maturité à la récolte. Ces informations peuvent être utiles aux professionnels pour prendre des précautions et mettre en place des moyens pour préserver au mieux le critère de qualité d'intérêt.

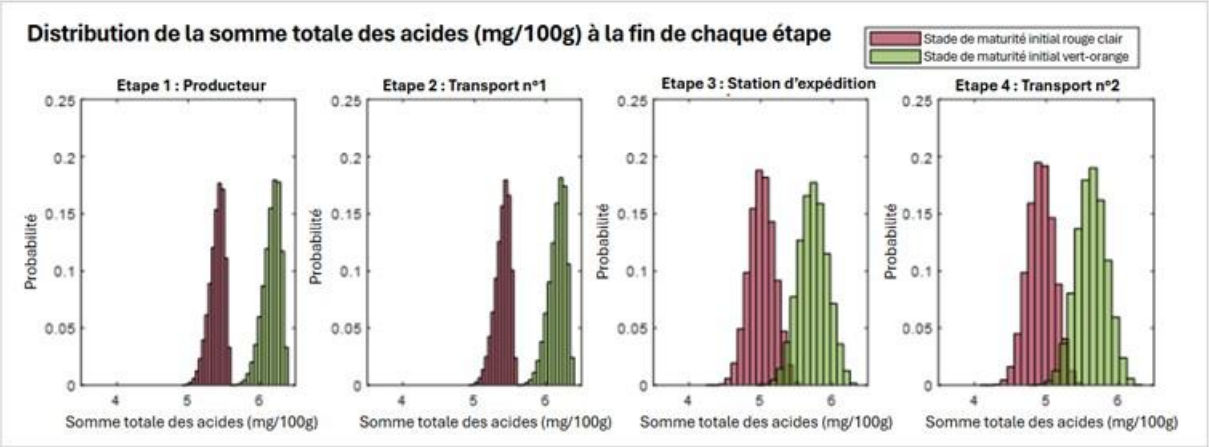


Figure 16 : Distribution des teneurs en acides de tomates rouges C8 et tomates rouge-vertes C5 à la récolte dans quelques étapes d'un circuit logistique (résultats de simulations de 10^4 profils temps-tempéra-ture) (Source : Duret, 2025).

6. Solutions techniques pour l'optimisation des circuits

Pour faire suite aux précédents travaux, des solutions techniques de colis ou palette ont été étudiées pour évaluer leur efficacité sur les cinétiques de descente ou montée de températures de tomates.

6.1. Influence de la configuration des colis

Des mesures de températures de produits modèles sont réalisées dans deux configurations de colis munis d'une encoche sur le long côté (configuration 1 - classique) et percé de deux orifices circulaires supplémentaires de 4 cm de diamètre sur chaque grand côté (configuration 2 - Figure 4c). L'évolution de la température à cœur des tomates dans les deux configurations montre peu de différence : la température de mi-refroidissement est atteinte à 1,6 h pour la configuration 1 et 1,5 h pour la configuration 2. Ceci peut s'expliquer par la position des orifices circulaires supplémentaires qui n'est pas très optimisée car les flux d'air issus de ces orifices peuvent être entrecoupées par les tomates situées en aval.

La 'lame d'air' est l'espace entre le haut du produit et le haut du colis. Des essais dont l'épaisseur de lame d'air varie entre 5, 15 et 25 mm ont été menés avec des colis de configuration 1 classique : les produits modèles sont placés sur un faux-fond plat plus ou moins rehaussé dans les colis. Ces colis sont exposés à une faible vitesse d'air en amont de 0,2 m/s qui permet de mieux observer les différences. L'évolution de la température moyenne à cœur de produit selon les différentes épaisseurs de lame d'air ne montre cependant pas d'influence significative sur la cinétique de refroidissement.

6.2. Influence de la fausse paille et du filmage de la palette

Selon les pratiques commerciales, les tomates sont parfois déposées sur de la fausse paille pour les mettre en valeur. L'objectif de l'essai est d'évaluer si la présence de fausse paille est un obstacle à l'écoulement d'air et si cela influence la température du produit. La fausse paille employée pour l'essai est en fibre de bois, du fournisseur d'emballage Filpack. Les expériences menées sur des produits modèles avec et sans paille dans les colis présentent une légère augmentation du temps de refroidissement qui passe de 1,6 h sans paille à 1,7 h avec paille. Cette légère augmentation permet de conclure que la présence de paille est un obstacle à l'écoulement d'air et rend plus difficile le refroidissement de produit. De plus, la présence de la paille augmente l'hétérogénéité de ventilation.

Des colis remplis de tomates Cauralina sont entièrement enveloppés de film étirable en polyéthylène. Les évolutions de la température moyenne à cœur du colis 1 pour les modalités avec film et sans film, ont été mesurées. Les résultats montrent un ralentissement très significatif de la cinétique de refroidissement quand le dispositif est filmé ; le temps de mi-refroidissement passe de 4 h sans filmage à 21 h avec filmage et le temps raisonnable de refroidissement passe de 11 h sans filmage à plus de 48 h avec le film. En effet, le film bloque la circulation d'air dans les colis et les échanges convectifs entre le produit et l'air sont ainsi limités (Figure 17).

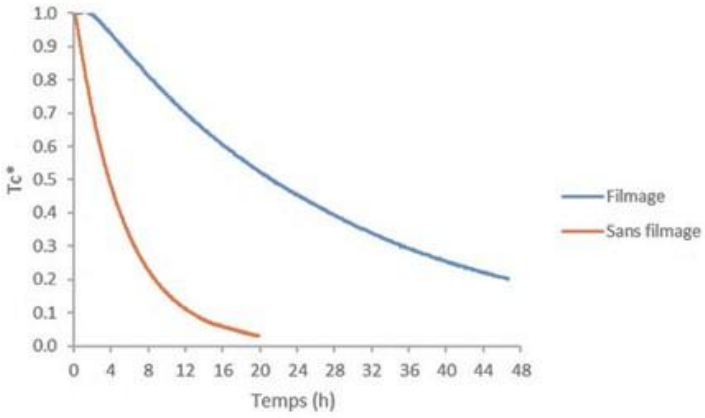


Figure 17 : Influence du filmage sur la cinétique de refroidissement de tomates Cauralina du colis 1 (colis classique avec encoche sur le long côté)

6.3. Effet des coiffes de palettes

L'effet de différentes coiffes de palettes fournies par la société Filpack ont été étudiés : une coiffe en plastique perforé avec rebords de 30 cm et une coiffe en carton de forme plate non perforée. Un témoin sans protection a permis de comparer les résultats obtenus.

La Figure 18 présente l'influence de la distance entre les tomates situées au niveau supérieur et le soufflage d'air au cours de la descente et de la montée en température, avec et sans coiffe. On observe que la température de produit descend plus vite quand il est proche du soufflage. Cependant, les descentes et montées sont plus ralenties dans les colis avec coiffe en plastique. En effet, la coiffe en papier est juste une feuille déposée sur les colis sans rebord permettant donc facilement le passage de l'air dans les colis et donc le refroidissement. La diffusion de l'air froid dans le colis explique la température plus froide et plus homogène dans les colis avec coiffe en papier qu'avec coiffe en plastique.

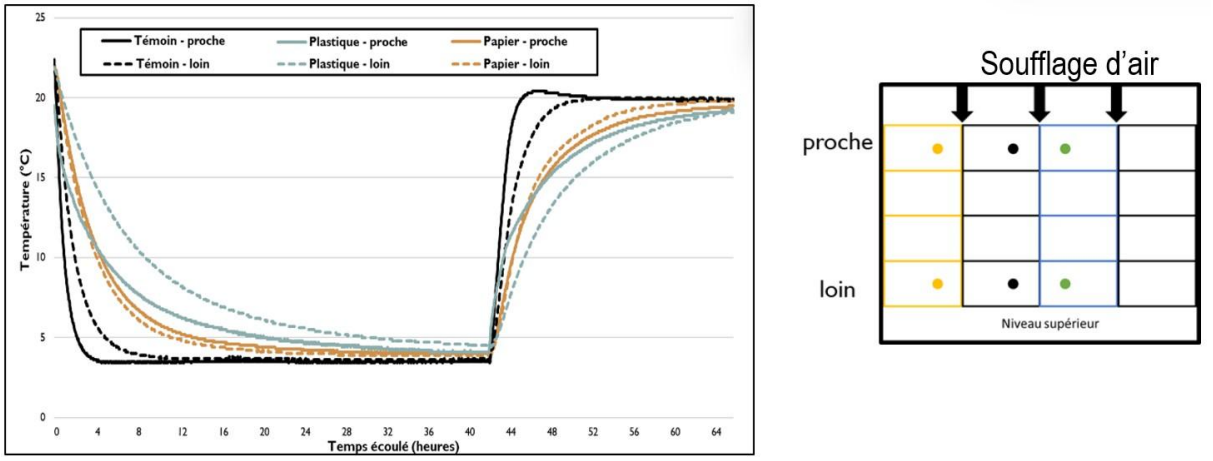


Figure 18 : Évolution de la température de tomates au niveau supérieur proche et loin du soufflage de l'air lors du refroidissement et du réchauffement.

7. Conclusions et discussions

Le projet FreshQualiTom a permis d'acquérir des résultats enrichissant les connaissances sur le maintien de la qualité des tomates au cours du circuit logistique, bousculant parfois certaines idées reçues. Il a mis en lumière les pratiques et contraintes du circuit logistique, les effets de celles-ci sur la qualité des tomates et l'intérêt limité de certaines solutions techniques commercialisées.

Grâce à l'étude de terrain, il a été observé une diversité des pratiques logistiques dans la filière tomate, avec le plus souvent, une température de stockage assez proche de la valeur optimale (≈12°C) au niveau du stade production et de la station d'expédition du fait d'un stockage mono-produit, mais une température plus faible dès lors que la tomate est mélangée avec les autres espèces dans la suite du circuit logistique. Des hétérogénéités de températures des tomates selon leur emplacement dans une palette (écart de 3 à 6°C) ou dans un véhicule (variabilité importante) ont été observées.

Lors de changements des conditions d'ambiance au cours du circuit logistique, de nombreux paramètres influent sur la rapidité et l'homogénéité d'évolution des températures d'une palette. Les travaux ont mis en évidence l'importante influence de la vitesse de l'air. L'hétérogénéité de température est liée à l'hétérogénéité du flux d'air devant la palette car la vitesse de l'air varie avec la hauteur, et au flux à l'intérieur des colis avec un passage préférentiel de l'air au centre en face de l'encoche latérale. Les colis du haut de la palette sont ceux qui subissent les variations de températures les plus fortes. Même si les travaux expérimentaux ont été menés avec des colis de dimensions 30 x 40 cm avec encoches latérales, dans une configuration particulière de huit colis par niveau de palette (deux rangées

de quatre colis), ces approches et résultats peuvent en partie s'appliquer à une configuration de colis de 40 x 60 cm avec encoche latérale en deux rangées de deux colis par niveau de palette.

L'étude qualité a montré qu'après une semaine à des températures de 12 à 15°C, des températures plus faibles pouvant aller jusqu'à 3°C sur une durée limitée de 10 jours, ont peu d'impact sur la qualité des tomates. *A contrario*, pendant la 1e semaine, des températures de 8°C ou moins ne permettent pas aux tomates d'exprimer leur potentiel qualitatif : elles sont moins rouges et plus acides. Ces résultats vont dans le sens des circuits actuellement suivis par les tomates. En effet, les premiers maillons des circuits logistiques, que sont les producteurs et les stations d'expédition, déclarent stocker les tomates au-dessus de 12°C pendant en moyenne 5 jours du fait d'un stockage majoritairement mono-produit. En revanche, dans les maillons de l'aval de la chaine logistique, il est possible de rencontrer des températures basses, les tomates pouvant être mélangées à d'autres produits alimentaires frais. Cette pratique a donc moins d'impact sur la qualité que de conserver les tomates à 3°C directement après la récolte. La conservation des tomates au réfrigérateur durant 4 jours par les consommateurs n'a pas d'impact sur leurs qualités organoleptiques dans le cas d'un circuit logistique maîtrisé et lorsqu'elles sont consommées après remise à température ambiante.

Les principales sources de variabilité de la qualité des tomates mises en évidence dans ce projet sont la variété et le stade de maturité à la récolte. Une tomate récoltée précocement et conservée à des températures inférieures à 8°C restera plus ferme, plus acide et moins rouge. Cependant, si elle est conservée à 15°C, elle rattrapera la qualité des tomates récoltées au stade rouge en 1 à 2 semaines. Le choix de la variété va déterminer un potentiel de qualité et un potentiel de conservation dans le circuit logistique. Les variétés récentes ont été sélectionnées pour se maintenir dans les circuits logistiques et sont donc potentiellement moins sensibles aux températures basses et à une conservation de plusieurs semaines que des variétés plus anciennes, ce qui peut expliquer les faibles différences de qualité observées dans les circuits logistique simulés. L'étude de variétés plus anciennes et gustatives auraient peut-être montré des résultats d'impact du circuit logistique plus marqués.

Des modèles thermiques et de qualité développés dans le cadre du projet permettent de prédire la qualité des tomates en fonction du circuit logistique. Ces modèles représentent mieux la réalité de terrain que ceux de la littérature car ils tiennent compte du stade de la maturité à la récolte et des variabilités de temps-température qui ont lieu dans un circuit logistique.

Les travaux sur les solutions techniques pour limiter l'effet du froid ont mis en évidence également l'influence du filmage de la palette dans la diffusion de l'air et la faible influence du taux d'ajourage et de l'épaisseur de la lame d'air dans les colis. Les coiffes de palette à rebords limitent la diffusion d'air froid en protégeant les colis supérieurs. Les meilleurs dispositifs testés ont eu un effet ralentisseur de descente ou de montée de température (de 20°C à 4°C, ou inversement) de 17 h environ de décalage par rapport au témoin, pour atteindre la température de mi-refroidissement et 37 h pour atteindre la température de 7/8e (temps raisonnable de refroidissement). Ceux-ci ont donc un impact final relativement limité sur la qualité de la tomate, au regard des résultats globaux du projet - hormis dans le cas particulier de colis de tomates situés en haut de palette multiproduit, dans un camion soufflant de l'air très froid avec limitation du risque de gel.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Valérie Mérendet : https://orcid.org/0000-0001-6693-4824

Steven Duret : https://orcid.org/0000-0002-9293-8092

Onrawee Laguerre : https://orcid.org/0000-0001-7017-5912

Jean Moureh : https://orcid.org/0000-0002-7846-7773

Evelyne Derens-Bertheau : https://orcid.org/0000-0002-6768-2240

Denis Flick : https://orcid.org/0000-0002-3776-9951

Elsa Desnoues : https://orcid.org/0009-0008-0600-6151

Christophe Aubert : https://orcid.org/0000-0002-6309-9365

Contributions des auteurs

Valérie MÉRENDET – Conceptualisation, Acquisition de financement, Administration de projet, Supervision, Visualisation, Rédaction,

Onrawee LAGUERRE – Supervision, Validation, Rédaction – révision et édition

Sophie ANNIBAL – Investigation, Visualisation, Rédaction – révision et édition

Evelyne DERENS-BERTHEAU – Investigation, Visualisation, Rédaction – révision et édition

Jean MOUREH – Investigation, Visualisation, Rédaction – révision et édition

Denis FLICK – Analyse formelle, Méthodologie

Steven DURET – Analyse formelle, Méthodologie, Conservation des données, Rédaction – révision et édition

Elsa DESNOUES – Analyse formelle, Investigation, Ressources, Supervision, Validation, Rédaction – révision et édition

Valentine COTTET – Investigation, Rédaction – révision et édition

Christophe AUBERT – Tnvestigation, Rédaction – révision et édition

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Fonds Casdar

Références bibliographiques

Agyeman, E.K.K.; Duret, S.; Flick, D.; Laguerre, O.; Moureh, J. 2023. Computational Modelling of Airflow and Heat Transfer during Cooling of Stacked Tomatoes: Optimal Crate Design. Energies 2023, 16, 2048. https://doi.org/10.3390/en16042048

Annibal S., Bulver F., Diatta C., Giry Q., 2021. Suivi et optimisation de la chaîne logistique des fruits et légumes. Enregistrements thermiques relevés dans le circuit de distribution. INFOS CTIFL juin 2021, N°372, p. 54-62.

Annibal S., Derens Bertheau E., Mérendet V. 2023. Projet FreshQualiTom, présentation et caractérisation des circuits logistiques – Impact du froid sur la qualité des tomates. INFOS CTIFL Janvier 2023, N°388, p. 6-13.

CLCV, Rapport d'analyse, 2017

Desnoues E., Aubert C., Cottet V., Chalot G., Jost M. 2024. Projet FreshQualiTom, la qualité des tomates préservée dans les circuits logistiques – Impact du froid sur la qualité des tomates. INFOS CTIFL février 2024, N°399, p. 32-37.

Données Kantar, 2017.

Duret S., Aubert C., Annibal S., Derens-Bertheau E., Cottet V., Jost M., Chalot G., Flick D., Moureh J., Laguerre O., Mérendet V., Desnoues E. 2025. Impact of harvest maturity and storage conditions on tomato quality: A comprehensive experimental and modeling study. Postharvest Biology and Technology 219, 14 p. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113286

Farneti, B., Alarcón, A.A., Papasotiriou, F.G., Samudrala, D., Cristescu, S.M., Costa, G., Harren, F.G.M, Woltering, E.J., 2015. Chilling-Induced Changes in Aroma Volatile Profiles in Tomato. Food Bioprocess Technology, 8, 1442–1454, DOI 10.1007/s11947-015-1504-1.

Laguerre O., Denis A., Bouledjeraf N., Duret S., Derens Bertheau E., Moureh J., Aubert C., Flick D., 2022, Heat transfer and aroma modeling of fresh fruit and vegetable in cold chain: case study on tomatoes, International Journal of Refrigeration, 133, 133-144. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.10.009

Laguerre O., Denis F., Duret S., Moureh J., Flick D., Mérendet V. 2023. Projet FreshQualiTom, influence des conditions du circuit logistique sur le refroidissement – Impact du froid sur la qualité des tomates. INFOS CTIFL mars 2023, N°390, p. 32-39.

Navez B., Jost M., Buret M., Causse M., 2004. Intérêt nutritionnel de la tomate – impact des variétés et des itinéraires post-récolte. Infos CTIFL n° 204, p. 27-33.

Navez. B., 2011. Tomate, qualité et préférences. HortiPratic, éditions CTIFL, 271 p.

Pour citer cet article : Valérie Mérendet, Onrawee Laguerre, Sophie Annibal, Evelyne Derens-Bertheau, Jean Moureh, *et al*.. FreshQualiTom : étude de l'impact du froid sur les qualités de la tomate, au cours du circuit logistique. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.370-386. 10.17180/ciag-2025-vol107-art27

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Co-Agil : Accompagner les animateurs de collectifs agricoles dans la durée

Blandine PASSEMARD-KALKBRENNER[1], Hélène BRIVES[2] et Mathilde GRAU[3]

[1] Travail Réel, rue de la fondation Dorothée Petit, 69540 Irigny, France

[2] ISARA, 23 rue Jean Baldassini, 69007 Lyon, France

[3] Fédération Régionale des CUMA AuRA, 23 rue Jean Baldassini, 69007 Lyon, France

Correspondance : blandine.passemard@cuma.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art28

Résumé

Le projet CASDAR Co-Agil a soutenu les animateurs de collectifs agricoles dans leurs missions liées aux transitions agroécologiques, générationnelles et numériques. Ce projet de recherche-action avait pour objectif de « faire parler travail » afin d'améliorer le fonctionnement des collectifs agricoles en développant des pratiques de gouvernance et d'organisation du travail adaptées aux évolutions du secteur. Un des dispositifs centraux du projet, la Communauté d'échange de pratiques et de production (CEPP), a permis aux animateurs de partager leurs expériences et d'échanger des outils et concepts. Toutefois, bien que la CEPP ait été efficace, son format distanciel a révélé certaines limites, notamment pour une production concrète. Cela a conduit à l'organisation de séminaires en présentiel pour renforcer la dynamique collective et produire des plans d'action pour les accompagnements expérimentés. En complément, des trinômes (composés d'un animateur de collectifs, d'une accompagnatrice et d'une chercheuse) ont été formés pour répondre aux besoins spécifiques des animateurs. Ce dispositif a permis d'accompagner les animateurs dans le passage de l'analyse des demandes à la formulation d'une offre d'accompagnement. Bien que ce modèle ait offert une approche individualisée et enrichissante, sa reproductibilité en dehors d'un cadre de recherche-action reste difficile. En conclusion, le projet Co-Agil a montré l'importance de l'accompagnement personnalisé et de la mise en réseau dans la gestion des transitions agricoles, tout en soulevant des enjeux importants pour l'avenir de l'accompagnement dans ce secteur.

Mots-clés : animateur, collectifs agricoles, accompagnement, travail, transitions

Abstract: Co-Agil, supporting facilitator agents in agriculture over long periods of time

The CASDAR Co-Agil project supported agricultural collective facilitators in their roles related to agroecological, generational, and digital transitions. This action-research project aimed to "make work talk" in order to improve the functioning of agricultural groups by developing governance practices and work organization adapted to the changes in this sector. One of the central elements of the project, the Community of Practice and Production Exchange (CEPP), allowed facilitators to share their experiences and exchange tools and concepts. However, although the CEPP was effective, its remote format revealed some limitations, particularly for practical production. This led to the organization of in-person seminars to strengthen the collective dynamics and create action plans for the facilitated experiments. Additionally, trinomes (composed of a collective facilitator, a support person, and a researcher) were formed to address the specific needs of the facilitators. This helped facilitators transition from analyzing requests to formulating a support offer. Although this model provided an individualized and enriching approach, its reproducibility outside of an action-research framework remains challenging. In conclusion, the Co-Agil project demonstrated the importance of individual support and networking in managing agricultural transitions, while raising significant issues for the future of support in this sector.

Keywords: facilitator agent, farmers groups, guidance, work, transitions

1. Introduction

Le projet « *Co-Agil : Vers des collectifs agiles et organisation 2.0* » est un projet lauréat du programme CASDAR innovation. D'une durée de 42 mois[12], il a débuté en novembre 2019 et se termine en octobre 2023. Il s'agit d'un projet multipartenaire[13] et multirégional[14] (région Ouest et Auvergne-Rhône-Alpes de la France) dont la finalité initiale est de « *favoriser les différentes formes de coopérations de proximité capables d'intégrer les jeunes générations d'agriculteurs et d'agricultrices porteuses de nouvelles attentes en termes de travail et de nouvelles compétences numériques* ». Très concrètement, l'ambition du projet a été d'engager un débat sur l'activité de travail pour améliorer le fonctionnement des collectifs agricoles, l'efficacité et l'intérêt du travail collectif ainsi que le bien-être au travail des membres des collectifs. Pour atteindre cet objectif, l'équipe-projet, composée d'une cheffe de projet, d'une coordinatrice, de trois chercheuses, et de quatre accompagnatrices d'animateurs de collectifs agricoles, a souhaité impliquer les animateurs des collectifs agricoles ciblés. D'après la certification professionnelle « piloter l'animation des collectifs agricoles » déposée par la FN CUMA[15], les animateurs ont pour missions principales d'accompagner le fonctionnement et le développement des collectifs. Ils peuvent également, selon leurs niveaux d'expertise, apporter les connaissances techniques nécessaires à la réalisation d'un projet du collectif. Avec une volonté très nette, de la part de l'équipe-projet, de coconstruire l'accompagnement des collectifs agricoles, la participation des animateurs était très attendue dans le cadre de l'Action 2[16], faisant suite à une première action « recherche ». Cette action correspond à la phase d'expérimentation de nouveaux fonctionnements avec les « collectifs laboratoires ». Les collectifs d'agriculteurs désignés comme « laboratoires » correspondent aux collectifs ayant une ou des problématiques en lien avec le projet Co-Agil et souhaitant s'engager dans la co-construction de nouveaux accompagnements. Sont prévus dans le projet Co-Agil des temps spécifiques, en présentiel ou à distance consacrés à des échanges de pratiques entre accompagnateurs des collectifs pour analyser les difficultés et les bonnes pratiques. De cette analyse seront tirés des repères et des méthodes pour les accompagnateurs de collectifs. Au gré des difficultés rencontrées par les animateurs de collectifs lors de sa réalisation (identification et construction de la problématique des « collectifs laboratoires », manque de temps et non priorisation du projet par rapport aux « affaires courantes », crise sanitaire), **l'équipe-projet de Co-Agil a conçu et expérimenté « pas à pas » un vaste dispositif d'accompagnement des animateurs de collectifs agricoles**. Il a ainsi été possible d'accompagner plus d'une vingtaine d'animateurs de collectifs agricoles ; majoritairement des animateurs de CUMA (Coopérative d'utilisation des matériels agricoles) mais également des animateurs de GEDA (Groupe d'étude et de développement agricole), des

[12] Initialement prévu sur une durée de 42 mois, le projet a bénéficié d'une prolongation de 6 mois du fait de la crise sanitaire.

[13] Les organismes de développement : FR CUMA Ouest, FR CUMA AuRA, FRGEDA Bretagne, TRAME, la Coopération Agricole. Les partenaires de recherche : Isara, VetAgro Sup, ESA d'Angers. Les partenaires de l'enseignement agricole : Le Valentin EPLEFPA Valence, La Côte Saint-André Enseignement agricole public.

[14] Les partenaires sont localisés sur deux Régions de France Métropolitaine : la Région Ouest et la Région Auvergne-Rhône-Alpes.

[15] https://www.francecompetences.fr/recherche/rs/6022/

[16] Action 2 : « Co-construire de nouvelles formes de gouvernance et d'organisation du travail qui faciliteront la réussite du maillage intergénérationnel au sein des collectifs en intégrant les opportunités du numérique »

groupements d'employeurs et de Parc Naturel Régional[17]. Le présent article a pour objectifs de présenter les différents éléments constituant le dispositif d'accompagnement des animateurs de collectifs agricoles expérimenté dans le cadre du projet CASDAR Co-Agil i) la communauté d'échange de pratique et de production, ii) les séminaires, iii) les trinômes (animateur de collectif, accompagnatrice d'animateur et chercheuse) et enfin iv) appréhender leur cohérence globale et discuter l'intérêt d'un accompagnement long terme des animateurs de collectifs agricoles dans, mais surtout hors, du cadre d'un projet de Recherche-Action.

2. La Communauté d'Echange de Pratiques et de Production (CEPP)

2.1. Définition et objectifs

La Communauté d'Echange de Pratiques et de Production (CEPP) est un **temps collectif et participatif** consacré au **suivi des accompagnements** expérimentés par les animateurs auprès des collectifs agricoles, dans le cadre du projet Co-Agil. La CEPP réunit les accompagnatrices des animateurs de collectifs agricoles (membres de l'équipe-projet) et les chercheuses (en fonction des besoins) autour des animateurs de collectifs agricoles. **Le contenu et le format ont évolué,** tout au long du projet, **en fonction des expériences vécues** par les différents acteurs-projets. Le suivi en CEPP démarre **en amont de l'accompagnement expérimental des collectifs d'agriculteurs ;** il s'agit alors d'**aider les animateurs à mieux cerner la finalité du projet afin d'identifier les collectifs agricoles** susceptibles d'en bénéficier. Cela se traduit par des apports de connaissances théoriques et pratiques, constituant un socle commun aux acteurs-projet. Cette étape préparatoire est déterminante dans le déroulé du projet. C'est ainsi la nécessité de partager l'approche conceptuelle du travail retenue au sein du projet avec les animateurs de collectifs de manière claire et pratique (sans être simplifiée) qui a permis de concevoir ce qui sera appelé par la suite du projet « la rose des vents de Co-Agil »[18]. Lorsque l'**accompagnement expérimental des collectifs d'agriculteurs est engagé**, les temps de la CEPP permettent d'**échanger à propos des difficultés rencontrées par les animateurs** (par exemple, la perte de contact avec le collectif agricole). Il s'agit également, pour les animateurs, de faire des **retours d'expériences quant à l'usage des outils d'animation conçus ou adaptés dans le projet**. Les retours d'expérience réalisés par les animateurs de collectifs agricoles sont d'une part, l'occasion pour l'équipe-projet de faire évoluer l'outil et d'autre-part, une opportunité pour les autres animateurs de se projeter dans l'utilisation éventuelle de l'outil en question. En effet, la progression des différents accompagnements expérimentés a été diachronique. Tout au long du projet, les animateurs se trouvaient à des étapes différentes de l'accompagnement du collectif agricole : certains avaient engagé l'accompagnement lorsque d'autres étaient encore à l'étape de l'identification d'un collectif à accompagner.

2.2. Modalités et ressources nécessaires pour la mise en œuvre

La CEPP est une ressource pour les animateurs de collectifs agricoles, en amont, et durant tout le déroulé de l'accompagnement qu'ils expérimentent. Sur toute la durée du projet Co-Agil, il y a eu neuf CEPP, la première ayant eu lieu le 07 octobre 2020 (un an après le démarrage du projet du fait de la crise sanitaire de 2019). Après avoir testé plusieurs formats, l'équipe-projet a défini le format définitif de la CEPP en fonction du taux de participation des animateurs de collectifs agricoles. La CEPP se tient,

[17] Six CUMA, deux groupements d'employeurs, un GEDA et un groupe d'échanges de pratiques Patur'en Pilat ont été accompagnés dans le cadre du projet Co-Agil.

[18] Cf. Fiche ressource La Rose des Vents, un outil pour s'orienter dans les besoins de l'humain au travail https://coagil.fr/ressources/fiches-methode-ressource/

tous les deux mois, durant **une demi-journée, en distanciel**. Le rythme d'une CEPP tous les deux mois laisse suffisamment de temps aux animateurs de collectifs agricoles d'avancer dans l'accompagnement qu'ils expérimentent, tout en permettant de conserver un suivi régulier et continu. Au regard de la charge de travail ressentie par les animateurs de collectifs au sein du cadre général de leur activité, le choix d'une durée d'une demi-journée en distanciel (plutôt qu'une journée complète en présentiel) a semblé plus acceptable. D'autant plus qu'il existe un éloignement géographique important entre les différents acteurs du projet. Le format distanciel a induit l'utilisation de Google Meet© pour la visioconférence, en association avec la plateforme visuelle Klaxoon© lors des temps participatifs. L'ensemble des accompagnatrices d'animateurs de collectif agricole et des chercheuses sont conviées à la conception de chacune des CEPP. L'animation de la CEPP est confiée à deux ou trois accompagnatrices, en fonction du pré-programme et de leurs spécialités respectives. Le Tableau 1 détaille les étapes préalables à l'organisation d'une CEPP.

Tableau 1 : Etapes de l'organisation d'une Communauté d'échange de pratiques et de production (CEPP)

J-1 mois Durée : 2 à 3h	• Réunion des accompagnatrices et des chercheuses pour faire le point sur les expériences en cours et les besoins des animateurs de collectifs agricoles. • Définition d'un pré-programme. • Répartition des tâches pour la préparation en fonction des compétences des membres de l'équipe-projet.
Temps de travail individuel des accompagnatrices et des chercheuses.	
Présentation du pré-programme dans le cadre du comité opérationnel de Co-Agil (constitué de la cheffe de projet, de la coordinatrice, des accompagnatrices d'animateurs de collectifs et d'une chercheuse)	
Courrier électronique à destination des participants : inscription, rappel de la date, pré-programme, demande de travail préparatoire (si nécessaire).	
J-15 jours Durée : 2 à 1h30	• Retour du travail effectué individuellement. • Conception du programme définitif. • Répartition des temps d'animation et des fonctions (prise de note, contrôle du temps).
Temps de travail individuel des accompagnatrices et des chercheuses.	
J-8 jours Durée : 1h (facultatif)	• Échanges autour d'un contenu qui questionne.
Jour J Durée : 1 demi-journée	• Connexion des accompagnatrices 15 minutes avant le démarrage. • Accueil des participants sur Google Meet© . • Partage du lien vers la plateforme visuelle Klaxoon©. • Brise-glace pour favoriser l'esprit de groupe (différent à chaque fois). • Déroulé en fonction du programme prévu → alternance entre des apports de connaissances théoriques et des outils d'animation, du partage d'expériences et de la production d'outils. • Prise de notes en continu. • Clôture, recueil des impressions et rappel de la date de la prochaine CEPP.
Courrier électronique à destination des participants : compte-rendu de la dernière CEPP et rappel de la date de la prochaine CEPP.	

2.3. Témoignage des parties prenantes

Les verbatim ci-dessous retranscrivent l'avis des différentes parties prenantes sur la CEPP.

- accompagnatrices des animateurs de collectifs agricoles : *« Toujours des moments intéressants pour avoir une vision des terrains et reconnecter avec l'équipe projet. » ;*
- chercheuses : *« On s'est posé beaucoup de questions sur la manière de construire ce dispositif, qu'il soit utile. On devait prendre en compte les besoins concrets, pratiques des animateurs. » ;*
- animateurs de collectifs agricoles : *« C'est le point fort de Co-Agil. On a échangé entre animateurs et on a créé des ressources, des outils. Échanges avec animateurs d'autres régions, d'autres réseaux. Échanges très riches. Pas de perte de qualité due à la visioconférence. »*

« L'articulation entre animateurs de collectifs agricoles, accompagnatrices et chercheuses : très complémentaire, très enrichissante. Ces 3 entités composent la CEPP. Tous dans le même bateau, dans la même direction ». Objectif partagé. « Même si les collectifs sont différents, les blocages sont les mêmes ! »

« Toujours un moment où on repart avec plus de motivation qu'au départ ! »

« C'est un peu mon journal de bord. On prend le temps de prendre des nouvelles, d'échanger sur les outils. Phases ascendantes, prises en considération, utilisées pour la suite. Et des nouvelles du projet. On a les mêmes problèmes et les mêmes problématiques ! Permet d'élargir le champ de vision. »

« La CEPP c'est Co-Agil. Lien en permanence entre les animateurs. Pas de Co-Agil sans CEPP. »

2.4. Points de vigilance

En fonction de la taille du groupe et de la thématique traitée dans le cadre de la CEPP, il est conseillé de mobiliser **au moins deux accompagnatrices d'animateurs de collectifs**.

La **durée du temps de préparation d'une CEPP peut être un frein** : il faut compter 3 à 5 heures de travail en groupe (conception du pré-programme, programme, répartition des temps d'animation, discussion autour des contenus) et compter un nombre de jours de travail individuel très variable (création du contenu des animations, conception du visuel sur la plateforme Klaxoon©).

Le format distanciel de la CEPP induit de **maîtriser l'animation à distance** et les outils attenants (visioconférence et plateforme visuelle), d'être **vigilant au tempo** du programme en alternant les contenus (pédagogie expositive et participative), de **ne pas négliger les temps conviviaux** surtout si le groupe ne se connait pas par ailleurs.

Pour le bon déroulé de la CEPP et afin d'adapter le programme, il est important d'**avoir connaissance du profil des animateurs de collectif agricole** constituant le groupe accompagné, leurs niveaux d'expériences par rapport à la thématique traitée et leurs anciennetés sur le poste. Un temps individuel peut-être consacré à ces questions en amont de la CEPP car le format distanciel limite les interactions.

Les accompagnatrices d'animateur de collectifs agricoles ne sont pas directement en contact avec les collectifs agricoles accompagnés cela peut limiter leurs compréhensions des problématiques rapportées par les animateurs de collectifs agricoles et leurs pouvoirs d'agir sur l'accompagnement en cas de blocage (cf. 3. Les trinômes).

2.5. Conclusion

Dans le cadre du projet Co-Agil, la mise en place de temps spécifiques consacrés à l'échange de

pratiques entre les animateurs de collectifs agricoles a été considérée comme un élément permettant de développer de nouvelles formes d'accompagnement fondées sur le questionnement du travail et visant le renouvellement des générations dans les groupes d'agriculteurs. La CEPP a été l'occasion de créer une dynamique de groupe autour de la finalité du projet. Cet espace a été central lorsque les animateurs de collectifs ont rencontré des difficultés dans la mise en place de l'accompagnement, notamment lorsqu'il a fallu identifier les groupes susceptibles d'en bénéficier. Plus largement, les animateurs ont eu la possibilité de questionner leurs métiers et d'identifier des points communs entre leurs situations professionnelles (bien qu'ils ne travaillent pas sur les mêmes territoires). Cela a permis de lutter contre le sentiment d'isolement parfois ressenti et de créer un collectif de travail autour d'un objectif partagé. Pour l'équipe-projet, la CEPP a permis aux animateurs de s'enrichir mutuellement sans les importants investissements que nécessitent une méthode comme le co-développement. Ainsi, la conception de l'accompagnement Co-Agil a bénéficié de la diversité des expériences vécues par les acteurs-projets.

3. Les séminaires

3.1. Définition et objectifs

Les séminaires sont des **temps collectifs** et **participatifs** consacrés à toutes les dimensions du projet Co-Agil et non seulement à la conception de nouveaux accompagnements. Trois séminaires ont été organisés tout au long du projet, sans compter le séminaire de clôture. Ils ont été l'occasion de **diffuser les connaissances produites** (mémoires de recherche), de faire **un état des lieux des accompagnements** en cours d'expérimentation et de **présenter les productions** réalisées dans le cadre de Co-Agil (par exemple, *Univers collectif* avec le lycée du Valentin). Des **intervenants extérieurs** ont également été invités pour partager leurs expériences autour des thèmes du projet et ainsi, alimenter les réflexions en cours. En réunissant les différents acteurs-projets, il a été possible de donner un niveau d'informations égal à chacun des participants pour, ensuite, concevoir collectivement des stratégies et faire avancer le projet. Par exemple, la mise en discussion de questionnements concrets a permis d'élaborer un plan d'action annuel pour chacun des accompagnements expérimentés par les animateurs de collectifs agricoles. Ainsi, les séminaires ont également été **des lieux de productions importants.**

3.2. Modalités et ressources pour la mise en œuvre des séminaires

Les séminaires Co-Agil se sont déroulés sur deux jours. A l'exception d'une journée en 2021, ces temps collectifs ont eu lieu **en présentiel**. Compte tenu de l'éloignement géographique des différents partenaires et du choix d'un format distanciel pour la CEPP, il semblait important, pour l'équipe-projet, de réunir les acteurs-projet en présentiel dans l'objectif de renforcer leurs liens et de maintenir une dynamique collective.

3.3. Points de vigilance

Les séminaires sont programmés sur deux jours et les acteurs-projets viennent de structures différentes. Il est important de prendre en compte les **contraintes professionnelles de chacun et la temporalité des structures avant de planifier le séminaire**. En effet, l'activité de certains acteurs peut être en interdépendance avec l'activité des agriculteurs ce qui implique de prendre en compte la saisonnalité du travail pour s'assurer de la présence d'un maximum de partenaires.

La réalisation de projets multi-régionaux engendre un éloignement géographique des partenaires qui peut parfois être important. Il faut alors être vigilant quant au **choix de la localisation du séminaire** afin de mobiliser au mieux les acteurs-projets.

Depuis la crise sanitaire de 2020, les mouvements de salariés au sein des entreprises se sont accélérés. La réussite d'un projet s'appuyant principalement sur une bonne dynamique collective, il est important de soigner les temps dédiés à l'**interconnaissance tout au long du projet** car les acteurs-projet changent régulièrement et à tout moment.

3.4. Conclusion

D'après l'expérience du projet Co-Agil, pour assurer le bon déroulement d'un projet multirégional et multipartenaire, réunissant des acteurs qui ne se connaissent pas systématiquement en amont, avec des niveaux des expériences et des expertises très variées, les temps collectifs en distanciel ne sont pas suffisants. Il est nécessaire de réunir, à rythme régulier (minimum une fois par an) les différents acteurs afin d'insuffler une dynamique aux différents partenaires. Les temps d'interconnaissance permettent de créer des liens entre les personnes, de se sentir partie prenante du projet et de s'engager dans le projet. Les temps collectifs des séminaires se sont révélés être des temps de production importants dans le projet Co-Agil. Cela tient certainement au choix d'avoir privilégié le format distanciel pour la CEPP. La dimension « production » restant limitée en distanciel et ce, malgré la mise en place d'une animation adaptée.

4. Le fonctionnement par trinôme : animateur de collectif / accompagnatrice d'animateur de collectif / chercheuse

4.1. Définition et objectifs

Dans le courant du printemps 2022, des trinômes ont été mis en place pour répondre au besoin de renforcer le lien entre les connaissances produites dans l'Action 1 (action orientée recherche et production de connaissances) et les accompagnements expérimentés auprès des collectifs (Action 2) face aux difficultés rencontrées par les animateurs de collectifs en cours d'expérimentation. En effet, les animateurs ont rarement réussi à traduire seuls la problématique de fonctionnement identifiée par le groupe (par exemple améliorer la communication, convaincre les jeunes adhérents de prendre des responsabilités…) en des sujets relatifs à l'activité de travail. Le parti-pris pragmatique de Co-Agil, de parler travail à partir de situations concrètes de travail et non pas de manière hors-sol, a nécessité cet ancrage dans les problématiques du collectif. L'accompagnement en trinôme a la particularité de se situer au plus près de l'expérience vécue par l'animateur de collectif agricole ce qui engendre une grande variabilité de son format. Les trinômes sont composés d'une accompagnatrice d'animateurs de collectifs agricoles, d'une chercheuse et d'un animateur de collectifs agricoles. Cet élément constituant une partie du dispositif d'accompagnement des animateurs de collectifs agricoles n'était pas initialement prévu dans le projet. L'accompagnement des animateurs dans ce processus de traduction d'une problématique exprimée en une problématique de travail a permis de formaliser les étapes de ce processus de traduction afin de le partager.

4.2. Modalités et étapes

L'équipe-projet a constitué les trinômes en fonction de la répartition géographique des différents acteurs. Les accompagnatrices des animateurs de collectifs agricoles ont ensuite pris le rôle de coordination pour chacun de leurs trinômes respectifs. Elles ont pris l'initiative de proposer des entretiens individuels aux animateurs de collectifs. Ils n'ont pas systématiquement donné suite. Le format est adapté au besoin énoncé par l'animateur de collectifs agricoles. Il en découle une grande variabilité de l'accompagnement. Parfois les accompagnatrices et les chercheuses ont aidé l'animateur de collectif à préparer une intervention dans le collectif, parfois le trinôme est intervenu ensemble

auprès du collectif d'agriculteurs. Le nombre de rencontres entre les trinômes est également différent d'un trinôme à l'autre en fonction du besoin et de la difficulté rencontrée par l'animateur.

4.3. Témoignage des parties prenantes

- Accompagnatrices des animateurs de collectifs agricoles : « *Ça m'a permis de mieux percevoir ce qu'on faisait en allant plus directement au contact d'un collectif* » ;
- Animateurs de collectifs agricoles : « *Au début tu te dis « c'est bien beau, j'ai fait une analyse de la demande et maintenant je fais quoi ? et si je fais un bide ? Tu rentres chez toi et t'y retournes pas quoi. La préparation [avec une chercheuse et une accompagnatrice] m'a permis de définir où j'allais et m'a rassurée. Ça m'a permis de me l'approprier [l'outil de la rose des vents ?] et de le porter de façon différente, j'avais plus confiance et je savais où j'allais. Du coup à l'échange c'était nickel.* »

4.4. Point de vigilance

La présence d'une chercheuse dans le trinôme pose la question de la reproductibilité de cet accompagnement en dehors du cadre d'un projet de Recherche-Action.

L'accompagnatrice d'animateurs de collectifs doit maîtriser différentes postures d'accompagnement plus ou moins prescriptives en fonction de la demande exprimée par l'animateur de collectifs agricoles.

4.5. Conclusion

Face à des situations souvent complexes, la définition de trinôme, au cours du projet, a permis aux animateurs de surmonter les difficultés, et notamment, de passer de l'analyse de la demande à la formulation d'une offre d'accompagnement. Mettre en débat la situation et produire collectivement des propositions pour les groupes ont enrichi l'expérience des animateurs de collectifs agricoles. La diversité des expertises, recherche et opérationnelle, a été un atout. Il paraît néanmoins difficile de reproduire cette organisation tripartite en dehors d'un projet de Recherche-Action. Au sein du Réseau des Cuma en AuRA, un système de binôme entre animateurs de collectifs agricoles a été mis en place, ainsi que des parrainages/marrainages entre animateurs experts et débutants dans les suites du projet Co-Agil. Ces propositions pourraient être déployées dans d'autres structures. Le co-développement peut également permettre, comme pour les trinômes, d'approfondir un cas par séance.

5. Discussion

Le projet Co-Agil a permis de créer un espace virtuel et des temps collectifs (une demi-journée tous les deux mois) dans lesquels il était possible d'échanger sur les pratiques mises en œuvre lors des expérimentations d'accompagnement de collectifs agricoles et d'acquérir de nouvelles connaissances (nouveaux outils d'animation et apports conceptuels) : il s'agit de la Communauté d'Échange de Pratiques et de Production (CEPP) (Figure 1). Les accompagnatrices d'animateurs ont pris en compte la grande diversité des profils d'animateurs (ancienneté, formation, localisation, disponibilité, etc.) dans le format de la CEPP et dans le contenu de ces temps. Néanmoins, la CEPP reste un espace dans lequel on répond aux besoins du groupe. En cours du projet, l'équipe-projet a constaté que cet accompagnement n'était pas suffisant pour répondre aux difficultés de certains animateurs. Notamment, pour passer de l'analyse de la demande à la formulation d'une offre de service contractualisée. Ceci a engendré la mise en place de trinômes (accompagnatrice d'animateurs, chercheuse, animateurs de collectifs agricoles). Les trinômes ont permis de sécuriser les animateurs mais ont également été l'occasion pour les accompagnatrices d'animateurs et les chercheuses d'avoir, parfois, un contact direct avec les agriculteurs en collectif et une compréhension fine du travail concret

des animateurs. Les accompagnatrices des animateurs de collectifs agricoles ont suivi les animateurs en fonction des besoins qu'ils ont exprimé. L'association du format distanciel de la CEPP et de l'accompagnement en trinôme a pour intérêt, contrairement au co-développement, de permettre de prendre en charge les différents niveaux d'investissement des animateurs de collectifs agricoles. Le co-développement nécessite un investissement personnel important. La prise en charge des diversités de profils d'animateurs est lisible dans la grande variabilité des suivis en trinôme, allant de l'absence de suivi jusqu'à la présence des accompagnatrices et des chercheuses auprès des agriculteurs en collectifs. L'hybridation des temps collectifs, entre distanciel et présentiel, répond à la diversité des organisations du travail des différents partenaires et à l'éloignement géographique. Le choix du format en distanciel pour la CEPP a eu pour conséquence de déplacer l'activité de production vers les séminaires annuels (en présentiel). On peut, en effet, penser que le format présentiel reste le plus adapté pour certains exercices de productions comme l'élaboration des feuilles de route annuelle des accompagnements expérimentés. Par la diversité de profils des animateurs de collectifs agricoles engagés dans le projet Co-Agil, en s'adaptant continuellement aux besoins exprimés et aux réactions des animateurs de collectifs agricoles, l'équipe-projet Co-Agil a conçu un dispositif d'accompagnement des animateurs varié (groupe élargi/groupe restreint ; présentiel/distanciel) capable de prendre en charge cette diversité et ainsi, répondre à un enjeu majeur de l'agriculture d'aujourd'hui (Georget et Mambrini-doudet, 2020).

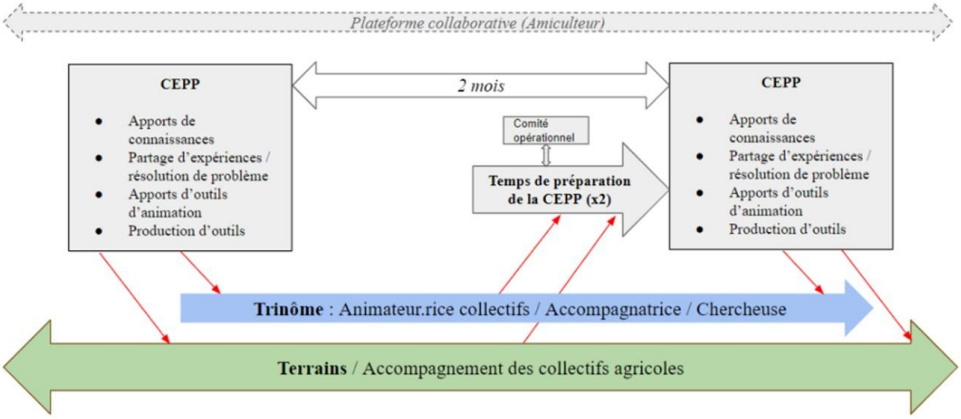


Figure 1 : Dispositif d'accompagnement des animateurs de collectifs agricole dans le cadre du projet Co-Agil

6. Conclusion

Le dispositif d'accompagnement des animateurs de collectifs agricoles que nous venons de décrire a été élaboré et mis en œuvre dans le cadre du projet Co-Agil. Il s'agit d'un projet de Recherche-Action, un cadre de travail inhabituel et incertain pour les animateurs de collectifs agricoles avec de nouvelles connaissances à acquérir et construire. Il semble normal de mettre en place un accompagnement particulier dans ce cas-là. Mais ne serait-il pas tout aussi intéressant d'accompagner les animateurs de collectifs agricoles, dans la durée, en dehors d'un projet de Recherche-Action ? Actuellement, les connaissances sur les transformations du métier d'animateur de collectifs agricoles sont principalement produites dans le champ de la transition agroécologique (Coquil *et al.*, 2018 ; Lacombe, 2018 ; Šumane *et al.*, 2018a ; Cerf et Coquil, 2019 ; Duhamel, 2019 ; Chizallet *et al.*, 2020a ; Klerkx, 2020 ; Christiansen, 2021 ; Duhamel *et al.*, 2021). Pourtant les transformations du métier dépassent ce champ. L'exemple du développement des services de type « conseil stratégique » va permettre d'étayer notre propos. En effet, l'activité de conseil stratégique, également désignée sous le terme « accompagnement », se développe depuis une vingtaine d'années dans les milieux agricoles dits alternatifs. Mais aujourd'hui, ces services apparaissent plus fréquemment dans les offres de services

des Organisations professionnelles agricoles (OPA). À ce titre, ils intéressent les pouvoirs publics qui reconnaissent la nécessité d'un conseil adapté pour soutenir les transitions agri-alimentaires (Gagneur et Thiery, 2020). L'activité de travail des animateurs effectuée dans le cadre du projet Co-Agil correspond à une activité de conseil dit stratégique. Dans le secteur agricole, ce type de service peut être défini comme un accompagnement privilégiant : « un dialogue avec le producteur sur les grandes orientations de son exploitation, ces démarches globales se démarquent des formes habituelles de conseil technique, focalisées sur un sujet spécifique » (Gagneur et Thiery. 2020). Mais, malgré le soutien des pouvoirs publics, dans la réalité quotidienne des animateurs de collectifs agricoles, le développement de cette activité de conseil/accompagnement semble limité. Un tel développement demande du temps, de la réflexivité (Cerf *et al.* 2021) et une réorganisation du travail qui intègre la nouvelle activité. Le dispositif d'accompagnement des animateurs de collectifs agricoles proposé par le projet Co-Agil, prend en compte (dans le processus même de sa conception) le cadre de l'activité des animateurs de collectifs et permet d'accompagner les transformations du travail. Il a permis de saisir également, à travers les difficultés éprouvées par les animateurs dans le cours du projet, combien leurs cadres d'activité actuels peuvent être inadéquats pour intégrer une activité d'accompagnement.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Blandine Passemard-Kalkbrenner : https://orcid.org/0009-0008-7374-5106

Hélène Brives : https://orcid.org/0009-0000-6681-3483

MG : non concernée

Contributions des auteurs

Blandine Passemard-Kalkbrenner a rédigé cet article et il a été relu par la totalité des co-auteures.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercie les partenaires du projet Co-AGIL pour leurs contributions respectives et le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire pour son soutien.

Déclaration de soutien financier

Le projet « *Co-Agil : Vers des collectifs agiles et organisation 2.0* » est un projet lauréat du programme CASDAR innovation 2019 du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire.

Références bibliographiques

Cerf, M., Duhamel, S., Olry, P., 2021. La construction didactique collective d'un dispositif d'échanges entre conseillers agricoles pour accompagner leurs transitions professionnelles. *Travail et Apprentissages*, (1), 97-122.

Cerf, M., Coquil, X., 2019. Accompagner le développement de l'activité des agriculteurs au service de la durabilité du secteur agricole : un développement en milieu ouvert via la communauté de pratiques. In *54. Congrès de la Société d'Ergonomie de la Langue Française (SELF)* (pp. 8-p).

Chizallet, M., Prost, L., Barcellini, F., 2020a. Supporting the Design Activity of Farmers in Transition to Agroecology : Towards an Understanding. Travail Humain, 83(1), 33-59.

Christiansen, G., 2021. Valoriser la diversité des raisonnements des acteurs dans l'accompagnement d'une transition agroécologique, thèse de doctorat en Agronomie, Institut Polytechnique de Toulouse.

Coquil, X., Cerf, M., Auricoste, C., Joannon, A., Barcellini, F., Cayre, P., Chizallet, M., Dedieu, B., Hostiou, N., Hellec, F., Lusson, J.-M., Olry, P., Omon, B., Prost, L., 2018. Questioning the work of farmers, advisors, teachers and researchers in agro-ecological transition. A review. Agronomy for Sustainable Development, 38(5). Scopus. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0524-4

Duhamel, S., 2019. Les effets développementaux du couplage entre activités et situations de conseil : Analyse d'un dispositif d'échange entre conseillers agricoles accompagnant la transition agro-écologique des agriculteurs. Paris, Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France.

Duhamel, S., Olry, P., Cerf, M., 2021. Apprendre à déceler le potentiel de développement des situations de travail : L'exemple de conseillers agricoles face aux enjeux de l'agro-écologie. Activités, 18-1.

Gagneur, C.-A., Thiery, O., 2020. Le conseil stratégique aux agriculteurs : outils, pratiques et perspectives, *Analyse*, *n°150*, Centre d'Études et de Prospectives.

Georget, M., Mambrini-Doudet, M., 2020. Les transformations du monde agricole et de ses acteurs. Livret 1. 2020. ff10.15454/mz5p-aq90ff. ffhal-02932344f

Klerkx, L., Begemann, S., 2020. Supporting food systems transformation: The what, why, who, where and how of mission-oriented agricultural innovation systems. *Agricultural Systems*, *184*, 102901.

Lacombe, C., 2018. Approche pragmatiste de l'accompagnement d'une transition agroécologique : Une recherche action avec une association d'éleveurs et conseillers dans le rayon de Roquefort [Phd]. https://oatao.univ-toulouse.fr/25203/

Šūmane S., Kunda I., Knickel K., Strauss A., Tisenkopfs T., Rios I. des, Rivera M., Chebach T., Ashkenazy A., 2018a. Local and farmers' knowledge matters! How integrating informal and formal knowledge enhances sustainable and resilient agriculture. Journal of Rural Studies, 59, 232-241. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.01.020

Pour citer cet article : Blandine Passemard-Kalkbrenner, Hélène Brives, Mathilde Grau. Co-Agil : Accompagner les animateurs de collectifs agricoles dans la durée. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.387-397. 10.17180/ciag-2025-vol107-art28

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Travail en circuits courts, à la recherche d'équilibres

Christine GUINAMARD [1], Jocelyn FAGON [2], Marie-Odile NOZIERES-PETIT [3], Claire LESUR-DUMOULIN [4], Françoise MORIZOT-BRAUD [5], Laurence ROUHER [6]

[1] Institut de l'élevage, F-04100 Manosque, France

[2] Institut de l'Elevage, Campus INRAE, F-31321 Castanet-Tolosan Cedex, France

[3] INRAE, UMR SELMET, F-34060 Montpellier Cedex, France

[4] UE Maraîchage, INRAE, Université de Montpellier, F-66200 Alénya, France

[5] CERD, F 58290 Moulins-Engilbert, France

[6] AFIPAR, F-79500 Melle, France

Correspondance : christine.guinamard@idele.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art29

Résumé

L'organisation du travail est très fréquemment au centre des préoccupations des producteurs en circuits courts tant leur activité est exigeante et diversifiée. A partir de l'analyse des trajectoires d'exploitations en maraichage et productions animales (lait et viande), du repérage des formes d'organisation du travail au niveau de la production, de la transformation et de la commercialisation, des questions stratégiques des producteurs et des leviers mobilisés pour y répondre, le projet TRAC (**Trajectoire d'évolution de l'organisation du travail pour les exploitations en circuits courts)** propose une méthode d'accompagnement pour mieux prendre en compte la dimension travail dans la réflexion stratégique des agriculteurs en cours de création ou de réorientation de leur activité circuits courts.

Mots-clés : travail, circuits courts, accompagnement stratégique, collectif de travail, charge mentale

Abstract: Working in short food supply chains and searching for equilibria

The labour organisation is very often at the heart of the issues/concerns of producers in short food supply chains, so demanding and diversified is their activity. The TRAC project (**Trajectory and development path of the labour organisation for farms involved in short food supply chains**) is based on an analysis of the trajectories of farms in market gardening and livestock sectors (milk and meat), the identification of forms of labour organisation at production, processing and marketing levels, producers' strategic questions and the levers used to answer them. It proposes a support method to better consider the work dimension in the strategic thinking of farmers in the process of creating or reorienting their short food supply chains activity.

Keywords: labour organisation, short food supply chains, strategic support, work group, mental load

1. Introduction : anticiper et accompagner l'organisation du travail dans les exploitations en circuits courts avec le projet TRAC

Le projet TRAC (Trajectoire d'évolution de l'organisation du travail pour les exploitations en circuits courts), lauréat de l'appel à projets CASDAR Innovation et Partenariat de 2019, est issu de réflexions menées au sein de deux Réseaux Mixtes Technologiques, l'un sur le travail en élevage et l'autre sur l'Alimentation Locale. Les partenaires ont partagé le constat de l'intérêt des circuits courts (CC) pour les agriculteurs et pour les citoyens, tout en pointant les difficultés liées à l'organisation du travail souvent

synonyme d'arrêts précoces des exploitations. Pour la pérennité des filières et la vitalité des territoires, produire des connaissances et des méthodes pour anticiper et accompagner l'organisation du travail sur les fermes en circuits courts constitue un enjeu fort.

Suite aux crises alimentaires successives des quinze dernières années, la demande des consommateurs pour des produits de proximité favorise le développement de la commercialisation de produits agricoles en circuits courts. Le plan Barnier avec sa politique volontariste, le Grenelle de l'Environnement, la Loi d'Avenir de 2014 avec les Projets Alimentaires Territoriaux (PAT) et plus récemment les Etats Généraux de l'Alimentation, suivies des lois Egalim successives, accompagnent en ce sens les attentes sociétales et les très nombreuses dynamiques territoriales et citoyennes (Bonnefoy et Brand, 2014).

Les circuits courts constituent une voie privilégiée de commercialisation des produits lors de l'installation à la fois pour des hors cadre familiaux (Lanciano et Saleilles, 2010) et aussi pour tous ceux qui, déjà installés, souhaitent créer davantage de valeur ajoutée. De plus, les CC constituent une opportunité pour des exploitations dont les filières sont en crise.

Des travaux de recherche des années 90 sur la vente directe de produits agricoles/fermiers (Capt, 1997 ; Sylvander, 1989 et 1994) à ceux les plus récents sur les circuits courts (Chiffoleau, 2008 ; Dufour et Lanciano, 2012), se dégagent deux tendances :

- un élargissement du champ d'action des producteurs (et donc des travaux de recherche développement associés) : de la vente directe aux circuits courts en lien avec l'évolution des préoccupations sociétales ;
- une plus grande différenciation de l'offre en relation avec la diversité des « préférences » des consommateurs pour ces produits.

La mise en marché en circuits courts est source d'innovations constantes (Messmer, 2013), en particulier d'innovations organisationnelles dans les circuits de vente avec la multiplication et l'amélioration des accès aux consommateurs (points de vente collectifs, AMAP (Association pour le maintien d'une agriculture paysanne) mais aussi "Ruche qui dit oui", drives fermiers, sites internet individuels ou collectifs). Elle est marquée par un contexte socio-économique en constante évolution : innovations produits (prêts à consommer ou à cuisiner), innovations services (paiement sans contact, dématérialisation, livraison, emballage froid…). Si, pour les producteurs, le choix du circuit court est aussi un choix de vie (Dufour et Lanciano, 2012), l'adaptation à ce contexte évolutif se fait trop souvent au détriment de l'équilibre organisationnel et de la durabilité économique et sociale de leur activité, notamment lors des phases d'installation (multiplication du nombre d'ateliers, de produits, de points de vente…) ou lors d'évolutions importantes de la ferme.

Les agriculteurs expriment des besoins d'amélioration de leurs systèmes de commercialisation et d'organisation sur l'exploitation (notamment logistique) pour répondre à ces marchés et aux demandes sociétales, besoins qui renvoient directement à des questions d'organisation du travail. L'organisation du travail s'entend ici comme un « *système complexe d'activités* » (Dedieu et Servière, 2010). Dans cette définition, les interactions (arbitrages notamment) entre cultures, conduites techniques et mobilisations des ressources équipement x main-d'œuvre sont prises en compte, ainsi que la répartition des tâches entre membres du collectif.

« *L'organisation de la commercialisation* » constitue sans doute l'un des principaux défis auquel se confrontent les agriculteurs, « *en s'assurant d'une clientèle fidèle afin de parvenir à la rentabilité financière* » (CESE, 2016). Ainsi, la recherche d'un équilibre en termes de viabilité et de vivabilité, se pose pour les fermes en CC en fonction de l'évolution des contextes externes (climat, marché, risques sanitaires…) et internes (santé, famille, objectifs de la personne, caractéristiques du collectif de travail…). Cette recherche ne peut être réduite à la juxtaposition de repères de productivité et de rentabilité produits pour d'autres systèmes (exploitations en filière longue, ateliers de transformation

artisanale…). **Les impacts de la commercialisation en circuits courts sur l'organisation du travail sur les fermes sont donc multidimensionnels** (main-d'œuvre, équipements, techniques de production, modes de transformation, modes de commercialisation…).

La complexification des systèmes de production commercialisant en circuits courts s'accompagne d'ajustement dans les itinéraires techniques ou conduites d'élevage (Aubry *et al*, 2011). Elle impacte la répartition des compétences dans le collectif de travail.

La réflexion stratégique à mener par les agriculteurs ouvre les possibilités et les marges de manœuvre en amont de la phase décisionnelle, tant dans la planification que dans le pilotage. Un questionnement et des adaptations constantes voire une remise en cause fréquente sont nécessaires, ainsi, **l'accompagnement des fermes en circuits courts dans l'organisation du travail demande un outillage spécifique** (outils, méthodes, références).

La finalité du projet TRAC, centré sur l'organisation du travail est d'améliorer la durabilité sociale et économique dans les exploitations en circuits courts par une meilleure prise en compte des dimensions sociale et humaine dans leur stratégie.

Le projet TRAC a donc :

- analysé l'organisation du travail d'exploitations en circuits courts dans une diversité de situations (filières, modes de production ; agriculture biologique ou conventionnelle ; objectifs initiaux des agriculteurs ; territoires…) puis s'est attaché à décrire des trajectoires d'exploitations en identifiant les enjeux stratégiques aux différentes étapes de leur parcours et la combinaison des leviers mobilisés pour aboutir à un équilibre social et économique ;
- décrit des formes innovantes d'organisation susceptibles d'être porteuses de solutions « travail » ;
- capitalisé sur les leviers / solutions pour améliorer le travail dans les exploitations ;
- co-construit une méthode pour mieux accompagner l'organisation du travail dans les projets des agriculteurs en circuits courts avec, entre autres, une démarche de questionnement et d'accompagnement adaptée aux circuits courts ;
- permis une montée en compétences des accompagnants des agriculteurs sur la thématique de l'organisation du travail par la formation dispensée aux partenaires et par la capitalisation des acquis et des méthodes ;
- permis une montée en compétences des chercheurs, des enseignants et des têtes de réseau par une ouverture sur des expériences européennes, mais aussi par des échanges entre réseaux et des spécialistes du travail.

2. Les enjeux et les objectifs du projet

2.1 Des enjeux par rapport aux besoins des agriculteurs

Les circuits de commercialisation peuvent être définis en fonction du nombre d'intermédiaires entre l'agriculteur et le consommateur final (Figure 1). Certains opérateurs/auteurs rajoutent à cette définition une notion de distance et utilisent les termes de proximité ou de local. Sur une exploitation, il peut y avoir une combinaison de circuits courts et longs.

Les circuits courts contribuent aujourd'hui à l'attractivité du métier d'agriculteur et à redistribuer la valeur ajoutée le long de la chaîne en limitant les intermédiaires. Les gains en matière d'autonomie et de sens du métier (valoriser ses pratiques, développer des contacts avec les consommateurs) sont les premières sources de satisfaction déclarées des agriculteurs en circuits courts. **L'activité génère**

cependant une forte hausse du besoin en travail (quantité, charge mentale) **fréquemment sous-estimée par les porteurs de projets d'une activité en Circuits Courts** (CASDAR RCC, CERD *et al*, 2013). Cette hausse du besoin en travail a des conséquences négatives sur la rémunération horaire et plus globalement sur la pérennité des exploitations avec des **arrêts précoces dus à l'usure des exploitants**. Les 489 enquêtes du CASDAR Références Circuits Courts (RCC) montraient des effets filières marqués : les éleveurs laitiers subissent un niveau de travail d'astreinte élevée (traite, transformation), 37 % d'entre eux déplorent un déficit en main-d'œuvre et 28 % un déséquilibre vie professionnelle/vie privée, tandis que 78 % des maraîchers expriment des difficultés de gestion du travail (charge importante, organisation complexe). L'optimisation de l'équilibre « revenu X travail » favorisera le développement des exploitations existantes et des installations.

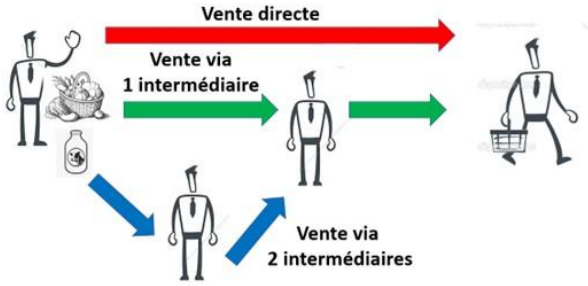


Figure 1 : Vous avez dit circuits courts ? ; Représentation de la commercialisation des produits en direct ou via 1 ou plusieurs intermédiaires (Source : ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et de la Pêche (MAAP) en avril 2009)

2.2. Des enjeux par rapport aux besoins sociétaux

Le recensement agricole de 2020 (Figure 2) indiquait que près d'un agriculteur sur quatre vend en circuits courts (Agreste, 2023). D'ici 2030, 10 % du marché alimentaire pourrait être réalisé en circuits courts (Philipon *et al*, 2017). Les citoyens/consommateurs attendent proximité, réassurance vis-à-vis des pratiques agricoles et de la qualité des produits. Ils expriment une confiance forte dans les produits issus des circuits courts (Bricas *et al*, 2013). Les CC participent en outre au développement des territoires, en favorisant l'accès à une alimentation de qualité et en maintenant les paysages agricoles (Chiffoleau et Prevost, 2012). Les pouvoirs publics et collectivités, à différentes échelles (région, départements, villes, pays…), se mobilisent pour l'approvisionnement de la restauration collective par le biais de circuits courts (Le Velly et Brechet, 2011) et ainsi développer activités et emplois sur leurs territoires. La loi Egalim votée le 2 octobre 2018, met en avant un approvisionnement des collectivités à hauteur de 50 % en produits représentant un mieux disant en matière de qualité des produits ou des modes de production vis-à-vis des impacts environnementaux. Pour répondre à cet accroissement annoncé de la demande en volume, le développement d'ateliers au sein d'exploitations existantes mais aussi des installations d'exploitants en circuits courts doit être poursuivi et accompagné pour être durables socialement.

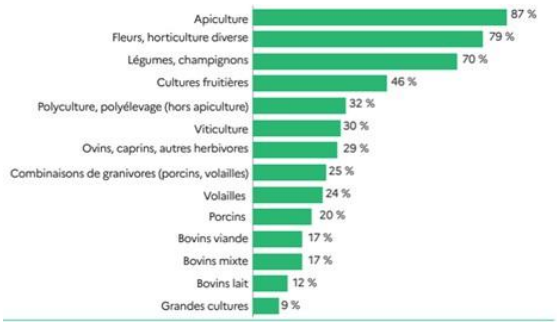


Figure 2 : Part d'exploitations vendant en circuits courts selon leur spécialisation en 2020. Source AGESTE, PRIMEUR n°5, mars 2023. En 2020, la vente en circuit court concerne presque **un quart des exploitations** de France métropolitaine et **plus de la moitié des exploitations conduites en bio**. Les apiculteurs, les horticulteurs et les maraîchers commercialisent plus souvent via ce mode. La vente directe à la ferme est le circuit court le plus répandu.

2.3. Un focus sur 3 filières très exigeantes en travail, chacune à leur manière

Le projet TRAC a ciblé 3 filières exigeantes en main-d'œuvre avec des questions organisationnelles complexes et couvrant une diversité de problématiques de travail liées aux caractéristiques différentes des produits à mettre en marché :

- **les filières laitières bovine et caprine** avec **astreinte quotidienne** pour la traite et la transformation du lait et une commercialisation hebdomadaire de produits frais. Des possibilités de report existent avec l'affinage des fromages ;
- **le maraîchage** avec une **planification** de la production, des récoltes et des ventes sensibles aux aléas climatiques, un intervalle entre récolte et consommation de produits frais faible, des gammes qui peuvent être larges (espèces et variétés). La transformation des produits pour permettre du report et une valorisation des surplus, est en cours de développement ;
- **les filières viande bovine et ovine** qui sont dépendantes de prestataires parfois éloignés (abattage, découpe et transformations) et avec des consommateurs demandeurs de produits de plus en plus prêts à l'emploi.

2.4. Un focus sur des territoires aux potentialités différentes

Les potentialités des territoires (maillage des outils de transformation, existence de prestataires, facilité à trouver de la main-d'œuvre formée, bassin de consommation, appui des collectivités territoriales…) **pèsent sur la façon dont les leviers vont pouvoir être mobilisés ;** « sur mon territoire ce que je souhaite faire est possible / facile (ou non) ? ». Nous analyserons ces contextes au regard du croisement de deux dimensions : **la densité des producteurs et l'éloignement / proximité des consommateurs** par rapport aux zones de productions. Quatre territoires représentant une diversité de situations ont été retenus :

- les Hauts de France (Z1) ;
- le grand Sud (Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur) (Z2) ;
- la Bretagne, les Pays-de-la-Loire et les départements de l'ex-région Poitou-Charentes (Z3) ;
- la région Bourgogne-Franche-Comté (Z4).

Afin de pouvoir initier des travaux en groupe avec les producteurs et de pouvoir concentrer les enquêtes sur quelques conseillers, au sein de ces vastes territoires, les petites zones présentées dans le tableau 1 ont été retenues.

Tableau 1 : Localisation des zones de travail et nombre d'enquête réalisées sur la zone par filière. Z1 : Les Hauts de France, Z2 : Grand Sud (Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur), Z3 : Bretagne, Pays-de-la-Loire et départements de l'ex-région Poitou-Charentes, Z4 : Bourgogne-Franche-Comté. BL : bovin lait, CL : caprin lait, OV : ovin viande, BV : bovin viande.

	Densité de producteurs forte	**Densité de producteurs faible Producteurs isolés**
Bassins consommations dynamiques proches	Z1 : Avesnois (5+lycée Lait BL et CL) Z3 : littoral breton - Pays de Vannes et de St Brieuc – (6 Lait BL et CL, 8 maraichages, 3 Viandes)	Z2 : Alpilles/Lubéron (4 Lait CL, 4 Viande OV) Z2 : Zone côtière Hérault (4 maraîchages)
Bassins consommations éloignés	Z4 : Morvan (viande -5 BV+ Lycée) Z3 : Poitou (10+lycée viande OV et BV)	Z2 : Lozère (2 Lait BL) Z3 : Mayenne-Sarthe (4 Lait BL, 3 maraîchages)

3. Les méthodes de travail utilisées dans TRAC

3.1. Animation et coordination des partenaires du projet

TRAC a associé 16 partenaires :

- Institut de l'Elevage (service Approche Sociale et Travail en Elevage) en tant que chef de file,

- **des membres du réseau Chambre d'Agriculture** (Bretagne, Normandie, Pays de la Loire)
- **des organismes de développement, membres du réseau des ONVAR** (Organisme National à Vocation Agricole et Rural) et/ou **InPACT** (Civam, Afipar, InterAfocg, GAB 56, MAB 22, ARVD)
- le Centre d'Etudes et de Ressources sur la Diversification (CERD),
- **des organismes de recherche** (INRAE, CIHEAM)
- **des centres de formation** (Lycées des 3 chênes, Les Sicaudières, Fontaines Sud-Bourgogne)

La diversité et la richesse du partenariat constituent l'un des points forts du projet. Pouvoir travailler avec les membres des 2 réseaux de développement a permis un enrichissement mutuel et surtout représente un point fort pour la diffusion et la valorisation des résultats.

L'enjeu a été de fédérer les partenaires pour organiser et suivre l'avancement du projet. L'animation s'est appuyée sur un groupe opérationnel de suivi (GOS) réuni bimensuellement et comprenant les responsables d'actions. Les échanges portaient sur l'avancement des travaux et les difficultés rencontrées. Les comités de pilotage ont réuni l'ensemble des partenaires pour restituer les résultats au fur et à mesure de leur avancement et participer à la co-construction des actions. Temps forts du projet, ces rencontres ont permis de créer convivialité et dynamique collective, de favoriser l'appropriation des résultats et de renforcer la transversalité entre actions. Des groupes de travail en charge des différentes tâches se sont par ailleurs réunis tout au long du projet selon les besoins.

Le partenariat du projet s'est avéré solide avec des partenaires impliqués qui avaient à cœur de participer à l'effort commun et de s'organiser pour être « dans les temps » pour le retour de leurs travaux. Les groupe de pilotage des actions ont fonctionné de façon autonome. Les liens et la confiance entre partenaires étaient suffisamment forts pour que les interactions aient été nombreuses.

Autre temps fort du projet et facteur de cohésion du groupe, une formation en début de projet conduite par Maryline MALLOT, ergonome au cabinet MB2 conseil, a été le vecteur d'une culture commune pour les partenaires. Après quelques apports théoriques : travail réel/travail prescrit, les déterminants du travail et leurs particularités pour les producteurs en circuits courts (contacts avec les consommateurs, …) des exercices de mise en situation ont permis à chacun de s'approprier ces notions, de mesurer les risques d'analyser la situation au travers de sa propre rationalité. Un atelier sur les conduites d'entretien sur les séquences de travail a permis de toucher du doigt la nécessité de s'intéresser aux variations des situations et d'aller au-delà du premier discours. Pour interroger l'organisation du travail, les évènements énoncés dans l'historique de l'activité circuits courts sont de bonnes portes d'entrée.

3.2. Méthode d'approche et hypothèses

Les déterminants du travail (ressources mobilisées, organisations, résultats techniques et économiques, effets sur les personnes) et les solutions s'inscrivent dans une dimension temporelle qui influe fortement sur la mise en œuvre et l'articulation, des évolutions à l'existant. Cela motive le choix méthodologique de produire des résultats sous forme de trajectoire en caractérisant les situations de travail. **Une situation de travail englobe les activités réalisées et leur contexte, soit les ressources mobilisées, matérielles et immatérielles, humaines, les coopérations, horizontales et verticales, les process mis en œuvre, les résultats en termes de performances (techniques, économiques…) et les effets sur les personnes engagées dans le collectif de travail** (Amalberti, 2004).

Pour l'approche trajectoire, nous avons réalisé des analyses rétrospectives focalisées sur des évènements (Moulin *et al*, 2004 and 2008 ; Begon *et al*, 2009 ; Tasset *et al*, 2009 ; Sabourin *et al*, 2004). L'objectif de ce type de méthode est de construire un cadre d'analyse reliant les processus de changements et les modifications de leur environnement au sein des trajectoires des exploitations.

Dans notre analyse, nous avons cherché à repérer les leviers ayant fait évoluer l'organisation du travail. Ces derniers impactent la structure globale de l'exploitation, son fonctionnement et interagissent entre eux. Pour les cerner, nous avons investigué en particulier les dimensions que sont :

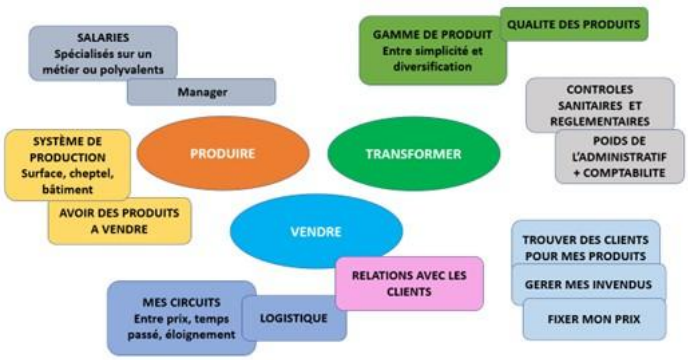
- les collectifs de travail (seul, couple, avec salarié(s) ou bénévole(s)…) et leurs modalités d'organisation (spécialisation, délégation…) ;
- les façons de produire (type de conduites en élevage, itinéraires techniques…) ;
- les outils (au sens large) et les investissements dans la transformation, la gestion, la commercialisation...
- les modes de mise en marché, gamme de produits, circuits de commercialisation, prix, logistique...

3.3. Des enquêtes pour décrire les trajectoires

Une enquête auprès de 60 agriculteurs en circuits courts a été mise en place.

Un questionnaire valorisant les acquis du programme CASDAR ORGUE (Organisation du travail dans les grandes exploitations laitières) et ceux des partenaires sur les circuits courts a été conçu. Celui-ci permettait **d'explorer l'ensemble des dimensions d'une exploitation en circuits courts avec leurs interactions spatiales et temporelles** (Figures 3 et 4). A partir du descriptif de la situation au jour de l'enquête, le questionnaire faisait également le point sur les évolutions, leur déclencheur, les solutions mises en œuvre, les adaptations nécessaires…

L'enquête combinait deux modes d'investigations : des questions fermées pour caractériser l'exploitation, la main-d'œuvre, l'organisation du travail et décrire la trajectoire à partir de données factuelles ; ainsi que des questions ouvertes pour recueillir des informations diversifiées et favoriser l'expression de l'agriculteur sur son vécu lors de périodes clés d'évolution de son système, sur la vie du collectif de travail, sur son appréciation globale et ressentis de ses conditions de travail et sur ses projets.



Produire, transformer, vendre avec pour chacune de ces dimensions des choix stratégiques à opérer, des interactions entre activités à gérer. Les évolutions sur une de ces dimensions vont impacter les autres et conduire à des ajustements et à la recherche d'un nouvel équilibre.

Figure 3 : Les multiples dimensions du travail en circuits courts. Être producteur en circuits courts, c'est gérer 3 métiers.

Figure 4 : La fleur de TRAC, illustration des multiples dimensions du travail en circuits courts et de sa complexité



Des formations au guide d'entretien (contenu et modalités de réalisation) ont été proposées aux enquêteurs. Après la réalisation de la première enquête, des « debriefings » ont été proposés. Chacun a pu faire part des difficultés et interrogations

rencontrées. Des améliorations et précisions ont été apportées pour faciliter et harmoniser le recueil d'informations.

Sur l'échantillonnage, il était primordial de viser la diversité tout en écartant les situations extrêmes (situations économiques très dégradées, un départ non anticipé de main d'œuvre trop récent (situation de crise possible), des exploitations très diversifiées…).

Quelques principes ont été posés, certains étant connectés à des déterminants influençant l'organisation du travail, puis affinés au niveau régional et par filière lors de groupes de travail. Il s'agissait d'enquêter des structures présentant les caractéristiques suivantes :

- expérience en circuits-courts > 3 ans. Souhait de travailler sur des exploitations qui ont un peu expérimenté et stabilisé leur fonctionnement et qui sont en capacité à parler de leur situation et organisation passée et présente d'expérience en circuits courts ;
- un collectif de main-d'œuvre diversifié en nombre. Souhait d'avoir des collectifs de moins de 2 UMO (Unité de Main d'œuvre), entre 2 et 3 UMO et plus de 3 UMO. Chaque structure avait pour consigne de recruter dans au moins 2 types de dimensions de collectif ;
- gamme de produits et circuits de commercialisation. Souhait de couvrir la diversité, par exemple, proposer des exploitations très spécialisées sur un circuit (80 % des volumes écoulés par un seul canal) et des exploitations combinant plusieurs canaux ;
- transformation pour les ateliers viande (prestataire, atelier individuel ou partagé) et en maraichage ;
- spécialisation sur l'activité circuits courts. Viser au moins 25 % de produits commercialisés en circuits courts.

3.4. Des enquêtes auprès des accompagnants des circuits courts

Les accompagnants des agriculteurs en circuits courts sont sollicités sur de multiples dimensions du projet des agriculteurs. Une enquête en ligne leur a été proposée pour repérer d'une part les sollicitations des agriculteurs et d'autre part les champs sur lesquels ils se sentent en capacité de répondre et ceux sur lesquels ils sont moins à l'aise. Autant de points qu'il était important de repérer pour proposer des formations, des repères, des échanges de pratiques entre accompagnants.

3.5. Des accompagnements de projets avec une méthode co-construite

Au cours du projet, des conseillers, des accompagnateurs aux profils variés, mais tous non spécialistes du travail ont accompagné 10 fermes volontaires (dont les 3 fermes des lycées partenaires). Les sujets traités étaient variés. Les conseillers avaient la possibilité de faire intervenir un intervenant extérieur (ergonome, spécialiste RH, …). La méthode d'accompagnement adoptée insistait sur la reformulation du questionnement de l'agriculteur et sur la prise de recul. Une fiche présentant les principaux enseignements tant du point de vue de l'agriculteur accompagné que de celui de l'accompagnant ainsi que les étapes de l'accompagnement sous forme d'une frise chronologique a été produite pour chacune des fermes. Ces accompagnements ont permis de dégager 5 thématiques du travail des exploitations en circuits courts :

- choix stratégique : place de l'atelier circuits courts au regard du travail ;
- organisation et répartition des tâches et des responsabilités ;
- pratique du management, gestion des ressources humaines ;
- agencement, équipement, outils, maintenance, ergonomie en transformation et pénibilité ;

- charge mentale.

3.6. Des projets dans un cadre scolaire, autour de la création d'une vidéo sur le travail en circuits courts pour sensibiliser les étudiants aux questions du travail

Trois groupes d'élèves des trois lycées partenaires ont réfléchi avec leurs enseignants sur cette liaison circuit-court et travail, notamment à partir de ce qu'ils vivent en stage dans des exploitations en circuits courts et de la situation connue des exploitations agricoles de leurs lycées. Chaque groupe a construit une activité pédagogique et produit une vidéo (scenario, messages clés, recherche du prestataire, tournage, ...) dans une optique de sensibilisation à ces thématiques. Les vidéos ont pris des formes différentes (compréhension du sujet et visée pédagogique ou diagnostic et accompagnement de projet pour résoudre des difficultés dans le fonctionnement des activités de transformation à la ferme et commercialisation).

3.7. Une boite à outils regroupant l'ensemble des productions du projet

Le travail s'est appuyé sur l'identification des problématiques à traiter, le recensement, la caractérisation et l'évaluation d'outils et de méthodes existantes (Chauvat *et al.*, 2009 ; Béguin, 2011) puis sur leur articulation sous forme d'une démarche modulaire (Figure 5).



Figure 5 : Les principaux livrables du projet TRAC

4. Une grande variété de trajectoires

4.1. Pourquoi utiliser les trajectoires d'évolution d'exploitations agricoles dans une étude sur l'organisation du travail ?

Les trajectoires d'évolution d'exploitations agricoles sont un outil pour étudier le fonctionnement des exploitations à long terme. Cet outil permet de rendre compte des changements qui s'opèrent dans les exploitations, des éléments de contexte et d'objectifs sous-jacents à ces changements et de leurs effets à différents pas de temps. Cet outil permet ainsi de révéler les « chemins » pris par les exploitations pour se maintenir sur le long terme ainsi que les processus à l'œuvre. Dans le cadre du projet TRAC, les trajectoires de 60 exploitations[19] impliquées dans des circuits courts de commercialisation ont été reconstituées à partir d'enquêtes.

Ces trajectoires sont décrites à partir des éléments de contexte et des grands traits de l'exploitation (Figure 6) :

[19] Ces exploitations couvrent 5 filières végétales et animales et 4 territoires contrastés en termes de densité de producteurs et de proximité aux consommateurs.

- les grands évènements extérieurs, induisant des changements ;
- les grands traits de la structure agricole et leurs évolutions : surfaces, nombre d'animaux, bâtiments… ;
- le collectif de travail avec les effectifs, mais aussi l'organisation (ex : polyvalence pour l'affectation des tâches) ;
- la gamme de produits ;
- les débouchés ;
- les équipements de transformation.

Ces éléments ont été décrits sur le long terme, c'est-à-dire depuis l'installation du gérant jusqu'à la date de l'enquête (en incluant aussi les projections envisagées). Par ailleurs, des étapes correspondant à des changements clefs identifiés par la personne enquêtée ont été approfondies pour mettre en avant en particulier les circonstances et raisons du changement, les éléments de contexte, l'appréciation du changement, les impacts et effets sur l'organisation du travail, les effets sur les autres traits de l'exploitation, les modifications, leviers et adaptations mises en œuvre.

Afin que ces trajectoires permettent de comprendre comment s'organise le travail au regard des enjeux de mise en marché des produits en circuits courts, nous proposons une double entrée sur le long terme :

- une représentation graphique des évolutions des grands traits de l'exploitation ;
- une représentation graphique de l'enchaînement logique de ces évolutions construit sur la même temporalité : cet outil visuel vise à représenter de façon systémique et logique les différents choix effectués au cours de la trajectoire de l'exploitation ainsi que les raisons de ses choix et leurs effets ; cette deuxième entrée reprend aussi les étapes clefs identifiées lors des enquêtes.

Les trajectoires étudiées dans le cadre du projet TRAC sont aussi variées au démarrage de l'activité (reprise de ferme, création d'activité) que dans les formes que prennent ces trajectoires au fil des ans (sachant que le recul peut être plus ou moins important selon les exploitations). **Cette diversité montre qu'il n'y a pas de « recette toute faite » pour bien gérer sa trajectoire en circuits courts mais qu'il existe tout autant de trajectoires que d'histoires, de personnes, de fermes**… Ces évolutions variées, et les stratégies et choix sous-jacents, conduisent à des situations actuelles tout aussi variées avec des degrés de satisfaction également variés.

La diversité des trajectoires étudiées porte sur les situations initiales : créations d'exploitations agricoles (très fréquentes dans les exploitations caprines de la zone sud et en maraîchage) vs reprise, exploitations avec peu d'antériorité vs une forte antériorité… La diversité porte également sur la situation au moment de l'enquête. Le poids de la vente en circuits courts dans l'organisation de l'exploitation est ainsi variable : certaines exploitations sont totalement orientées vers les circuits courts quand d'autres se caractérisent par une complémentarité entre circuits courts et longs, notamment en maraîchage ou en bovin lait. Les exploitations étudiées se distinguent aussi par les différents ateliers présents (ex : maraîchage et grandes cultures).

Les trajectoires diffèrent enfin par leurs dynamiques. Dans certaines trajectoires, la situation initiale et la situation au moment de l'enquête sont très proches en termes de cohérence, ce qui permet de supposer que le projet de l'exploitation a été calibré en phase avec les objectifs du gérant dès le départ ou que ses objectifs ont peu évolué. D'autres trajectoires à l'inverse se caractérisent par de nombreux ajustements ou par des ruptures significatives et permettent de mettre en lumière des processus d'évolution sur le long terme.

L'étude transversale de ces trajectoires et de leurs moments-clefs est ainsi riche d'enseignement concernant les questions à se poser dans le cadre d'un projet d'activité ou d'une activité en circuits courts, les points d'attention à avoir en tête pour les producteurs et les professionnels qui les accompagnent.

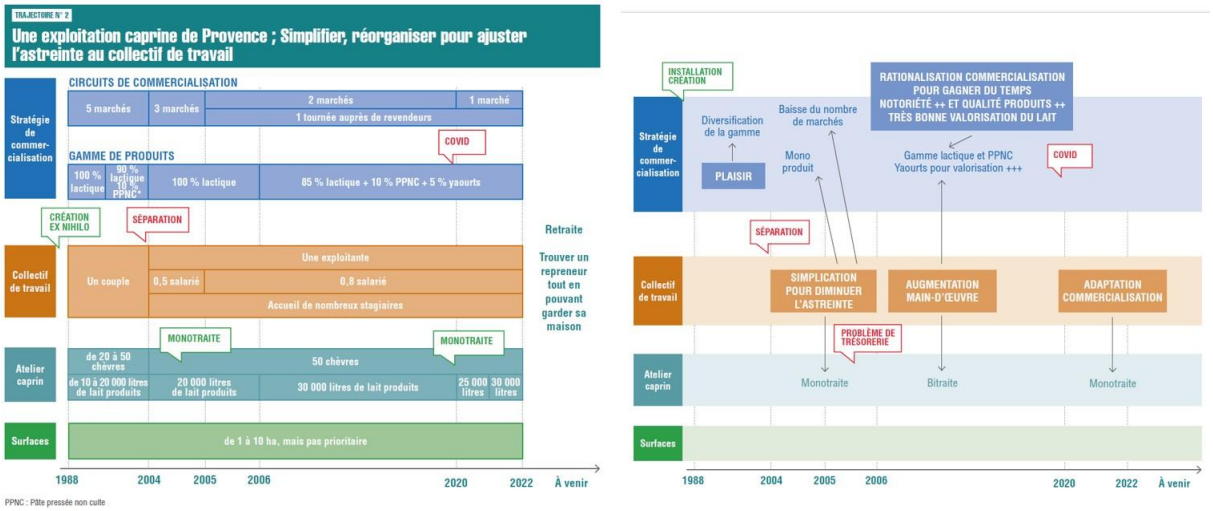


Figure 6 : Exemple de représentation d'une trajectoire dans une exploitation caprine de Provence ; Simplifier, réorganiser pour ajuster l'astreinte au collectif de travail.

4.2. Quelques enseignements de l'analyse transversale des trajectoires

4.2.1. La ferme vue comme un système : penser les stratégies de commercialisation en cohérence avec les choix de production

L'analyse transversale du fonctionnement de la soixantaine d'exploitations enquêtées montre que **développer l'activité de vente en circuit court, c'est en réalité remettre en question en profondeur le système d'exploitation**.

Ainsi, dans plusieurs cas, **de nouveaux choix techniques sont posés pour viser l'expression de certaines dimensions de la qualité des produits**. Nous observons des exemples en production allaitante où des éleveurs recherchent l'amélioration des caractéristiques commerciales des carcasses et/ou organoleptiques de la viande. Deux exploitations ont ainsi réalisé des choix structurants en matière de sélection génétique telle l'exploitation 68 (Bovins Viande-Poitou-Charente-8) où le gérant a investi dans des taureaux issus du herd book charolais pour « améliorer les caractéristiques phénotypiques et bouchères des animaux », ou l'exploitation 40 (Bovins Viande-Poitou-Charente-5) qui choisit la race Salers, entre autres, pour le goût de la viande.

La recherche d'une certaine saisonnalité des produits ou au contraire, d'une répartition de la production, constante dans le temps, peut conduire également à faire des choix techniques structurants, et parfois à l'adoption de modes de conduite plus complexes. Ainsi, un éleveur bovin allaitant a fait le choix de l'insémination artificielle pour maîtriser la reproduction de ses vaches. Citons également en exemple le cas de l'exploitation 9 (Bovins Viande-Poitou-Charente-1), qui, avec le développement des ventes en circuits courts en 2019, par l'adjonction, à leur débouché principal (i.e. un magasin de producteurs situé à 20 km de leur exploitation), de nouveaux points de vente comme des marchés et des commerces de proximité, font le choix de deux périodes de vêlages au lieu d'une, avec quatre vaches allaitantes mettant bas en dehors de ces périodes. Cette organisation de la reproduction permet d'étaler la production de viande sur l'année, mais complexifie le travail. Dans ce cas-ci, la retraite du père, programmée pour les mois suivant l'enquête, met en tension cette organisation et conduit les éleveurs à remettre en cause leur mode de mise en marché, s'interrogeant pour une reprise du circuit long pour tout ou partie de leurs produits. De la même manière, en maraîchage, pour les 12

exploitations enquêtées construisant plus de 85 % de leur chiffre d'affaires par la vente en circuit court, le nombre d'espèces cultivées se porte souvent au-delà de 30, alors que les deux exploitations élaborant un chiffre d'affaires en comptant peu sur les circuits courts (moins de 15 %) cultivent moins de 15 espèces. Les gérants de l'exploitation 24 (Maraichage-Pays de Loire-1) expliquent ainsi avoir « construit leur gamme en ayant la volonté d'avoir la gamme la plus diversifiée possible, en offrant de la variété en été et aussi en hiver ».

Néanmoins, c'est **plutôt une simplification des conduites techniques** qui s'observe **avec l'adoption des circuits courts**. A noter que, si ces choix techniques sont pensés au regard des problématiques de travail, ils ont aussi pour raison d'être, nous l'avons vu, la recherche d'une certaine qualité pour les produits (choix du type génétique ou de l'herbe en particulier). En production allaitante, les choix de simplification technique relevés les plus récurrents tiennent :

- aux choix génétiques, de races plus rustiques (Aubrac ou Salers par exemple), pour faciliter les vêlages (Exploitations 20 - BV-OV-Bourgogne-2 et 40 - BV-Poitou-Charente-5) ;
- en cohérence avec la recherche d'une meilleure valorisation de l'herbe (exploitation 40 - BV-Poitou-Charente-5). Deux exploitations sur 18 ont diminué le chargement et plusieurs exploitations envisagent de le faire. Quatre exploitations ont organisé ou organisent une transition vers un système plus herbager et quatre ont mis en place un pâturage tournant. Cet ensemble d'exploitations cherchent à valoriser au maximum la pousse de l'herbe. Il s'agit de « Lâcher pas tard, pour faire manger » et optimiser la pousse de l'herbe ;
- la répartition des vêlages est la troisième dimension réfléchie en cohérence avec le mode de mise en marché. Etalées, dans certains cas, nous l'avons vu, pour pouvoir répartir les ventes, les mises-bas peuvent être également groupées, en particulier dans les élevages allaitants commercialisant de faibles quantités en circuits courts ;
- la quatrième dimension technique impactée par le choix de la vente en circuit court correspond au niveau de mécanisation de la conduite alimentaire du troupeau. Dans toutes les exploitations bovines allaitantes enquêtées, les éleveurs utilisent une distributrice et plus de la moitié ont investi dans un bol mélangeur, tel l'éleveur 59 (BV-Bourgogne-7) qui prépare ainsi ces rations pour deux jours. En production laitière, le tapis de distribution s'est généralisé. Enfin, dans cette dernière production, et en particulier en caprin lait, certains éleveurs font le choix de la monotraite pour tout ou partie de la lactation. Ce choix technique entraîne une baisse de la production laitière mais donne de la souplesse, d'autant plus que le retour à la bitraite est possible sans dommage !

A l'inverse, dans certains cas d'exploitations maraîchères, en bovins/caprins laitiers ou en bovins allaitants, **les agriculteurs simplifient plutôt leur gamme de produits et/ou leurs circuits de distribution pour décharger leur organisation du travail**. Cette « sobriété commerciale » peut aller de pair avec une simplification du fonctionnement technique de l'exploitation. Citons le cas de cette éleveuse de chèvres (Cap-PACA-1 // trajectoire 2) qui recentre sa production sur un seul process, arrêtant la production de pâtes pressées, pour limiter la charge de travail, tout en faisant le choix de la monotraite. Citons également le cas de l'éleveur 45 (BL-Occitanie-1) qui structure sa gamme en circuits courts autour d'un seul fromage avec quatre types d'affinage. En parallèle, ces éleveurs spécialisent leur exploitation, arrêtant les bovins allaitants et la production de poulets. Ils simplifient également la conduite de leurs vaches laitières en arrêtant l'ensilage d'herbe, se concentrant sur du foin séché en grange et en investissement dans une mélangeuse, puis un tapis de distribution.

Enfin, citons la ferme 77 (Mar-Pays de Loire-3 // trajectoire 1) qui, après plusieurs années de commercialisation auprès de plusieurs magasins bio et d'une AMAP et après une année difficile, cesse de vendre en demi-gros entre avril à juin pour se concentrer sur la production de légumes, et simplifie sa gamme, se concentrant sur une dizaine d'espèces considérées comme « rentables ».

Notre approche, associant analyse diachronique et logique, montre les cohérences des ensembles de choix faits par les agriculteurs qui tendent à simplifier leur conduite technique pour dégager du temps pour la transformation et la commercialisation, mais aussi les compromis et ajustements effectués dans le temps. C'est le cas de l'exploitation 38 (BV-Poitou-Charente-3// trajectoire 3), spécialisée en production allaitante. Après l'arrêt des brebis en 2005, l'éleveur fait le choix de passer progressivement, entre 2013 et 2019, au « tout herbe ». Il arrête ainsi la voie humide de conservation des fourrages, avec en particulier la diminution puis l'arrêt du maïs ensilage, la suppression de l'enrubannage et l'investissement dans un séchage en grange en 2019-2020. Mais dans cette exploitation, une seule période de mises-bas est organisée à l'automne, pour des raisons de simplicité du point de vue sanitaire.

Certains agriculteurs ont fait **le choix de l'agriculture biologique**, mais ce choix, s'il conduit à concevoir un fonctionnement technique particulier, n'est généralement pas pensé pour la recherche d'une plus-value (exploitation 45 - BL-Occitanie-1 // trajectoire 4). Pour certains, c'est même une vigilance à avoir : il s'agit d'abord de convertir l'exploitation en agriculture biologique puis de construire son mode de mise en marché en circuits courts, ce qui permet d'éviter de répercuter de manière évidente à ses clients le surcoût lié à la conversion. Par ailleurs, en maraîchage, le choix de l'agriculture biologique, demande d'être capable d'anticiper les évènements sanitaires. La mise en marché en circuits courts, associée la plupart du temps à une grande diversité spécifique, complexifie cette anticipation, pouvant provoquer des situations problématiques.

L'importance des circuits courts dans la stratégie de commercialisation dépend en partie des orientations de production. Ainsi, en production de lait de vache comme en maraichage, l'association des circuits longs et courts prévaut. Dans toutes les autres productions, le 100 % circuit-court existe de manière plus prégnante.

4.2.2 Vendre en circuit court impose de faire des choix pour des raisons de travail

L'analyse transversale du fonctionnement des exploitations enquêtées montre que **les choix de produits et surtout les choix des circuits sont réfléchis au regard d'un équilibre entre des opportunités existantes sur le territoire, des contraintes d'organisation du travail et des motivations personnelles de chacun des travailleurs, des possibilités et contraintes logistiques ainsi que de la rentabilité associée**.

Bien connaître son marché, c'est-à-dire, le maillage territorial, les caractéristiques des différents points de vente, ainsi que la répartition temporelle de la demande, s'avère essentiel. Ainsi, les exploitations bretonnes de notre échantillon soulignent l'importance de la saisonnalité de la demande, liée à l'afflux touristique estival et pendant les petites vacances scolaires. Tel exploitant, commercialisant ses produits sur un marché breton, souligne « *ce sont des rapports à peu près de 1 à 8 [de chiffre d'affaires] entre les 3 mois creux et les 3 mois pleins* ». Les répercussions sur la planification de la production (avoir le bon nombre de salades au bon moment, par exemple), mais aussi sur l'organisation du travail de mise en marché et sur les prix, sont importantes : « *on y va en fonction de l'affluence touristique donc chacune des périodes de vacances importantes* ».

La configuration du collectif du travail (son importance et ses caractéristiques**) impose également des choix pour la mise en marché des produits**, choix régulièrement réévalués. Un exemple de choix drastique s'observe pour l'exploitation 29 (BV-Bourgogne-3) où la maladie puis le départ de l'associée implique en 2018 l'arrêt de la vente en circuits courts. Cette dernière n'est reprise qu'en petit volume en 2020 avec l'arrivée sur la ferme du fils dans le cadre de son BTS en alternance.

Le gérant de l'exploitation 77 (Mar-Pays de Loire-3// trajectoire 1) réfléchit également à la gestion de la motivation de ses salariés en organisant un équilibre entre vente en demi-gros et vente en direct, équilibre qui se répercute sur l'organisation du travail au champ, évitant une masse de travail répétitif. L'organisation hebdomadaire du travail implique des choix pour la mise en marché des produits en

circuits courts. Ainsi, sur la ferme 74 (Mar-Bretagne-4), l'exploitante a fait un test sur un 4ème marché le lundi qu'elle a arrêté n'ayant plus assez de produit après les ventes du dimanche, ce qui lui aurait demandé de récolter en plus avant d'aller sur ce marché.

Une fois la vente en circuits courts bien lancée, il s'agit d'évaluer régulièrement les coûts de revient par produit et par point de vente afin d'en évaluer la rentabilité. Ce type d'évaluation permet de recentrer les ventes sur les circuits (ou les produits) les plus rentables et d'éventuellement abandonner les moins rentables et ainsi dégager du temps de travail pour autre chose et de gagner en efficacité. C'est le cas de l'exploitation 86 (Mar-Bretagne-6) qui, en, 2015 comptait 5 points de vente avec un chiffre d'affaires d'un peu moins de 2 000 euros par point de vente. En 2021, la suppression des points de vente les moins rentables, associée à une diversification de la gamme et à une réflexion sur les prix, a conduit à un maintien de 3 points de vente, avec 13 500 euros de chiffre d'affaires pour chacun. Les agriculteurs de l'exploitation 92 (Mar-OV-Bretagne-8) ont commencé par vendre en AMAP, à la ferme et sur un site de commande en ligne collectif. Rapidement, les associés suppriment les débouchés les moins efficients. Le site de commande en ligne est ainsi fermé, alors que l'AMAP moins efficiente que le magasin à la ferme est conservé, mais réduite : elle permet en effet de faire connaitre la ferme et donc de développer la clientèle.

Pour ne pas perdre en rentabilité, à la croisée de la configuration du marché et de celle de l'exploitation agricole, **rationaliser la logistique s'avère essentiel**. Ce sont l'organisation des tournées, la préparation des commandes, en particulier, qu'il est ainsi indispensable de prendre en compte. Sur l'exploitation 44 (Mar-Bretagne-1), les exploitants ont testé plusieurs méthodes de préparation des paniers pour les AMAP : préparation des paniers en avance (très chronophage), livraison en vrac avec conditionnement sur place après pesée par les AMAPiens (« *Mais le relationnel n'allait pas car on n'avait pas le temps de parler et on était obligé de fliquer les amapiens lorsqu'ils pesaient* ») puis pesée par les exploitants. Lors de la crise de la covid-19, ces agriculteurs ont dû tout mettre en sac, sans laisser le choix aux clients des produits dans les sacs. Ce fonctionnement ne leur plaisait pas non plus : « *Ce n'est pas rentable et confortable d'ensacher à l'avance* ». De même, tous les agriculteurs soulignent que la multiplicité des points de vente sécurise la commercialisation des produits mais complexifie la logistique et l'organisation du travail. Ainsi, par exemple, l'exploitation 78 (BL-Hauts de France-6) fournit une quarantaine de points de livraison dans un rayon de 80 km. Les associés travaillent environ 3 400 heures annuelles chacun, reconnaissants qu'ils sont pris dans ce qu'ils qualifient « d'*engrenage ».*

Cet équilibre, fragile, et en partie personnel, est conditionné par la capacité des agriculteurs à savoir refuser un point de vente, en particulier les points de vente qui sont éloignés et/ou susceptibles d'altérer la rentabilité. Des ajustements s'observent souvent dans les choix de commercialisation pour des raisons du travail. C'est bien une stratégie du pas à pas qui s'élabore pour ces agriculteurs.

4.2.3 Vendre en circuits courts : la stratégie du pas à pas

Le développement de la vente en circuits courts se fait généralement assez progressivement, s'inscrivant dans le long terme, sur plusieurs années.

Ainsi, en production allaitante, les exploitants débutent souvent la commercialisation en circuits courts par des volumes restreints principalement vendus en colis, réalisant la majorité de leur chiffre d'affaires à la ferme. C'est le cas de l'exploitation 9 (BV-Poitou-Charente) qui, avant 2017, faisait abattre une vache tous les deux mois, ou de la ferme 38 (BV-Poitou-Charente-3) avec une bête abattue par mois avant 2009. Avec l'augmentation des volumes (qui peut être plus ou moins rapide), les exploitants investissent dans un outil de transformation (parfois collectif), commencent à vendre au détail, diversifient leur type de produits (adjonction de viande de porc par exemple pour l'exploitation 9 (BV-Poitou-Charente) et élargissent leur circuit de commercialisation (vente à des marchés, des magasins de producteurs…). En parallèle, les agriculteurs font évoluer le fonctionnement de leur exploitation agricole.

En maraîchage, le même phénomène s'observe, avec la mise en place progressive d'une large gamme pour répondre à la demande clients et pour pouvoir proposer des légumes toute l'année. Ceci est vrai en particulier quand la part de vente en circuits courts est importante. Ainsi, pour l'exploitation 37 (Mar-Pays de Loire-2), « de 25 espèces cultivées à l'installation, on passe à une cinquantaine de variétés en 3 ans ». Cette diversification de la gamme se construit dans le temps en réponse à la demande des consommateurs.

Les agriculteurs adaptent régulièrement leur stratégie de commercialisation, sur le temps long, en combinant une recherche d'équilibre et des réponses, à des chocs ou à des opportunités qui s'ouvrent et qui se ferment. Cette adaptation permanente s'appuie sur une succession d'essais, de réussites ou d'erreurs. Un exemple d'adaptation marquée est celui de l'exploitation 14 (Cap-PACA-1 // Trajectoire 2). Au moment de son divorce, l'éleveur restreint les marchés (qui étaient au nombre de 5) à 3, se consacre aux lactiques, abandonnant la petite fraction de pâtes pressées non cuites, et adopte la monotraite. Si pendant près de 15 ans, embauchant un salarié à 80 %, cet exploitant fait repasser ses chèvres en bi-traite, et diversifie à nouveau sa gamme de fromages, le Covid est l'occasion de passer à nouveau en monotraite (le temps de la crise) et de transformer un des marchés en points de livraison, dans une organisation qui perdure après la crise.

De même, pour le gérant de l'exploitation 77 (Mar-Pays de Loire-3) rebondir après une crise nécessite une véritable « stratégie de rationalisation », à laquelle, nous pourrions ajouter l'importance des souplesses existantes et la capacité à mobiliser des ressources de tous ordres (réseaux personnels, financement…).

Le développement de la stratégie de commercialisation en circuits courts suit des temporalités différentes selon les exploitations. Il peut être fulgurant et il en est ainsi pour les éleveurs de l'exploitation 29 (BV-Bourgogne-3) qui avaient de grosses difficultés économiques et le souhait de s'autonomiser par rapport à la PAC. Ailleurs, ce développement peut être plus lent.

Dans certains cas, le démarrage de la vente en circuits courts coïncide avec l'installation, dans d'autres, il intervient plusieurs années après, succédant à une longue phase de mise en marché en circuit long. Tel l'exploitation 45 (BL-Occitanie-1) qui passe en circuits courts en 2003-2004, d'un coup, sur une partie de sa production 15 ans après l'installation du premier associé. La stratégie de commercialisation de fromages auprès d'une grande surface adoptée par les éleveurs s'appuie sur l'investissement dans un atelier de transformation à ce moment charnière.

La **phase d'installation est propice à des tests**, souvent de points/circuits de vente, tous azimuts. Cette phase est suivie d'une phase de « rationalisation », où ne sont conservés que les produits et les circuits les plus adaptés, i.e. les plus rentables, les plus aisés et les moins chronophages du point de vue du travail.

Dans ce pas à pas, une certaine dépendance au sentier s'observe. Une partie des choix effectués au cours du temps est révisable, mais tous ne le sont pas. Dans certains cas, les choix sont faits pour permettre souplesse et retour en arrière. C'est le cas de six exploitations en bovin viande enquêtées, qui travaillent avec un prestataire pour la découpe de viande, ce qui, pour certains, leur a permis de diminuer rapidement la vente en circuits courts quand cela est devenu nécessaire. C'est le cas de la ferme 35 (BV-Bourgogne-6) qui, au départ en retraite d'un des associés, a diminué les volumes vendus en circuits courts. En revanche, de hauts niveaux d'investissements (dans un atelier de transformation, par exemple) ne permettent pas toujours de revenir en arrière.

Dans l'établissement de cet équilibre, toujours à revoir, certaines modalités de vente sont étroitement liées. Si elle est interféconde du point de vue de la valorisation des produits, cette relation entre modalités de vente, rendue quasi obligatoire par la recherche de rentabilité peut complexifier sérieusement les situations de travail. Ainsi l'éleveur 57 (BV-Poitou-Charente-6) combine la vente de viande au détail à la ferme, la vente en colis et la vente à la restauration collective, qui, elle, ne prend

que quelques morceaux spécifiques en grande quantité, ce qui lui permet d'équilibrer les prix en fonction des circuits.

Enfin, nos enquêtes montrent que, dans certains cas, la stabilité de la stratégie de commercialisation observée ne veut pas dire « qui convient ».

4.2.4. Des choix de commercialisation qui influent et guident l'organisation du travail

D'une manière générale, les circuits de commercialisation ont un effet sur l'organisation du travail :

- leur multiplicité complexifie l'organisation du travail mais sécurise la commercialisation ;
- savoir faire arbitrer le choix de conserver ou non un circuit en fonction du volume écoulé, des prix pratiqués, du temps passé, de la distance à parcourir…

Trois points sont particulièrement à prendre en compte

1. **Vendre, c'est gérer une interaction spatiale.** Faire un marché, aller livrer ses produits… implique pour la personne qui le fait de quitter la ferme. Cette **interaction spatiale** (on ne peut pas être à 2 endroits à la fois !) induit une organisation du travail spécifique ces jours-là, soit **en interne** au collectif de travail, soit avec des **solutions externes**.
2. **Vendre c'est aussi s'organiser pour disposer de produits !**
3. **Savoir renoncer et/ou refuser des points de vente pour stabiliser l'organisation du travail.**

L'organisation du travail est aussi conditionnée par la capacité des agriculteurs à refuser des points de vente lorsqu'ils sont déjà au maximum de leur capacité de production.

5. Accompagner le travail en circuits courts

Les exploitations en circuits courts partagent de nombreuses problématiques travail avec leurs homologues des filières longues : charge de travail importante, pénibilité et risques liés à l'élevage, au matériel, aux cultures, difficulté à équilibrer vie privée/vie professionnelle ainsi que la propension à minimiser les capitaux humains au profit des contraintes économiques aboutissant parfois à des situations de rupture. **En ajoutant à la production agricole, l'activité de commercialisation et dans certains cas celle de transformation, les circuits courts ne font qu'amplifier les problématiques travail et la charge mentale pour les exploitants**. Les producteurs impliqués dans ce type de circuits de vente plébiscitent généralement le caractère gratifiant de ce métier : maîtrise du produit de bout en bout, métier de contact, retours clients valorisants, etc, mais au revers de la médaille : le travail est un vrai point d'achoppement. Souvent mal anticipé lors de l'installation ou amplifié par des résultats économiques insuffisants qui limitent les marges de manœuvre, il est une cause non négligeable d'échec.

Aborder cette question est complexe : au-delà du problème bien réel de la quantité de travail à effectuer, c'est par une analyse plus poussée des conditions opérationnelles de ce travail et par la prise en compte plus complexe des hommes et des femmes en place, de leur rôle, de leurs interactions que des solutions pourront émerger. Accompagner un agriculteur sur ce sujet est donc d'abord une affaire de posture pour **saisir la question dans toutes ces dimensions**.

Aborder le travail en circuits courts nécessite de surcroît d'appréhender un fonctionnement d'exploitation complexe avec différentes activités en interaction permanente : production, transformation, vente. Sachant que l'on croisera autant d'organisations que d'exploitations, tant les activités, les choix de fonctionnement, les ressources mobilisées sont différentes. Les fermes en circuits courts ont la particularité de combiner des activités de production agricole, de commercialisation et dans

certains cas de transformation. En découlent des problématiques spécifiques qu'il faut avoir en tête pour écouter et interroger le travail de façon pertinente dans ces fermes.

En circuits courts, la coordination des multiples activités du collectif de travail est une fonction à part entière du fait de l'interdépendance entre production, transformation et vente. Elle nécessite anticipation, planification et une bonne communication entre les personnes. Bien que cruciale, cette fonction « invisible », non identifiée en tant que telle peut représenter une charge mentale importante. D'autant que le recours fréquent au salariat nécessite aussi des compétences en management.

5.1. Le travail : différentes dimensions en interaction et divers moyens de les approcher

1. **Travailler engage le corps.**

Chacun le réalise lorsque se manifeste des douleurs à la suite de postures contraignantes, d'efforts prolongés, de répétition de gestes à un rythme soutenu, ou encore lorsqu'un accident, une maladie nous impose de prendre en compte une limite à nos capacités. Un tiers (accompagnant, ergonome) peut observer le corps au travail.

2. **Travailler engage aussi nos capacités mentales et cognitives.**

Il s'agit en particulier d'observer, écouter, ressentir, anticiper, mémoriser, traiter l'information, la restituer. Pour cette dimension, on ne peut pas deviner ce qui se passe dans le cerveau de la personne ! L'interroger à ce sujet sera donc nécessaire.

3. **Travailler engage la subjectivité.**

« On n'est pas des machines », chacun de nous peut dire ce qui lui plaît ou déplait dans son travail, s'il y trouve du sens ou pas. Sur cette dimension le repérage des tâches dont on ne veut pas se défaire constitue un point d'attention.

4. **Travailler engage des interactions sociales**

On travaille rarement seul. Même si l'autre est absent physiquement, un ou plusieurs autres (le client, le collègue, le partenaire…) peuvent être impliqués, avec leur cortège d'interactions sociales : collaborations, sentiment d'appartenance à un groupe professionnel, lutte pour le pouvoir…

5. **Sur le chemin des situations de travail et de leurs variabilités.**

Interroger un agriculteur sur la façon dont il réalise telle ou telle tâche et avoir comme réponse « *ça dépend… »* va mettre sur le chemin des infinies variations des situations de travail, qu'il va falloir décortiquer tant dans l'examen de la question à traiter que dans la palette de solutions à imaginer. Entre autres, il faudra s'interroger sur les capacités, compétences, expériences de chacun, les moyens matériels et immatériels mis à disposition pour réaliser l'activité, sur les résultats visés.

Enfin, au-delà de la dimension organisationnelle, les dimensions économiques et identitaires sont aussi en jeu (projet CASDAR 2010-2014 « le travail en trois dimensions »).

5.2. Gérant d'une exploitation en circuits courts ; multi-tâches forcément !

L'approche des situations de travail peut être de classer les activités en :

- **activités opérationnelles :** il s'agit d'exécuter une tâche, elle est facilement transférable à une autre personne, sous réserve de ses capacités et de sa formation, on peut s'y faire remplacer. Par exemple, sur un marché, le vendeur (le producteur, son salarié) installe le banc, accueille le client, le sert, encaisse le paiement. Ces activités engagent le court terme ;

- **activités tactiques :** il s'agit d'adapter la façon de faire aux situations de travail qui varient, en collectant les informations pertinentes. Par exemple, observant une fréquentation plus importante en fin de marché, un producteur peut choisir de renforcer son équipe de vente à partir de 11h. Ces activités engagent le court terme ou le moyen terme ;
- **activités stratégiques :** il s'agit d'intégrer l'ensemble des activités de la ferme. Par exemple, sur un marché en perte de vitesse, le producteur peut chercher à se réorienter sur un autre point de vente, s'en retirer à terme en ayant pris soin de repérer où s'implanter ailleurs.

Dans le projet TRAC, nous nous sommes particulièrement intéressés au **travail de gérant** d'une exploitation pratiquant les circuits courts. Le gérant d'une ferme en circuits courts combine des activités opérationnelles ; il est l'ouvrier qui met directement la main à la pâte pour des tâches quotidiennes ; des activités tactiques ; puisque c'est un travailleur qualifié qui sait intégrer les informations qu'il collecte au cours de ses activités pour les ajuster à la variabilité des situations ; et des activités stratégiques. En effet, il est le dirigeant qui intègre toutes les dimensions de la ferme, dans une dynamique temporelle pour prendre les décisions qui engagent l'entreprise sur le long terme. Selon la taille du collectif de travail, la proportion des activités opérationnelles, tactiques, stratégiques du ou des gérants varie. Il va être important d'identifier qui fait quoi, non pas de façon officielle et reconnue, mais dans la réalité des responsabilités assurées.

5.3. Le travail réel à mille lieux du travail prescrit

Lorsqu'un travailleur reçoit une consigne pour réaliser une tâche, ou lorsqu'il la formule pour lui-même, on parle de **travail prescrit** soit ce qu'il y a à faire avec des indications sur le mode opératoire. Ces indications, aussi précises qu'elles soient, ne correspondent pas au **travail réel (**Dejours et Molinier, 1994), auquel la personne au travail intègre ses propres limites et possibles, la prise en compte des imprévus *et al*éas. Ainsi, distribuer de l'eau à un lot de jeunes animaux au pré peut comprendre : la réparation d'une fuite sur le réseau d'adduction (détectée à cette occasion), l'observation d'un animal isolé (signe d'une maladie ?), un rythme d'exécution plus soutenu pour se libérer plus tôt avant une réunion… L'approche globale d'une ferme s'intéresse à l'ensemble du système d'exploitation, intégrant les finalités de l'exploitant et la dynamique du système. Elle néglige cependant les effets de l'activité sur l'homme et les boucles de rétroactions. Ce sont pourtant des pistes d'adaptation de l'organisation à prendre en compte et à exploiter d'autre part pour trouver des solutions. Les éléments constitutifs de l'organisation du travail sont multiples et complexes, ils interagissent entre eux. Les saisir dans leur intégralité peut être qualifié de mission impossible. Enrichir toutes interventions de la dimension travail sans lui donner forcément une place centrale, sera un plus sur la pertinence des réponses et leur acceptabilité.

5.4. Sur les fermes en circuits courts, 5 thèmes de travail au centre de la réflexion

Le projet TRAC a mis en situation des conseillers, accompagnateurs aux profils variés, non spécialistes du travail. Ils ont accompagné 10 fermes volontaires, ce qui a permis de dégager 5 thématiques sur le travail des exploitations en circuits courts. Ces thèmes sont apparus comme récurrents sur l'ensemble des accompagnements de projet. Déclinés avec des fiches leviers, ils permettent de cibler les axes de l'accompagnement :

- choix stratégique : place de l'atelier circuits courts au regard du travail ;
- organisation et répartition des tâches et des responsabilités ;
- pratique du management, gestion des ressources humaines ;
- agencement, équipement, outils, maintenance, ergonomie en transformation et pénibilité ;

- charge mentale.

En guise d'illustration, nous faisons le choix de présenter uniquement la fiche sur la charge mentale (Figure 7). Les autres fiches font partie du guide Accompagner le travail en circuits courts disponible sur le site de l'Idele (Institut de l'élevage).



Figure 7 : Fiches illustrant la problématique de la charge mentale

6. Conclusion et perspectives

Le projet TRAC est arrivé à son terme avec en point d'orgue son séminaire final qui s'est tenu en décembre 2023. **Son partenariat a constitué un atout majeur** ; la richesse des personnes qui le composaient, le partage des conceptions du métier de structures qui habituellement ne travaillent pas ensemble ; la démultiplication sur la diffusion au sein de deux réseaux de développement.

Malgré tout le chemin parcouru, il reste encore beaucoup de nouvelles voies à investiguer auprès des producteurs en circuits courts :

- les circuits courts contribuent à l'image, à l'attractivité de la profession au travers des connexions avec la société, les citoyens, les consommateurs… Une organisation du travail mal maitrisée peut conduire à des catastrophes économiques mais surtout humaines. Mettre en œuvre les moyens, les supports pour sensibiliser les porteurs de projets pour les aider à anticiper l'organisation du travail avant qu'il ne soit trop tard ;
- l'économie des exploitations en circuits courts est également un point clé qui peut permettre (ou pas) aux producteurs de disposer de leviers (investissement, embauche…) pour organiser son travail mais aussi disposer de temps pour prendre du recul. Un travail autour de la fixation des prix, de la rémunération de son travail parait central à mettre en œuvre ;
- gérer 3 métiers et leurs interactions spatiales et temporelles apporte beaucoup de complexité. Pour les accompagnants et conseillers, cela signifie de l'écoute, du temps pour identifier les vraies questions ; au-delà des premiers mots, aller sur les véritables maux.

LIEN VERS LE MINI SITE DU PROJET TRAC

Des liens vers des projets sur le travail

- RMT TRAVAIL EN AGRICULTURE
- CASDAR SOCIEL : Analyse de la durabilité sociale d'exploitations d'élevage et de leurs contributions à celles de leurs territoires

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs et/ou ID HAL des auteurs

Prénom NOM	N° Orcid	ID HAL	PersonID - HAL
Christine GUINAMARD			1551211
Jocelyn FAGON	0009-0008-9149-0776		958088

Marie-Odile NOZIERES-PETIT	0000-0001-8081-9662	marie-odile-nozieres-petit	1168590
Claire LESUR-DUMOULIN	0000-0003-1731-2476	clairelesur-dumoulin	1205109
Françoise MORIZOT-BRAUD			1024203
Laurence ROUHER			1097100

Contributions des auteurs

Prénom NOM	Taxonomie "crédit"
Christine GUINAMARD	1. Conceptualization - Lead 3. Formal Analysis 5. Investigation 7. Project Administration 8. Resources 10. Supervision 13. Writing - Original Draft - Lead 14. Writing - Review & Editing - Lead
Jocelyn FAGON	1. Conceptualization 3. Formal Analysis 5. Investigation 8. Resources 13. Writing - Original Draft 14. Writing - Review & Editing
Marie-Odile NOZIERES-PETIT	1. Conceptualization 3. Formal Analysis 5. Investigation 8. Resources 13. Writing - Original Draft 14. Writing - Review & Editing
Claire LESUR-DUMOULIN	1. Conceptualization 3. Formal Analysis 5. Investigation 8. Resources 13. Writing - Original Draft 14. Writing - Review & Editing
Françoise MORIZOT-BRAUD	1. Conceptualization 3. Formal Analysis 5. Investigation 8. Resources 13. Writing - Original Draft 14. Writing - Review & Editing
Laurence ROUHER	1. Conceptualization 3. Formal Analysis 5. Investigation 8. Resources 13. Writing - Original Draft 14. Writing - Review & Editing

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Projet réalisé avec la contribution financière du CASDAR du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Projet lauréat 2019 ; CASDAR Innovation et partenariat n°5931 TRAC

Références bibliographiques

ADEME ALIMENTATION, juin 2017. Les circuits courts de proximité,

AGRESTE PRIMEUR, n°5, 2023. Recensement agricole 2020 ; Commercialisation ; Près d'une exploitation sur quatre vend en circuit court

ALTER, 2005, L'innovation ordinaire, PUF

Amalberti R., 2004. De la gestion des erreurs à la gestion des risques. In Falzon P. Ergonomie, p 285-300, PUF

ANACT, 2012, mise à jour 2017. Prendre en compte les RPS dans le document unique, fiches méthode et outils

AUBRY C., BRESSOUD F. et PETIT C, janvier 2011, « Les circuits courts en agriculture revisitent-ils l'organisation du travail dans l'exploitation ? », In: Béguin P., Dedieu B., Sabourin E., dir, Le travail en agriculture : son organisation et ses valeurs face à l'innovation (p. 19-36). Paris, FRA : L'Harmattan

Begon M., Pailleux J.Y., Joly N., Lemery B., Dedieu B.,2009. Les chemins pour durer en élevage bovin laitier : diversité des logiques d'action sur le long terme en Ségala (Massif Central). Renc. Rech. Ruminants, 16 : 105-108

Bensehila H., 2020. Circuit court et durabilité. Les situations de travail en circuit court, Mémoire,

BLEZAT Consulting, CREDOC et Deloitte Développement Durable, 2016, Etude prospective sur les comportements alimentaires de demain,

BONNEFOY S. et BRAND C., 2014. Régulation politique et territorialisation du fait alimentaire : de l'agriculture à l'agri-alimentaire. Géocarrefour, 89/1-2, p. 95-103.

CERD, INRA, Institut de l'Elevage et Trame, Méthodes et approche économique transversale exploratoire de six familles de produits, 2013

CERD, INRA, Institut de l'Elevage et Trame, 2013. Impacts sociaux des circuits courts alimentaires sur les exploitations agricoles. Diversité des modèles et analyses croisées.

CERD, FNCIVAM, Institut de l'Elevage, TRAME, Performance environnementale des circuits courts, 2013.

CHIFFOLEAU Y. et PREVOST B., 2012, Les circuits courts, des innovations sociales pour une alimentation durable dans les territoires. Norois. Environnement, aménagement, société, 224, p. 7-20.

CHIFFOLEAU Y., MILLET AMRANI S., CANARD A., 2016. From short food supply chains to sustainable agriculture in urban food systems: which contribution of food democracy? Agriculture 6(4)

CHEYNS E., 2010, Nouvelles formes d'engagement autour du local. Portraits de paysans en «vente directe». In : ISDA 2010. Cirad-Inra-SupAgro, 17 p

DEDIEU B. et SERVIERE G., 2010. « Les modèles du travail en élevage : points de vue de zootechniciens des systèmes d'élevage », in BEGUIN P., DEDIEU B., SABOURNIN E. (Eds), Le travail en agriculture : son organisation et ses valeurs face à l'innovation, Paris, L'Harmattan, 155-169, 2010.

DEJOURS C., 2016. Situations du travail PUF, Revue française des affaires sociales 2016/4, pages 389 à 396

DUFOUR A. et. LANCIANO É, 2012, "Les circuits courts de commercialisation: un retour de l'acteur paysan?" Revue française de socio-Economie : 153-169.

InterAFOCG, 2007. Organiser son travail et gérer son temps sur les fermes, Educagri Editions,

Miles, M. B., & Huberman, A. M., 2003. Analyse des données qualitatives. De Boeck Supérieur

MSA, 2014. Bien vivre le métier d'agriculteur, dossier technique n°27

KLING EVEILLARD F., CERF M., CHAUVAT S., SABATTE N., 2012, Le travail, sujet intime et multifacette : premières recommandations pour l'aborder dans le conseil en élevage. In Numéro spécial, Travail en élevage. (Eds). Inra Prod.Anim.

LANCIANO E. et SALEILLES S., 2010. Le développement des circuits courts alimentaires : un nouveau souffle entrepreneurial dans l'agriculture?. In : Congrès International Francophone sur l'Entrepreneuriat et la PME.

LE VELLY R. et BRÉCHET JP., 2011, Le marché comme rencontre d'activités de régulation: initiatives et innovations dans l'approvisionnement bio et local de la restauration collective. Sociologie du travail, 53(4) p. 478-492.

G. Le Bahers, D. Paturel, M. Théodore, Alexandra Villarroel. ,2016. Métiers Circuits Courts : comprendre l'évolution des métiers des agriculteurs engagés dans les démarches de circuits courts pour mieux accompagner leur professionnalisation. *Innovations Agronomiques*, INRA, 49, pp.297-308.

LAISNEY C., 2016 « Les pratiques alimentaires en France : évolutions et tendances émergentes », Les cahiers de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme, n°173, novembre.

MORIZOT-BRAUD F. et BELLEC-GAUCHE A., 2016. Références sur les circuits courts, *Innovations Agronomiques* 49, 59-68.

Morel.K. 2016. « Viabilité des microfermes maraîchères biologiques. Une étude inductive combinant méthodes qualitatives et modélisation ». Sciences agricoles. Université Paris-Saclay.

MUNDLER P. et VALORGE F., 2015. Ateliers de transformation collectifs: enjeux et outils pour réussir. Educagri (Edts). 297p.

NOZIÈRES MO., 2014, La commercialisation des produits, source de flexibilité pour les éleveurs? - 2014. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro. 200p + annexes.

OLIVIER V. et COQUART D., 2010. « Les AMAP : une alternative socio-économique pour des petits producteurs locaux ? », Economie rurale. Agriculture, alimentations, territoires (318,319), 20-36.

PHILIPON P., CHIFFOLEAU, Y., WALLET F., HULOT N., 2017, Et si on mangeait local ? - Editions Quae

POLLAN Michael. 2014. Cooked, A Natural History of Tranformation. New York: Penguin Books 460 p.

RITZENTHALER A., 2016. Les circuits de distribution des produits alimentaires, Avis du Conseil Economique Social et Environnemental.

Pour citer cet article : Christine Guinamard, Jocelyn Fagon, Marie-Odile Nozieres-Petit, Claire Lesur-Dumoulin, Françoise Morizot-Braud, *et al.*. Travail en circuits courts, à la recherche d'équilibres. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp.398-420. 10.17180/ciag-2025-vol107-art29

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

J-DISTAS : construction d'un outil de calcul des jours disponibles pour les grandes cultures

Pascale METAIS[1], Nicolas ROGIER[1], Marine LACOSTE[2], Pierre DUL[3], Thomas LEBORGNE[3], Rémy DUVAL[3], Annie DUPARQUE[4], Damian MARTIN[4], Philippe BILLA[5], Mathieu LAMANDE[6], Carolina UGARTE[7]

[1] Arvalis, Biopole Clermont Limagne, 2 rue Henri Mondor, 63360 Saint Beauzire, France

[2] INRAE, Info&Sols, 45075, Orléans, France

[3] Institut Technique de la Betterave, 45 rue de Naples, 75008 Paris, France

[4] Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 Chaussée de Brunehaut, 80200 Estrées-Mons, France

[5] Chambre d'Agriculture de l'Oise, Rue Frère Gagne, 60021 Beauvais, France

[6] Université d'Aarhus, Département d'Agroécologie, Blichers Allé 20, 8830 Tjele, Danemark

[7] AGHYLE, UniLaSalle, SFR Condorcet FR CNRS 3417, 19, rue Pierre Waguet, 60000 Beauvais, France

Correspondance : p.metais@arvalis.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art30

Résumé

Dans un contexte d'évolution des agroéquipements et systèmes de culture, il est utile de disposer d'un outil de calcul des jours disponibles pour évaluer la faisabilité de systèmes de culture, optimiser leur gestion ou dimensionner le matériel agricole. Le projet J-DISTAS a l'ambition de construire cet outil en mobilisant les connaissances et modèles existants. Le calcul est décomposé par critères : travaillabilité du sol, traficabilité, conditions météo, maturité de la culture. A chaque critère est associé un indicateur et des seuils. Les résultats obtenus sont ensuite agrégés selon une pondération propre à chaque opération pour évaluer la disponibilité du jour ; le calcul est répété quotidiennement pour sommer le nombre de jours disponibles, et sur 20 ans pour connaitre la variabilité interannuelle. La précision de l'outil J-DISTAS est de 69 % pour le semis, 74 % pour le désherbage mécanique. Il est actuellement utilisé pour évaluer la faisabilité du déploiement de leviers et systèmes de cultures expérimentaux.

Mots-clés : travaillabilité, traficabilité, tassement, réussite des opérations culturales, modélisation

Abstract: J-DISTAS project: construction of a tool for calculation of available days in main crops

In a changing context of agricultural equipment and cultivation systems, it is useful to have a tool for calculating available days to assess the feasibility of cultivation systems, optimize their management or decide of the size of agricultural equipment. The J-DISTAS project aims to build this tool by mobilizing existing knowledge and models. The calculation is broken down by criteria: soil workability, soil trafficability, climatic conditions, crop maturity. Each criterion is associated with an indicator and thresholds. The results obtained are then aggregated, according to weighting depending on operations, to assess the availability of the day; the calculation is repeated daily to calculate the number of available days and over 20 years to know the interannual variability. The precision of the J-DISTAS tool is 69% for sowing, 74% for mechanical weeding. It is currently used to evaluate the possibilities of deploying experimental levers and cropping systems.

Keywords: soil workability, soil trafficability, soil compaction, field operation success, modelling

1. Introduction

L'agriculture doit répondre à de nombreux enjeux tels que la limitation des émissions de gaz à effet de serre, la réduction de l'usage de produits phytosanitaires et la préservation de la qualité des sols, le tout dans un contexte soumis à de nombreux aléas, qu'ils soient climatiques ou économiques. La transition agroécologique semble être une voie mais implique de faire évoluer en profondeur les pratiques et les systèmes de culture : réduction du travail du sol, développement du désherbage mécanique, diversification des cultures, etc. Or, pour qu'un système de culture soit multi-performant, il est nécessaire que chacune des opérations culturales puisse être réalisée au bon moment et dans des conditions favorables à la réussite de cette opération. La période permettant la réalisation d'une intervention est délimitée soit par d'autres interventions à réaliser soit par le stade phénologique de la culture ; à l'intérieur de cette période, seuls certains jours, appelés jours disponibles, remplissent les conditions agronomiques nécessaires à la réalisation de l'opération (Reboul et Maamoun, 1983). Un jour est disponible pour une opération donnée lorsqu'il est possible d'effectuer l'opération dans des conditions prédéfinies de réussite et tout en limant les dommages (Edwards *et al*., 2016), ce qui implique que le sol réponde à la double condition de traficabilité et travaillabilité (Edwards *et al*., 2016 ; Rounsevell, 1993). La traficabilité est définie comme la capacité du sol à supporter le passage des engins agricoles sans dégradation importante et/ou irréversible (Edwards *et al*., 2016 ; Müller *et al*., 2011 ; Rounsevell, 1993). La travaillabilité du sol traduit sa capacité à supporter le travail du sol (Müller *et al*., 2011) et à se fragmenter pour produire l'état structural attendu sans lissage ni tassement (Edwards *et al*., 2016 ; Rounsevell, 1993).

L'état hydrique et les propriétés du sol, notamment granulométrie, teneur en matière organique et densité apparente, impactent directement la travaillabilité (Edwards *et al*., 2016 ; Müller *et al*., 2011 ; Obour *et al*., 2017) et la résistance du sol à la déformation (Müller *et al*., 2011 ; Schjønning *et al*., 2023 ; Schjønning et Lamandé, 2020). Le matériel utilisé (poids, pneumatiques, pression de gonflage) détermine les contraintes exercées à l'interface sol-pneu (Keller, 2005 ; Schjønning *et al*., 2015a, 2008), puis leur propagation vers la profondeur en interaction avec la résistance du sol (Schjønning et Lamandé, 2020 ; Söhne, 1958, 1953). La disponibilité du jour étant largement dépendante de l'état hydrique du sol, elle est donc liée aux conditions météo des jours et semaines précédentes, et à la couverture du sol. En plus de la travaillabilité et de la traficabilité, d'autres critères spécifiques à certaines opérations peuvent s'ajouter pour mieux caractériser les conditions de réussite de l'opération culturale étudiée (Joannon *et al*., 2020). Par exemple, les conditions météo le jour de l'intervention ou dans les jours qui suivent impactent la réussite des opérations visant à détruire des adventices et repousses ou une culture intermédiaire (Justes *et al*., 2012).

Les récentes avancées des connaissances et de la modélisation ouvrent de nouvelles perspectives en matière de calcul des jours disponibles. Les modèles de cultures permettent d'estimer l'état hydrique du sol avec un pas de temps quotidien et par couches de 1 à 10 cm. Les modèles de calcul des contraintes verticales à l'interface sol-pneu (Schjønning *et al*., 2015a), de calcul de la résistance du sol (Schjønning *et al*., 2023), et du risque de tassement (Schjønning et Lamandé, 2020) permettent d'améliorer le calcul de la traficabilité. Obour *et al*. (2019) proposent une nouvelle méthode pour estimer les teneurs en eau limites pour le travail du sol. Enfin, de nombreux essais récents sur le désherbage mécanique et les destructions mécaniques à l'interculture permettent de mieux caractériser les conditions de réussite de ces opérations (Labreuche *et al*., 2022).

Les modèles Mecagro (Cerf *et al*., 1994 ; Mousset *et al*., 1996) et J-Dispo (Gillet, 1992) actuellement utilisés en France pour le calcul des jours disponibles, ont été créés dans les années 80-90. Perfbett (ITB, 2014), outil d'optimisation des chantiers d'arrachage de betterave comprenant une composante jours disponibles, est plus récent. Ils reposent tous sur une estimation de l'état hydrique du sol et des règles de décision permettant de définir si le jour est disponible ou non en fonction de l'état hydrique (Boiffin *et al*., 2020) et éventuellement d'autres critères selon les opérations et les modèles. Ils ont été

partiellement mis à jour dans les années 2010, que ce soit pour intégrer de nouvelles pratiques agricoles dans Mecagro (Fournier, 2015), ou pour remplacer l'ancien bilan hydrique de J-Dispo par un modèle de culture (Bessard Duparc *et al*., 2017). Cependant, il leur est régulièrement reproché de ne pas prendre correctement en considération le risque de tassement (Ben Romdhane, 2016) car ils reposent sur des seuils d'humidité du sol fixes et indépendants des caractéristiques (poids, pneumatiques, pression de gonflage) du matériel utilisé. Or, les agroéquipements ont beaucoup évolué ces dernières décennies : le poids des machines agricoles s'est fortement accru, et le risque de tassement également (Keller *et al*., 2019 ; Keller et Or, 2022 ; Schjønning *et al*., 2015b). L'outil Terranimo permet une meilleure estimation du risque de tassement, mais son utilisation en France est limitée par l'absence de bilan hydrique intégré (Ben Romdhane, 2016). Au-delà du contexte spécifiquement français, Edwards *et al*. (2016) notent aussi le manque d'outil adressant simultanément les questions de traficabilité et travaillabilité et propose un outil de calcul des jours disponibles à usage tactique de planification des opérations.

Pour accompagner l'évolution des systèmes agricoles, il semble nécessaire de disposer d'un outil de calcul des jours disponibles qui permette des applications d'ordre stratégique de différentes natures :

- évaluer la faisabilité de systèmes de culture innovants : par exemple évaluer la possibilité d'introduction de CIVE (culture intermédiaire à vocation énergétique) dans un système, c'est-à-dire la possibilité de les semer puis de les récolter ;
- optimiser la gestion du système de culture : connaitre les jours disponibles pour semer sur différentes plages de temps peut aider à identifier jusqu'à quand il est possible de décaler un semis au regard du matériel et du temps-homme disponibles ;
- dimensionner le matériel : un outil de calcul des jours disponibles pourrait aider à chercher le meilleurs compromis entre débit de chantier, limitation du tassement et coûts d'investissement.

Le projet J-DISTAS a l'ambition de construire un outil de calcul des jours disponibles qui mobilise les connaissances et modèles existants grâce à la création des liens nécessaires entre ces modèles. Cet article expose la méthode de construction et d'évaluation de l'outil J-DISTAS, son fonctionnement et ses performances tant sur l'évaluation de chaque critère que sur le classement final des jours.

2. Matériels et méthodes

2.1. Vocabulaire utilisé dans le projet

Plusieurs mots outils méritent d'être illustrés pour faciliter la compréhension de cet article (**Figure 25**). Le calcul des jours disponibles est décomposé en plusieurs critères qualitatifs à évaluer. A chaque critère est associé un indicateur, quantitatif et calculable à partir de modèles, et des seuils permettant de délimiter les différents niveaux de satisfaction du critère associé. Les résultats obtenus pour chaque critère sont ensuite pondérés, selon des règles d'agrégation propre à chaque opération, pour évaluer la disponibilité du jour. Le calcul de la disponibilité du jour est répété pour chaque jour d'une période d'intérêt afin de quantifier le nombre de jours disponibles sur la période.

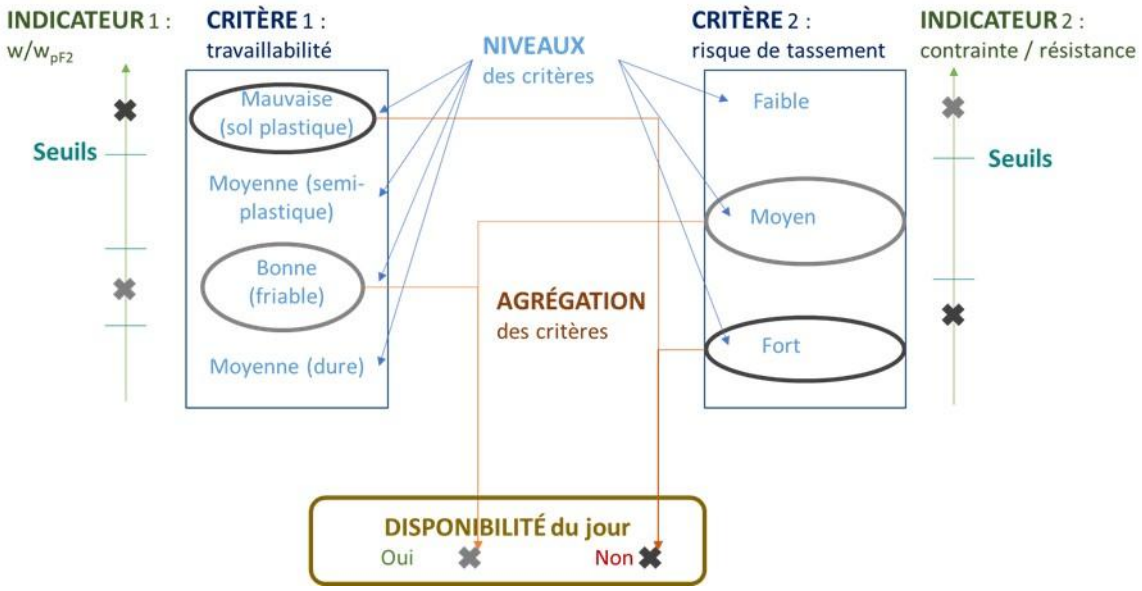


Figure 25 : Illustration du vocabulaire utilisé pour décrire le fonctionnement de l'outil et expliquer sa construction

2.2. Démarche générale de construction de l'outil

L'architecture générale de l'outil J-DISTAS, c'est-à-dire la sélection des critères à prendre en compte selon les opérations et les règles d'agrégation définissant si le jour est disponible en fonction du niveau de satisfaction de chaque critère, a été construite par expertise. Ensuite, plusieurs jeux de données et modèles ont été mobilisés pour calculer les indicateurs permettant d'estimer le niveau de satisfaction de chaque critère.

2.2.1. Sélection des critères et construction des règles d'agrégation pour définir la disponibilité du jour

Les critères à prendre en compte pour pouvoir évaluer la disponibilité du jour ont été définis spécifiquement pour chaque opération par un groupe de travail mobilisant l'expertise pratique d'agriculteurs et techniciens, et les connaissances scientifiques d'agronomes et chercheurs. Des enquêtes individuelles auprès d'un panel d'experts plus large puis une phase collective ont permis d'aboutir à une version consensuelle des règles d'agrégation pour définir la disponibilité du jour en fonction du niveau de satisfaction de chaque critère (Métais *et al*., 2023).

2.2.2. Définition des indicateurs et seuils à utiliser pour évaluer chaque critère

Afin d'utiliser les règles d'agrégation, il faut pouvoir définir le niveau de chaque critère pour chaque jour. Ceci nécessite de disposer d'indicateurs objectifs associés à chaque critère, et de valeurs seuils permettant de définir dans quel niveau le jour se situe. Les indicateurs et leurs méthodes de construction sont propres à chaque critère, mais ils respectent tous des règles communes :

- être calculable in-silico sans recours à l'observation ou la mesure, pour que l'outil puisse fonctionner sur de grandes séries temporelles dans un objectif d'application stratégique ;
- s'appuyer sur des modèles déjà existants lorsque ceux-ci sont adaptés ;
- utiliser des données terrain pour la construction ou la validation des indicateurs et des valeurs seuils associées.

2.2.3. Choix du modèle de culture pour estimer l'état hydrique du sol

Plusieurs indicateurs utilisés dans J-DISTAS nécessitent de connaitre l'humidité du sol sur différentes épaisseurs, ce qui implique de disposer de modèle pour estimer cette humidité du sol quotidiennement. Il a été décidé de s'appuyer préférentiellement sur le modèle de culture CHN (Soenen *et al*., 2019) pour sa facilité d'utilisation : l'interconnexion de ce modèle avec les bases de données d'Arvalis permet de réduire drastiquement le nombre de données d'entrée nécessaires, ce qui est un élément primordial pour un outil à destination du développement agricole. En outre, le bilan hydrique de CHN prévoit une percolation progressive de l'eau excédentaire (à saturation) d'une couche de sol vers la couche inférieure dont la vitesse dépend d'un coefficient de percolation propre à chaque sol, ce qui le rend particulièrement adapté au calcul de jours disponibles (Bessard Duparc *et al*., 2017). Par contre, CHN étant paramétré pour les céréales à paille et le maïs, c'est le modèle STICS (Brisson *et al*., 2003, 2009) qui est utilisé pour les calculs en culture de betterave.

2.3. Acquisition de données

Deux années d'acquisition de données ont eu lieu en 2019 et 2020, pour acquérir les données nécessaires à la construction et l'évaluation de l'outil.

2.3.1. Sites d'études : localisation et types de sol

L'acquisition de données s'est concentrée sur 5 sites principaux : la ferme expérimentale d'UniLaSalle à Beauvais (60), la plateforme d'essais de l'ITB (Institut technique de la betterave) à Berny en Santerre (80), la station expérimentale d'Arvalis à La Jaillière (44), la station expérimentale de l'INRAE à Estrées-Mons (80) et l'essai « travail du sol » d'Arvalis à Boigneville (91). Ponctuellement, des mesures ont été réalisées sur des sites complémentaires en Hauts de France. Les types de sols des principaux sites sont présentés dans le Tableau 5. Pour chaque site, une station météo de référence est identifiée afin d'accéder aux relevés météorologiques quotidiens (pluviométrie, température et évapotranspiration).

Tableau 5: Types de sols des 5 principaux sites d'acquisitions de données. *WpF2 : humidité à la capacité au champ (pF = 2)

Site	Nom du sol (base sol Arvalis)	Texture (GEPPA)	WpF2*(humidité massique)	Station météo de référence
Beauvais (60)	Limon argileux caillouteux sur argile à silex	Al	0,21	6001 Beauvais
Berny en Santerre (80)	Limon profond sain	La	0,32	8056 Estrée Mons
La Jaillière (44)	Limon argileux humide sur altérite de schiste	Lsa	0,17	4997 La Jaillière
Estrées Mons (80)	Limon profond sain	La	0,23	8056 Estrée Mons
Boigneville (91)	Limon argileux caillouteux peu épais sur calcaire de Beauce	Al	0,30 (labour) et 0,35 (SD)	9151 Boigneville

2.3.2. Les suivis de chantier

Un suivi de chantier consiste à réaliser une opération culturale et collecter un panel complet de données (Rogier *et al*., 2022) permettant de décrire d'une part les conditions d'intervention et d'autre part les conséquences de cette intervention.

- Description des conditions d'intervention :

Pour chaque chantier, les caractéristiques du matériel agricole sont consignées : poids par essieu en charge, marque et modèle de pneumatiques, pression de gonflage. L'état hydrique au moment de l'intervention est caractérisé par une mesure d'humidité pondérale du sol réalisée sur en moyenne 8 prélèvements par profondeur par couches de 5 ou 10 cm et jusqu'à 30 ou 50 cm de profondeur selon les opérations. Sur les sites équipés de tensiomètres à eau, la mesure du potentiel matriciel est

également effectuée ; sinon, une courbe de rétention en eau du sol est établie au laboratoire pour pouvoir estimer le potentiel matriciel à partir des teneurs en eau. Une appréciation tactile selon la grille de notation de la consistance d'Arvalis (2010) permet d'évaluer la consistance du sol ou friabilité, donc sa travaillabilité (Obour *et al*., 2017).

- Evaluation des conséquences et de l'efficacité de l'opération :

Le tassement provoqué par le passage du matériel agricole est évalué par comparaison des propriétés physiques entre les zones roulées et non roulées. Pour ce faire, 4 cylindres de 100 cm3 sont prélevés à 2 profondeurs (20 cm et 30 cm ou 40 cm selon les opérations) sous les passages de roue et entre les roues (témoin non roulé). Les échantillons prélevés sont amenés à l'humidité à la capacité au champ (pF2) pour mesurer la perméabilité à l'air à pF2, puis séchés 24 h à 105°C et pesés pour calculer la densité apparente et la porosité totale. La porosité libre à l'air (Groenevelt *et al*., 1984) et la perméabilité spécifique (Schjønning *et al*., 2016) sont ensuite calculées.

Pour les opérations de désherbage mécanique, la densité d'adventices est mesurée par comptage dans 4 cadres de 0,25 m² avant l'intervention puis quelques jours après l'intervention en repositionnant les cadres aux mêmes endroits pour calculer l'efficacité du désherbage (Sicard *et al*., 2013).

- Les observations d'experts : disponibilité des jours d'intervention

En complément des suivis de chantier, les expérimentateurs ont réalisé des observations sur la possibilité d'intervenir dans les parcelles, sans réaliser les opérations culturales. Ces observations commencent quelques jours avant l'opération culturale qui va faire l'objet d'un suivi de chantier et se poursuivent quelques jours à plusieurs semaines après. Pour chaque jour d'observation, l'expérimentateur note la date et la disponibilité du jour d'après lui, selon la grille présentée dans le **Erreur ! Référence non valide pour un signet.**. Il note également la consistance du sol selon la grille d'Arvalis (2010) et si les conditions météo sont favorables, risquées ou défavorables. En complément, il est demandé aux expérimentateurs de préciser quelles sont les raisons qui motivent leur classement, notamment les conditions de sol et les prévisions météo.

Tableau 6 : Grille de notation de la disponibilité du jour

Notation	Détail	Classification
Jour conseillé	Les conditions sont tout à fait favorables à la réalisation de l'intervention.	Jour disponible
Jour possible	Les conditions ne sont pas pleinement satisfaisantes, mais restent acceptables : la réalisation de l'opération est possible.	Jour disponible
Jour déconseillé	Dans ces conditions, les chances de réussite de l'opération sont faibles et/ou les risques de dégradation du sol sont importants.	Jour non disponible
Jour impossible	Il n'est pas possible d'intervenir dans ces conditions.	Jour non disponible

2.4. Construction des indicateurs et seuils associés

A partir des données collectées, un indicateur est proposé pour évaluer chaque critère. Ces indicateurs sont des valeurs continues calculées par un modèle : des seuils ont été définis pour associer des intervalles de valeurs de l'indicateur à chaque niveau de satisfaction du critère. Lorsqu'un modèle existant permet le calcul de l'indicateur, celui-ci est utilisé ; sinon, un modèle spécifique est construit. Cette partie détaille les méthodes utilisées pour définir les valeurs seuils, et le cas échéant, construire le modèle de calcul de l'indicateur.

2.4.1. Travaillabilité du sol

Le lien entre la consistance du sol observée et le rapport w/wpF2, rapport entre la teneur en eau du sol le jour étudié (w) et la teneur en eau du sol à la capacité au champ (wpF2), est étudié sur les données de consistances et de teneur en eau collectées lors des suivis de chantier sur les sites principaux, soit 37 dates d'observations (Métais *et al*., 2023 ; Ugarte Nano *et al*., 2021).

Dans un second temps, les 225 observations de consistance réalisées dans le projet, qu'elles proviennent de suivis de chantier complets ou d'observations d'experts, ont été utilisées pour fixer le seuil de w/wpF2 délimitant les consistances friable et semi-plastique. L'humidité du sol a été calculée avec un modèle de culture : CHN (Bessard Duparc *et al*., 2017 ; Le Bris *et al*., 2015 ; Soenen *et al*., 2019 ; Touzy *et al*., 2019) pour les observations en céréales, maïs ou sol nu, STICS (Brisson *et al*., 2003, 2009) pour les observations en betteraves. L'humidité à la capacité au champ a été estimée avec CHN. Ces données ont permis de construire une courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) à l'aide du package Rocit de R (Khan et Brandenburger, 2024) pour définir le seuil permettant le meilleur compromis entre sensibilité et spécificité.

2.4.2. Traficabilité et risque de tassement

La traficabilité est calculée à partir du risque de tassement estimé par le modèle Terranimo® (Schjønning et Lamandé, 2020), qui estime puis compare la résistance du sol (Schjønning *et al*., 2023) et les contraintes verticales créées par le passage des engins (Schjønning *et al*., 2015a) par couches de sol de 10 cm d'épaisseur. Le risque de tassement est considéré faible si la contrainte maximale est inférieure à 75 % de la résistance, fort si la contrainte maximale est supérieure à 125 % de la résistance, et modéré entre les deux. La capacité de Terranimo à estimer correctement le risque de tassement dans les contextes pédoclimatiques français a été évalué sur 27 suivis de chantiers à deux profondeurs soit 55 situations (Ugarte *et al*., 2024). Les données utilisées pour l'évaluation de Terranimo sont :

- données de comparaison : la densité apparente, la porosité libre à l'air, la perméabilité à pF2 et la perméabilité spécifique des zones foulées et non foulées sont comparées à l'aide d'un test non paramétrique de Wilcoxon. Dès lors qu'il y a une différence statistique au seuil de 5 % sur au moins une des variables étudiées, on considère qu'il y a un tassement observé ;
- données d'entrée de Terranimo : les caractéristiques du matériel relevées lors du suivi de chantier, l'humidité, le potentiel matriciel et la densité apparente mesurés le jour de l'intervention, ont été utilisées pour réaliser les simulations avec Terranimo. La granulométrie et la teneur en matière organique proviennent d'analyses de sol, complétées par des données de la base sol Arvalis pour les horizons profonds si nécessaire.

Pour chaque situation, le risque prédit et le tassement observé sont reportés dans une matrice de confusion permettant de calculer le nombre de situations de concordance et discordance entre observation et simulation. Etant donné que l'observation de tassement est binaire (tassement observé oui ou non), le résultat de Terranimo a été rendu binaire également : il y a un risque prédit dès lors que la contrainte verticale maximale est supérieure à 100 % de la résistance du sol.

2.4.3. Conditions météorologiques propices à la destruction mécanique

Pour prévoir l'efficacité de destruction de la couverture végétale par un travail du sol superficiel à l'interculture en fonction des conditions météorologiques, nous avons utilisé le modèle construit dans le cadre du projet Agate (Labreuche *et al*., 2022). Cependant, ce modèle prend pour hypothèse que 100 % de la surface du sol est travaillée, ce qui n'est pas le cas lors du désherbage mécanique (en culture). Un modèle spécifique a été construit dans le projet J-DISTAS pour évaluer si les conditions météo sont favorables à la dessication des adventices en culture après désherbage mécanique. Dans une optique de calcul de jours disponibles sur des grandes plages temporelles et/ou pour des systèmes de culture virtuels, il est nécessaire de pouvoir évaluer si les conditions météo sont propices à la réussite du

désherbage mécanique indépendamment de l'espèce, la famille et le stade de développement des adventices à détruire (tant qu'elles sont à un stade adapté au désherbage mécanique). Nous faisons l'hypothèse qu'il existe une relation entre conditions météo et efficacité du désherbage mécanique et cherchons à modéliser cette relation pour pouvoir estimer l'efficacité d'une intervention de désherbage mécanique uniquement à partir de données météorologiques et du type d'outil utilisé : outil localisé (bineuse) ou outil en plein (herse étrille et houe rotative).

Les données d'efficacité d'opérations de désherbage mécaniques issues du projet J-DISTAS, du projet « optimiser et promouvoir le désherbage mécanique » (Fontaine *et al*., 2013) et de la base de données d'expérimentation interne à Arvalis ont été regroupées, soit 448 observations dont 305 binages et 143 désherbages « en plein » à la herse étrille ou houe rotative. Ces observations ont été réalisées entre 1992 et 2022, sur 22 sites et dans 65 combinaisons différentes de site, date et outil utilisé. Chaque observation correspond à l'efficacité du passage d'un outil, à une date, dans une parcelle d'essai ou d'observation sur une espèce adventice. Un même passage peut donc donner lieu à plusieurs observations si plusieurs espèces sont présentes. De même, dans certains essais, il peut y avoir plusieurs parcelles différentes sur lesquelles le même outil est passé à la même date (répétitions d'une même modalité par exemple) et dans ce cas, nous avons plusieurs efficacités pour des conditions d'interventions identiques. Ceci nous permet de prendre en compte la variabilité de l'efficacité du désherbage mécanique. Pour chaque donnée d'efficacité, les données de la station météo la plus proche sont récupérées. Les variables utilisées sont :

- des données quotidiennes de pluviométrie (P), d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de bilan P-ETP, pour le jour de l'intervention et les jours suivants. Dans un premier temps, les données jusqu'à 10 jours après l'intervention ont été utilisées, avant d'être réduites à 2 jours après l'intervention ;
- des cumuls de P, ETP et P-ETP à partir du jour de l'intervention jusqu'à 5 jours après. Là aussi, des cumuls plus long terme ont également été testés initialement mais non retenus ;
- la température moyenne du jour de l'intervention.

Une première phase d'exploration graphique des données et classification ascendante hiérarchique a permis de vérifier les hypothèses et de nous orienter vers la construction d'un modèle complexe par machine learning. La méthode RFE (Recursive Feature Elimination) a été utilisée via le package Caret dans R (Kuhn, 2008) pour sélectionner un modèle et un lot de variables pour l'entrainer. Trois familles de modèles ont été testées : Random Forest, Gradient Boosting Model (GBM) et Bagged Tree, sur différents lots de variables. L'analyse est menée séparément par famille d'outils (binage vs. herse et houe) d'une part et sur la totalité des observations (quel que soit l'outil utilisé) d'autre part. Trois modèles (un par famille d'outils et un général) sont sélectionnés puis évalués à l'aide de la méthode LOOCV (Leave One Out Cross Validation), toujours via le package R Caret (Kuhn, 2008). Les règles de décisions sont approximées par la méthode « White Box » du package R DALEX (Biecek, 2018) pour vérifier la pertinence agronomique du modèle créé.

Les seuils d'efficacité permettant de dire si les conditions météorologiques sont favorables ou non à la réalisation du désherbage mécanique ont été définis en amont par les experts en même temps que les règles d'agrégation des critères pour l'opération de désherbage mécanique.

Une fois le modèle construit et les seuils établis, la classification des jours selon les conditions météo a été confrontée aux qualifications des conditions météo renseignées lors des observations d'experts réalisés dans J-DISTAS sur 161 observations pour la herse et la houe et 129 pour le binage.

2.5. Evaluation de l'outil de calcul de jours disponibles J-DISTAS

La capacité de l'outil J-DISTAS à classer les jours selon leur disponibilité a été évaluée opération par opération à l'aide de tableau de contingences qui permettent de calculer la précision, la sensibilité et la spécificité du modèle. Les observations utilisées pour cette évaluation sont les notations de disponibilité des jours enregistrés par les expérimentateurs lors des observations d'expert. Les caractéristiques de la machine enregistrées pour le suivi de chantier associé à chaque observation d'expert sont utilisées pour effectuer les simulations avec l'outil J-DISTAS.

3. Résultats

3.1. Présentation générale de l'outil et de son fonctionnement

L'outil J-DISTAS est un outil d'aide à la décision stratégique qui permet de calculer le nombre de jours disponibles pour une opération culturale donnée selon la machine utilisée et la culture en place (céréales à pailles, maïs, betterave, couvert d'interculture ou sol nu). Il est conçu pour les opérations de semis, préparation du lit de semence et destruction de couvert ou repousses à l'interculture, désherbage mécanique (limité aux céréales à paille, maïs et betterave), et récolte de betterave et maïs (Métais *et al*., 2023). Il repose sur le calcul quotidien de la disponibilité du jour sur une période d'intérêt pour chacune des 20 dernières années, ce qui permet d'obtenir la variabilité interannuelle du nombre de jours disponibles et de calculer des indicateurs statistiques de distribution (médiane, 2ème décile et minimum) mobilisables lors de décisions stratégiques. En revanche, J-DISTAS n'est pas conçu pour piloter les opérations au quotidien.

L'utilisateur choisit l'opération culturale et la fenêtre calendaire sur lesquelles il souhaite effectuer les calculs, puis créé le ou les scénarios qu'il souhaite étudier en saisissant des informations relatives au climat, au sol, aux pratiques culturales et au matériel agricole utilisé (**Figure** -A). Pour chaque jour de la fenêtre calendaire, J-DISTAS calcule les indicateurs relatifs aux critères appropriés pour l'opération culturale choisie (**Tableau**) et en déduit un niveau d'aptitude par critère (**Figure** -B et C). La combinaison de ces niveaux permet de définir un niveau de disponibilité du jour grâce à un ensemble de règles de décisions spécifiques à l'opération (**Figure** -D). Ce processus est répété sur l'ensemble des données climatiques des 20 dernières campagnes culturales pour obtenir le nombre de jours disponibles par année (**Figure** -E). Des exemples d'application sont présentés par Metais *et al*. (2024) et Métais *et al*. (2023).

Figure 2 : Schémas de fonctionnement de l'outil J-DISTAS (Métais *et al*., 2023)

Tableau 7 : Critères mobilisés selon l'opération étudiée

Opération	Travaillabilité du sol	Risque de tassement	Autre critère
Récolte de betterave	Oui	Oui	Non
Récolte de maïs (fourrage et grain)	Non	Oui	Maturité de la culture
Destruction de couverts et repousses à l'interculture	Oui	Oui	Conditions météo propices à la dessication
Semis et préparation du lit de semence	Oui	Oui	Non
Désherbage mécanique	Oui	Non	Conditions météo propices à la dessication

3.2. Performances des indicateurs par critère

3.2.1. Travaillabilité du sol

Les données acquises lors des suivis de chantier complets ont permis de vérifier que le rapport w/wpF2 est pertinent pour estimer la consistance du sol et de calculer des intervalles de confiance des valeurs de w/wpF2 attendues par classe de consistance (Métais *et al*., 2023 ; Ugarte Nano *et al*., 2021). Les valeurs seuils retenues pour définir la consistance du sol (**Erreur ! Référence non valide pour un signet.**) tiennent compte de ces intervalles de confiance. Le taux d'observations bien prédites est de 61,6 %. Les erreurs consistent majoritairement à prédire une consistance moins favorable au travail du sol que celle observée sur le terrain (**Tableau**).

Tableau 8 : Seuils utilisés pour définir la consistance du sol à partir du rapport w/wpF2.

Consistance	Dure	Friable	Semi-plastique	Plastique
Valeur de w/wpF2	w/wpF2 < 0,6	0,6 ≤ w/wpF2 < 0,873	0,873 ≤ w/wpF2 < 1	1 ≤ w/wpF2

Tableau 9 : Matrice de confusion pour la prédiction de la consistance du sol après optimisation du seuil entre les consistances friable et semi-plastique (Métais *et al*., 2023).

		OBSERVATIONS			
		Dure	Friable	Semi-plastique	Plastique
PREDICTIONS	Dure	0	6	0	0
	Friable	1	144	5	6
	Semi-plastique	2	39	13	1
	Plastique	0	27	11	0

3.2.2. Traficabilité

Parmi les 55 situations étudiées, du tassement a été observé au champ sur seulement 8 cas, pour lesquels il y avait également un risque de tassement prédit par Terranimo, soit une sensibilité de 100 %. Les 47 autres situations ne présentent aucune variation significative de densité apparente, perméabilité à l'air et perméabilité spécifique. Terranimo estime qu'il y a un risque de tassement pour 29 de ces situations, dont 19 avec un risque fort c'est-à-dire une contrainte supérieure à 125 % de la résistance. La spécificité de Terranimo est donc de 36,7 % et sa précision de 47,3 %.

Une fois le risque de tassement calculé pour chaque couche de sol de 10 cm d'épaisseur avec Terranimo, deux indicateurs de traficabilité sont définis : le risque de tassement superficiel et le risque de tassement profond. Ils correspondent au niveau de risque maximal estimé par Terranimo pour l'ensemble des couches situées respectivement au-dessus ou en-dessous de la profondeur maximale de travail du sol dans la rotation (Métais *et al*., 2023).

3.2.3. Conditions météorologiques propices à la destruction mécanique

- Destructions à l'interculture

L'indicateur climatique permettant d'évaluer si les conditions météorologiques sont propices à la réussite de la destruction mécanique de couverts, repousses et adventices à l'interculture est un cumul de P-ETP sur 5 jours, c'est-à-dire le jour du passage et les 4 jours suivants (Labreuche *et al*., 2022 ; Métais *et al*., 2023).

- Désherbage mécanique

La phase de sélection de modèle et de jeux de variable d'entrainement a conduit à la sélection d'un modèle de type Cubist (Quinlan, 1993, 1992) pour le désherbage mécanique avec un outil en plein et de type Random Forest (Breiman, 2001) pour le binage comme pour l'ensemble des outils. Les

performances estimées par la méthode Leave One Out Cross Validation (Wong, 2015) sont présentées dans le **Erreur ! Référence non valide pour un signet.**.

Tableau 10 : Nature des modèles sélectionnés par la méthode RFE et performances évaluées par la méthode LOOCV (RMSE : Root Mean Square Error ; MAE : Mean Absolute Error).

Situation étudiée	Type de Modèle	RMSE	R^2	MAE	Précision
Modèle indépendant de l'outil utilisé	Random Forest	25,11	0,45	17,82	64 %
Modèle spécifique outil en plein (herse et houe)	Cubist	23,98	0,52	15,18	77 %
Modèle spécifique binage	Random Forest	25,36	0,38	18,67	60 %

Après entrainement, ces modèles sont utilisés pour prédire l'efficacité de désherbage sur chaque situation où des observations à dire d'experts ont été réalisées dans le cadre du projet. Ces efficacités sont confrontées aux seuils d'efficacité fixés par les experts pour qualifier les conditions météo, puis cette classification est comparée aux observations des experts sur les conditions météo (**Erreur ! Référence non valide pour un signet.**).

Tableau 11 : Capacité du modèle J-DISTAS à identifier les jours où les conditions météorologiques sont propices à la destruction mécanique

Modèle utilisé	Précision	Sensibilité	Spécificité
Modèle indépendant de l'outil utilisé	73 %	90 %	44 %
Modèle spécifique outil en plein (herse et houe)	70 %	69 %	75 %
Modèle spécifique binage	40 %	100 %	1 %

Sur l'ensemble des évaluations (LOOCV et comparaison aux observations d'experts), le modèle indépendant de l'outil utilisé donne des performances plus stables. A l'inverse, les modèles outils dépendants semblent surentrainés et plus facilement mis en défaut sur des jeux de données indépendants. Il est donc décidé de retenir uniquement le modèle indépendant de l'outil. Ce modèle est entrainé sur les variables de Température moyenne, ETP et P-ETP du jour de l'intervention, ETP du surlendemain de l'intervention et cumuls de P-ETP du jour de l'intervention jusqu'à 1, 4 et 5 jours après l'intervention. L'exploration du modèle par la méthode white box permet d'identifier des règles de décisions approximant le modèle créé, avec un coefficient de détermination R^2=0.79 :

- lorsque l'ETP du jour de l'intervention est fort et le cumul de P-ETP sur 2 jours fortement négatif, c'est-à-dire que le temps est très séchant immédiatement après l'intervention, l'efficacité est maximale ;
- l'efficacité est moyenne lorsque soit l'ETP du jour de l'intervention est fort mais le cumul de P-ETP sur 2 jours est positif ou faiblement négatif, soit l'ETP du jour de l'intervention est faible mais le cumul de P-ETP sur 6 jours est faible ;
- enfin, lorsque l'ETP du jour de l'intervention est faible et le cumul de P-ETP sur 6 jours est fort, alors l'efficacité est faible.

3.3. Performance de l'outil J-DISTAS

3.3.1. Pour l'opération de semis

Les conditions requises étant identiques entre les opérations de semis et de préparation du lit de semence, ces deux opérations ont été traitées conjointement dans le projet : ce sont les mêmes critères, seuils et règles d'agrégation qui sont utilisés, et l'évaluation est commune pour ces deux opérations.

Tableau 12 : Matrice de confusion entre observations d'expert et simulations par l'outil J-DISTAS pour les opérations de semis et préparation de lit de semence

		OBSERVATIONS			
		Conseillé	Possible	Déconseillé	Impossible
PREDICTIONS	Conseillé	78	0	3	12
	Possible	33	4	1	2
	Déconseillé	31	1	1	0
	Impossible	3	0	0	3

L'évaluation de l'outil J-DISTAS, pour l'opération de semis et préparation du lit de semence, a porté sur 172 observations d'experts, dont 150 lors de jours disponibles (145 notées comme jours conseillés et 5 en jours possibles). Lorsque l'on regarde la décision finale binaire (jour disponible ou non), la précision du modèle est de 69 %, avec une sensibilité de 76,7 % et une spécificité de 18,2 %. Si on s'intéresse au libellé des jours sur une échelle à 4 niveaux, le niveau de précision est de 50 % (**Tableau**).

3.3.2. Pour l'opération de désherbage mécanique

En culture de betterave, seuls 5 jours expertisés sont classés non disponibles dont 4 car le sol est trop humide après un orage d'après les notations de l'expert (**Erreur ! Référence non valide pour un signet.**). Le modèle est mis en défaut sur ces jours non disponibles pour cause d'orage car l'orage n'est pas passé sur la station météo utilisée, ce qui conduit à une spécificité nulle, et à une précision de 78 % (**Erreur ! Référence non valide pour un signet.**). Les observations en céréales sont mieux réparties entre jours disponibles et non disponibles, et les résultats sont aussi plus équilibrés entre sensibilité et spécificité (**Erreur ! Référence non valide pour un signet.**).

Tableau 13 : Nombre d'observations utilisées pour l'évaluation et performances de l'outil J-DISTAS pour l'opération de désherbage mécanique

		Nombres d'observations d'experts			Performances		
		Jours disponibles	**Jours non disponibles**	**Total**	**Précision**	**Sensibilité**	**Spécificité**
Culture	**Betterave**	32	5	37	78 %	90 %	0 %
	Céréales	34	77	111	72 %	52, 9%	80,5 %
	Total	66	82	148	74 %	71,2 %	75,6 %

4. Discussion et perspectives

4.1. Apports du projet J-DISTAS pour le calcul des jours disponibles

4.1.1. L'intérêt d'un outil de calcul des jours disponible

D'après une enquête réalisée en 2016 (Ben Romdhane, 2016), les acteurs de la recherche et du développement agricole expriment le besoin d'un outil de calcul de jours disponibles prenant en compte les risques de tassement et la réussite des opérations pour un usage stratégique. Les différents projets qui mobilisent ou vont mobiliser l'outil J-DISTAS confirment la nécessité de disposer d'un tel outil. Actuellement, l'outil est utilisé en complément d'expérimentations pour évaluer la faisabilité des leviers ou des systèmes de culture testés dans ces expérimentations (Metais *et al.*, 2024).

4.1.2. Décomposition du calcul des jours disponibles par critère

A la différence des outils précédents, tels que J-Dispo (Desoubry *et al.*, 1996 ; Gillet, 1992) ou Mécagro (Mousset *et al.*, 1996), dans J-DISTAS le calcul des jours disponibles est décomposé par critères (travaillabilité du sol, traficabilité, conditions météorologiques…). Cette décomposition permet à l'utilisateur final d'identifier la ou les principales causes qui limitent les jours disponibles, et donc de voir quelles sont les sources possibles d'ajustement (modifications du matériel, décalage dans le temps,

etc.) pour augmenter les jours disponibles. Pour la mise à jour de l'outil, ce mode de construction permet également d'améliorer chaque brique indépendamment en fonction de l'avancée des connaissances et facilite donc l'amélioration continue de l'outil. Par exemple, la révision des seuils de travaillabilité ne remettrait pas en cause le calcul des autres indicateurs.

4.1.3. Calcul du tassement lié à la machine utilisée

La démarche de calcul des jours disponibles proposée par J-DISTAS permet de prendre en compte le risque de tassement calculé spécifiquement pour la machine utilisée là où les outils de calcul de jours disponibles précédents utilisaient des seuils d'humidité du sol définis par opération indépendamment des caractéristiques (poids, pneumatiques, etc.) du matériel utilisé (Nicoletti, 2008). Calculer le risque de tassement en fonction des caractéristiques des machines permet d'éviter que l'évolution rapide des puissances et poids des machines (Keller *et al*., 2019 ; Keller et Or, 2022 ; Schjønning *et al*., 2015b) ne rende l'outil obsolète. En matière d'utilisation, ceci facilite la comparaison de plusieurs matériels pour rechercher le meilleur compromis entre augmentation du débit de chantier et augmentation du poids donc du risque de tassement. En contrepartie, l'évaluation de la faisabilité de techniques ou de systèmes de culture à l'échelle de la ferme est dépendante des hypothèses sur les agroéquipements faites lors de la construction des cas types : leur généralisation est donc limitée. Par exemple, les calculs en cours de réalisation dans le cadre du projet Agile (Brun, 2024) pour la destruction mécanique de repousses à l'interculture donnent des nombres de jours disponibles différents selon les caractéristiques du matériel utilisé, ce qui peut amener à des conclusions variables sur la faisabilité des destructions mécaniques dans un même contexte pédoclimatique. La comparaison des résultats obtenus avec différentes hypothèses de matériel permet d'évaluer les bénéfices à attendre d'une optimisation du matériel.

4.1.4. Création d'une démarche de conception

Au-delà de l'outil de calcul, le projet J-DISTAS a également permis de mettre au point une démarche de construction de l'outil de calcul des jours disponibles. Cette démarche consiste à :

- recueillir l'expertise existante pour identifier les critères à retenir selon l'opération étudiée puis construire les règles de pondération ;
- définir des indicateurs, si possible à partir de modèles existants, et des valeurs seuils associées pour pouvoir évaluer chaque critère ;
- évaluer la performance de l'outil, critère par critère puis dans sa capacité à identifier les jours disponibles.

Cette démarche pourra être appliquée pour étendre l'outil à d'autres opérations et d'autres cultures, comme l'apport de produits résiduaires organiques, l'implantation et l'arrachage de pomme de terre, etc.

4.2. Discussion des forces et faiblesses de l'outil

4.2.1. Les données disponibles

Les données utilisées pour la construction et l'évaluation de l'outil présentent plusieurs limites. La première limite est le nombre de données, souvent trop faible. Ainsi, il n'a pas été possible d'optimiser tous les seuils de travaillabilité, ni d'évaluer l'outil sur les opérations de récolte et de destruction de couverts. Le nombre de données pour l'évaluation du désherbage mécanique de betterave ou le calcul de tassement est aussi limité : ces jeux de données mériteraient d'être complétés pour pouvoir mieux évaluer les performances de l'outil. La seconde limite est le déséquilibre des données conduisant à des situations sur- ou sous-représentées. A titre d'exemple, pour la travaillabilité, les observations en sol friable sont largement dominantes, alors que celles en sol dur ou plastique sont très rares. De même, les observations de disponibilité de jours ont très majoritairement eu lieu sur des jours disponibles. Elles permettent donc bien d'évaluer la spécificité de l'outil, mais ne permettent pas de conclure sur sa

sensibilité. Cette limite est particulièrement forte concernant l'évaluation des jours disponibles pour le désherbage mécanique de betterave. Enfin, les données mériteraient d'être complétées sur une plus grande diversité de situations pédoclimatiques étant donné que le projet s'appuie sur 5 sites principaux assez peu contrastés : tous situés dans la moitié nord de la France, majoritairement non caillouteux et représentant seulement trois classes de texture voisines (Al, La et Lsa). De plus, selon les opérations étudiées, certains sites sont sur-représentés par rapport à d'autres. Par exemple, les données d'évaluation pour le semis proviennent de seulement 3 sites, dont 90 % du seul site de Boigneville.

Une évaluation sur des jeux de données plus diversifiés et plus équilibrés serait donc nécessaire pour mieux rendre compte des performances de l'outil.

4.2.2. Les performances de l'outil

Les performances obtenues dépendent directement de la qualité des données utilisées pour la construction puis pour l'évaluation. Les conditions d'évaluation sont hétérogènes selon les indicateurs et les opérations, la représentativité des performances obtenues est donc variable.

- Dessication des adventices

Le modèle de qualification des conditions météorologiques pour le désherbage mécanique est satisfaisant et présente des performances correctes. Pour l'opération de désherbage mécanique, J-DISTAS donne des taux de précision satisfaisant (surtout en céréales) et l'analyse des erreurs montre que celles-ci sont principalement dues à des erreurs d'estimation de la travaillabilité et peu d'erreurs sur les conditions météorologiques. Ces résultats sont corroborés par une autre étude, menée dans le projet MadeInAB dédié à l'évaluation de systèmes de cultures biologiques : le calcul de jours disponibles a été effectué avec J-DISTAS et comparé aux dates réelles de réalisations des travaux sur plusieurs années. Lorsque J-DISTAS conclut que le jour n'est pas disponible alors qu'il y a eu un désherbage mécanique à cette date, c'est très souvent à cause d'une erreur d'évaluation de la travaillabilité, rarement une erreur sur l'appréciation des conditions météorologiques (Metais *et al*., 2024).

- Tassement

Concernant le calcul de la traficabilité, nos résultats montrent une très bonne sensibilité mais une faible spécificité de Terranimo. Plusieurs éléments pourraient expliquer ces résultats, sans qu'il soit possible de les hiérarchiser à ce stade :

- incertitudes sur le diagnostic du tassement. Ce diagnostic était basé sur les observations de terrain constituées de 4 prélèvements de cylindres, ce qui est peut-être insuffisant pour détecter les déformations de la structure du sol, surtout lorsqu'il y a une forte variabilité des données comme c'est le cas sur certaines mesures de perméabilité à l'air ;
- incertitudes sur les poids par essieu utilisés en entrée du modèle Terranimo. Les poids renseignés sont issus des pesées des machines à l'arrêt, outils relevés dans le cas d'outils portés, et non pas en conditions de travail au champ ;
- incertitudes sur les estimations de la résistance du sol par le modèle Terranimo. Une évaluation de la précision des fonctions utilisées serait nécessaire afin de valider l'application de ses fonctions pour les conditions pédoclimatiques des sols du Nord de la France ;

- Travaillabilité

Le calcul de la travaillabilité est probablement le point à améliorer en priorité. L'optimisation des seuils n'a pu être faite que pour le seuil entre consistances friable et semi-plastique, mais avec un jeu de données déséquilibré qui conduit à une précision relativement faible de cet indicateur. La comparaison des sorties de J-DISTAS avec des calendriers d'interventions pour le désherbage mécanique confirme le manque de précision du calcul de travaillabilité, souvent trop pessimiste (Metais *et al*., 2024). Un

travail supplémentaire est donc nécessaire pour collecter un plus grand nombre d'observations, notamment en situations défavorables (sol dur, semi-plastique ou plastique), puis revoir la définition des seuils. Une autre possibilité serait de s'appuyer sur les méthodes de calcul de la travaillabilité utilisées par Edwards *et al*. (2016) et Obour *et al*. (2019).

- Identification des jours disponibles

La précision du modèle est plutôt satisfaisante si on compare à la précision de J-Dispo, qui varie entre 44 % et 80 % selon les situations pédoclimatiques et les opérations (Bessard Duparc *et al*., 2017). Cependant, cette précision mérite d'être nuancée étant donnée la faible part relative des observations en jours non disponibles pour certaines opérations. Là aussi, une évaluation sur un jeu de données plus grand, plus équilibré et représentant des situations pédoclimatiques plus diversifiées serait nécessaire pour avoir une meilleure connaissance des performances de l'outil à l'échelle nationale. Plusieurs travaux pourraient permettre d'augmenter la précision du modèle, à commencer par l'amélioration du calcul de la travaillabilité. Un autre point faible de l'outil semble être la prise en compte des pluies d'orage : il serait intéressant d'évaluer si l'utilisation de données météo spatialisées à la parcelle par interpolation entre les stations météo avoisinantes permettrait d'atténuer ce type d'erreur.

4.2.3. La hiérarchisation des critères selon les opérations

En début de projet, il a été fait l'hypothèse que les critères à retenir et les pondérations pourraient varier selon les opérations culturales, qui ont donc été travaillées séparément. Finalement, il y a effectivement des différences dans les critères retenus (**Tableau**), mais aussi dans leurs importances relatives selon les opérations. Ainsi, les conditions de travaillabilité et de traficabilité sont très strictes pour l'opération de semis, *a fortiori* s'il s'agit d'une culture exigeante vis-à-vis de la qualité du lit de semence, alors qu'un risque modéré de tassement superficiel peut être toléré dans le cas d'opération de récolte ou un sol semi-plastique pour une destruction à l'interculture. Ces choix s'expliquent par la possibilité ou non de corriger des problèmes de structure avant la mise en place de la prochaine récolte. Dans la même logique, un risque de tassement profond fort conduira systématiquement à considérer le jour non disponible car il n'y a pas de possibilité de le corriger mécaniquement. Pour chaque critère, le niveau le plus défavorable (risque de tassement fort, sol plastique pour la travaillabilité, climat humide) conduit systématiquement à déclasser le jour, à deux exceptions près :

- dans le cas de récolte de betterave, le sol plastique pourra être accepté si tous les autres indicateurs sont à l'optimum ;
- dans le cas de la destruction à l'interculture de couverts et adventices faciles à détruire quelles que soient les conditions météo, l'indicateur climatique ne sera pas bloquant.

4.3. Perspectives

Les prochains travaux à conduire sur l'outil J-DISTAS sont de plusieurs ordres. Dans un premier temps, un travail d'amélioration du calcul de la travaillabilité semble nécessaire. En complément, l'évaluation de l'outil mérite d'être complétée pour renforcer notre compréhension de ses points forts et points faibles et ainsi prendre du recul sur ses performances et son domaine d'application.

Une analyse de la sensibilité aux données d'entrée est en cours. Elle vise à identifier les données nécessitant une plus grande précision lors de la construction des plans de simulation et à cerner les limites d'extrapolation des résultats obtenus. La connaissance de l'outil apportée par cette analyse sera utile pour mieux définir les cas types et leur plage de représentativité lors de l'évaluation de la faisabilité de pratiques ou systèmes de culture.

Enfin, l'outil est déjà utilisé lors d'évaluations pluri-critères pour apprécier la faisabilité soit de systèmes de culture dans le projet MadeInAB, (Metais *et al*., 2024), soit de leviers agronomiques dans les projets Agile (Brun, 2024) et Gramicible (Perriot, 2024). J-DISTAS permet aussi de calculer les jours

disponibles selon le matériel utilisé pour aider au dimensionnement de parc matériel, mais nécessite une meilleure ergonomie pour permettre une prise en main par les acteurs de l'agroéquipement.

5. Conclusion

Le projet J-DISTAS a permis de construire un outil qui répond aux attentes identifiées en amont du projet, à savoir prendre en considération les conditions nécessaires à la réussite de l'opération et le risque de tassement selon la machine utilisée dans le calcul des jours disponibles pour un usage stratégique. Pour ce faire, les conditions de disponibilité des jours ont été décomposées en critères. Chaque critère est évalué à l'aide d'indicateurs, puis les résultats sont agrégés pour prendre une décision finale sur la disponibilité du jour. Le calcul est effectué pour tous les jours de la période d'intérêt sur les 20 dernières années climatiques pour connaitre la variabilité du nombre de jours disponibles. L'outil construit offre un niveau de précision au moins équivalent à l'existant, malgré une estimation de la travaillabilité du sol perfectible. De gros progrès ont été faits sur l'évaluation des conditions météorologiques propices au désherbage mécanique. L'appel au modèle Terranimo pour le calcul du risque de tassement permet de tenir compte de l'évolution du matériel agricole et facilite la recherche de compromis entre débit de chantier et préservation de la structure du sol. Ce nouvel outil est utilisé actuellement pour apprécier la faisabilité de pratiques et systèmes dans le cadre d'évaluations pluri-critères et devra permettre de produire des références à destination de la profession agricole.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Pascale METAIS : conceptualisation, coordination et réalisation du projet, rédaction et révision du manuscrit

Marine LACOSTE, Rémy DUVAL, Annie DUPARQUE, Damian MARTIN, Philippe BILLA, Carolina UGARTE : conceptualisation, coordination et réalisation du projet, révision du manuscrit

Pierre DUL et Thomas LEBORGNE : coordination et réalisation du projet, rédaction et révision du manuscrit

Nicolas ROGIER : coordination et réalisation du projet, révision du manuscrit

Mathieu LAMANDE : conceptualisation, révision du manuscrit

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes impliquées dans la construction puis la réalisation du projet.

Déclaration de soutien financier

Le projet J-DISTAS est réalisé avec la contribution financière du Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR) géré par le ministère en charge de l'agriculture.

Références bibliographiques

Arvalis, 2010. Choisir ses outils de travail du sol, Choisir des outils. ARVALIS - Institut du végétal, Paris.

Ben Romdhane, S., 2016. Modèles de simulation "jours disponibles": état des lieux et attentes des agriculteurs et conseillers (Mémoire de Master 2). CIHEAM IAM Montpellier, Montpellier.

Bessard Duparc, P., Laberdesque, M., Soenen, B., Métais, P., Trochard, R., Le Bris, X., 2017. CHN: practical case of valorization of a dynamic crop model to estimate the number of available days for cultivation works, in: EFITA WCCA 2017 Conférence. Presented at the EFITA WCCA 2017 Conférence, Montpellier Supagro, Montpellier, p. paper number 38.

Biecek, P., 2018. DALEX: Explainers for Complex Predictive Models in R. Journal of Machine Learning Research 19, 1–5.

Boiffin, J., Laurent, F., Richard, G., 2020. Réussir l'implantation des cultures, 1ère édition. ed, Savoir faire. Editions Quae.

Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45, 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. European Journal of Agronomy, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications 18, 309–332. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7

Brisson, N.N., Launay, M., Mary, B.B., Beaudoin, N.N., 2009. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quae.

Brun, D., 2024. Grandes cultures : Quels outils pour remplacer le glyphosate ? Perspectives Agricoles 62–64.

Cerf, M., Mousset, J., Angevin, F., Boizard, H., 1994. La modélisation des conditions d'intervention au champ en grande culture. Presented at the 13. Symposium international.

Desoubry, P., Trochard, R., Mius, P., 1996. Jours disponibles: comparaison de de deux méthodes d'estimation. Perspectives Agricoles 212.

Edwards, G., White, D.R., Munkholm, L.J., Sørensen, C.G., Lamandé, M., 2016. Modelling the readiness of soil for different methods of tillage. Soil and Tillage Research 155, 339–350. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.013

Fontaine, L., Bonin, L., Lieven, J., Garnier, J.-F., Zaganiacz, V., Rodriguez, A., Lemarié, P., 2013. Optimiser et promouvoir le désherbage mécanique en grandes cultures. *Innovations Agronomiques* 28, 113. https://doi.org/10.17180/sa2y-yn36

Fournier, T., 2015. L'intégration de l'agroécologie dans les systèmes de productions agricoles picardes (Mémoire de fin d'études d'ingénieur). LaSalle Beauvais, Beauvais.

Gillet, J.-P., 1992. Une méthode de calcul des jours disponibles. Perspectives Agricoles 172, 95–98.

Groenevelt, P.H., Kay, B.D., Grant, C.D., 1984. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. Geoderma 34, 101–114. https://doi.org/10.1016/0016-7061(84)90016-8

ITB, 2014. Perfbet: un outil pour améliorer la performance des chantiers de récolte. Le Betteravier Français I à IV.

Joannon, A., Kockmann, F., Morlon, P., Papy, F., 2020. Jours disponibles pour les travaux des champs — Les Mots de l'agronomie. Les Mots de l'agronomie.

Justes, E.E., Beaudoin, N., Bertuzzi, P., Charles, R., Constantin, J., Durr, C., Hermon, C., Joannon, A., Bas, C.L., Mary, B., Mignolet, C., Montfort, F., Ruiz, L., Sarthou, J.-P., Souchere, V., Tournebize, J., Savini, I., Rechauchère, O., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques (report No. 210045030). Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

Keller, T., 2005. A Model for the Prediction of the Contact Area and the Distribution of Vertical Stress below Agricultural Tyres from Readily Available Tyre Parameters. Biosystems Engineering 92, 85–96. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.05.012

Keller, T., Or, D., 2022. Farm vehicles approaching weights of sauropods exceed safe mechanical limits for soil functioning. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 119, e2117699119. https://doi.org/10.1073/pnas.2117699119

Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., Or, D., 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. Soil and Tillage Research 194, 104293. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293

Khan, M.R.A., Brandenburger, T., 2024. ROCit: Performance Assessment of Binary Classifier with Visualization.

Kuhn, M., 2008. Building Predictive Models in R Using the caret Package. Journal of Statistical Software 28, 1–26. https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05

Labreuche, J., Vuillemin, F., Métais, P., Dubois, S., Gautellier, L., Piraux, F., 2022. Alternatives au glyphosate : des leviers aux efficacités variables, in: 3èmes biennales de l'innovation céréalière. Presented at the Phloème, Paris, pp. 93–102.

Le Bris, X., Soenen, B., Laberdesque, M., Gouache, D., Lorgeou, J., Piquemal, B., 2015. "CHN", a crop model to add value to phenotyping and approach genetic variation for RUE and WUE, in: Recent Progress in Drought Tolerance. Presented at the From genetics to mofelling, Montpellier.

Metais, P., Lacoste, M., Dul, P., Celette, F., Viguier, L., 2024. Estimation of available days for mechanical weeding with J-DISTAS: relevance and limits in cropping systems evaluation. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11177.81767

Métais, P., Rogier, N., Dul, P., Ugarte, C., Duparque, A., Martin, D., Duval, R., Billa, P., Lacoste, M., 2023. J-DISTAS : Prévoir les Jours Disponibles pour réussir les opérations culturales et éviter les tassements des sols en grandes cultures. Agronomie, Environnement et Sociétés 13.

Mousset, J., Aslahé, C., Billa, P.-A., Boiffin, J., Chatelin, M.H., Chopplet, M., Francois, M., Gandon, H., Groëll, F., His, M., Hopquin, J.P., Klein, D., Masset, B., Papy, F., Quiévreux, D., Soler, L.G., 1996. Le conseil agro-équipement en Picardie : Mécagro, in: Colloque Du Cinquantenaire de l'INRA : Aide à La Décision et Choix de Stratégies Dans Les Entreprises Agricoles, Aide à La Décision et Choix de Stratégies Dans Les Entreprises Agricoles. INRA-ESR, Laon, France.

Müller, L., Lipiec, J., Kornecki, T.S., Gebhardt, S., 2011. Trafficability and workability of soils, in: Encyclopedia of Agrophysics. Springer, pp. 912–924.

Nicoletti, J.-P., 2008. Choisir ses outils en fonction du risque climatique. Perspectives Agricoles 347, 10–13.

Obour, P.B., Keller, T., Jensen, J.L., Edwards, G., Lamandé, M., Watts, C.W., Sørensen, C.G., Munkholm, L.J., 2019. Soil water contents for tillage: A comparison of approaches and consequences for the number of workable days. Soil and Tillage Research 195, 104384. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104384

Obour, P.B., Lamandé, M., Edwards, G., Sørensen, C.G., Munkholm, L.J., 2017. Predicting soil workability and fragmentation in tillage: a review. Soil Use and Management. https://doi.org/10.1111/sum.12340

Perriot, B., 2024. GRAMICIBLE [WWW Document]. ARVALIS. URL https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/projet-de-recherche-gramicible (accessed 11.15.24).

Quinlan, J.R., 1993. Combining instance-based and model-based learning, in: Proceedings of the Tenth International Conference on International Conference on Machine Learning, ICML'93. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, pp. 236–243.

Quinlan, J.R., 1992. Learning with continuous classes, in: Proceedings of the 5th Australian Joint Conference On Artificial Intelligence. Presented at the 5th Australian Joint Conference On Artificial Intelligence, Hobart, pp. 343–348.

Reboul, C., Maamoun, M., 1983. Contraintes météorologiques du travail agricole - Jours disponibles pour les travaux des champs en Ile-de-de France. Économie rurale 157, 83–95. https://doi.org/10.3406/ecoru.1983.3000

Rogier, N., Martin, D., Dubois, B., Haux, C., Lemaire, A., Morque, G., Guillo, Q., Pruvôt, H., Ritzenthaler, V., Calais, D., Seynave, M., Tellier, V., Vincant, P., Ficheux, B., Pradera, G., Rannou, T., Giot, G., Pannetier, P., Pulleux, P., Métais, P., Ugarte Nano, C., 2022. Guide des Protocoles J-DISTAS.

Rounsevell, M.D.A., 1993. A review of soil workability models and their limitations in temperate regions. Soil Use and Management 9, 15–20. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1993.tb00921.x

Schjønning, P., Lamandé, M., 2020. An Introduction to Terranimo. Aarhus University.

Schjønning, P., Lamandé, M., Crétin, V., Nielsen, J.A., 2016. Upper subsoil pore characteristics and functions as affected by field traffic and freeze–thaw and dry–wet treatments. Soil Res. 55, 234–244. https://doi.org/10.1071/SR16149

Schjønning, P., Lamandé, M., De Pue, J., Cornelis, W.M., Labouriau, R., Keller, T., 2023. The challenge in estimating soil compressive strength for use in risk assessment of soil compaction in field traffic, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 61–105. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.003

Schjønning, P., Lamandé, M., Tøgersen, F.A., Arvidsson, J., Keller, T., 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil–tyre interface. Biosystems Engineering 99, 119–133. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.08.005

Schjønning, P., Stettler, M., Keller, T., Lassen, P., Lamandé, M., 2015a. Predicted tyre–soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. Soil and Tillage Research 152, 52–66. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.002

Schjønning, P., van den Akker, J.J.H., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., Breuning-Madsen, H., 2015b. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 183–237. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.001

Sicard, H., Gainche, J., Fontaine, L., 2013. RotAB Weed toolbox [WWW Document]. URL https://orgprints.org/id/eprint/31937/ (accessed 10.10.24).

Soenen, B., Bonnefoy, M., Delpech, C., Piquemal, B., Descazeaux, P., Degan, F., Laurent, F., 2019. Mise au point du pilotage intégral de l'azote avec le modèle de culture CHN: approche « CHN-conduite ». Agriculture, Ecosystems & Environment 1, 75–86.

Söhne, W., 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural engineering : AE 39.

Söhne, W., 1953. Druckverteilung im boden und bodenverformung unter schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik-Konstrukteurhefte.

Touzy, G., Rincent, R., Bogard, M., Lafarge, S., Dubreuil, P., Mini, A., Deswarte, J.-C., Beauchêne, K., Le Gouis, J., Praud, S., 2019. Using environmental clustering to identify specific drought tolerance QTLs in bread wheat (T. aestivum L.). Theor Appl Genet 132, 2859–2880. https://doi.org/10.1007/s00122-019-03393-2

Ugarte, C., Lacoste, M., Duparque, A., Martin, D., Lamandé, M., Métais, P., 2024. Evaluation of the accuracy of Terranimo ® in predicting the risk of soil compaction for agricultural operations carried out under the pedoclimatic conditions of northern France, in: ISTRO 2024. Presented at the ISTRO 2024, Virginia Beach.

Ugarte Nano, C., Cousin, I., Lamandé, M., Martin, D., Lacoste, M., Giot, G., Métais, P., 2021. J-DISTAS: Creation of interoperable tools for the estimation of field readiness. Presented at the Eurosoil 2021, Genève. https://doi.org/10.1111/sum.12340)

Wong, T.-T., 2015. Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation. Pattern Recognition 48, 2839–2846. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.03.009

Pour citer cet article : Pascale Metais, Nicolas Rogier, Marine Lacoste, Pierre Dul, Thomas Leborgne, *et al*.. J-DISTAS : construction d'un outil de calcul des jours disponibles pour les grandes cultures. Innovations Agronomiques, 2025, 107, p. 421-440. 10.17180/ciag-2025-vol107-art30

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

DEXINNOV : une analyse de l'innovation produit en horticulture de l'amont de la filière à l'aval, jusqu'à sa perception par le consommateur

Anne-Laure LAROCHE[1], Allan MAIGNANT[1], Ronan SYMONEAUX[2], Gaëlle PANTIN-SOHIER[3], Caroline WIDEHEM[4], Imène BELBOULA[1,2]

[1] ASTREDHOR, 44 rue d'Alésia, TSA51446, F-75158 Paris Cedex 14, France

[2] GRAPPE, ESA, USC 1422 INRAE, SensoVeg, SFR 4207 QUASAV, 55 rue Rabelais, 49000 Angers, France

[3] Université d'Angers, 13 allée François Mitterrand - BP 13 633 | 49036 Angers cedex 01, France

[4] Institut Agro Rennes-Angers, 2 rue André Le Nôtre, F-49045 Angers cedex 01, France

Correspondance : anne-laure.laroche@astredhor.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol107-art31

Résumé

La stratégie d'innovation des acteurs de la filière horticole ornementale repose principalement sur un modèle dit « *technology push* » : c'est-à-dire que les innovations sont développées par la R&D, le marketing intervenant à la fin du processus. Malgré ses avantages, ce modèle gagnerait à intégrer le comportement des consommateurs en amont (stratégie dite « market pull »). Dans le projet DEXINNOV, les chercheurs ont concilié les deux approches en identifiant les freins et les leviers de chacun des maillons de la chaine de valeur au développement d'un produit horticole innovant d'une part, et d'autre part en caractérisant le comportement des consommateurs urbains face à une innovation horticole. Des enquêtes auprès des acteurs de la filière horticole nous ont conduits à caractériser le positionnement des acteurs de la production et de la distribution vis-à-vis de l'innovation horticole. Puis des enquêtes qualitatives et quantitatives ont permis de mieux comprendre la perception qu'ont les consommateurs de l'innovation horticole et de proposer un modèle intégrateur de la perception de l'innovation horticole nommé « Ornemental plant innovation acceptance model » (OPIAM) adapté du modèle Technology acceptance model (TAM).

Mots-clés : innovation, perception du consommateur, horticulture, modèle d'acceptation des technologies

Abstract: DEXINNOV: an analysis of horticultural product innovation, from the floriculture industry to the consumer perception

The strategy of innovation of the ornemental sector rely on a « » *technology push »* model. New products are developped by R&D services, while marketing services come in at the end of the innovation process. Despite of the benefits of this model, the ornemental sector would benefit from including consumer behaviour upstream in a « market pull » strategy. In the DEXINNOV research program, researchers tried to reconcile both strategies (market pull and technology push) by characterising the behaviour of urban consumers towards horticultural innovation, and by identifying the obstacles and levers for each player in the development of an innovative horticultural product. Economic agents were interviewed to describe the positionning of ornemental producers and distribution about product innovation. Qualitative and quantitative surveys were then used to gain a better understanding of consumers' perceptions of horticultural innovations and to propose an integrative model of the perception of horticultural innovation called « Ornemental plant innovation acceptance model » (OPIAM), adapted from the Technology Acceptance Model.

Keywords: innovation, ornemental horticulture, consumer perception, technology acceptance model

1. Introduction

Les aires urbaines regroupent aujourd'hui la majorité des consommateurs potentiels de plantes ornementales (Hendricks 2020). La filière horticole française cherche à innover pour toucher les consommateurs urbains, en s'adaptant aux contraintes spécifiques du milieu urbain : croissance des plantes adaptées à des petits jardins ou à la culture en pots par exemple. Le développement de ces innovations ne va pas sans risque. Dans le cas de la filière horticole française, les risques sont principalement commerciaux. Le modèle d'innovation « *technology push* » (= poussée technologique - vers le marché) est majoritaire dans la filière horticole. Dans ce type de stratégie, l'innovation est conçue par les services de recherche et développement des acteurs de la chaine de valeur d'un produit horticole. De manière tangible, il s'agit du développement de nouvelles variétés végétales, du développement de nouveaux concepts commerciaux, de la mise au point de gammes de plantes etc., qui sont ensuite envoyées (ou poussées/*push*) sur le marché. Un second type de stratégie d'innovation permet de répondre en partie aux contraintes de la stratégie « *technology push* ». Il s'agit de la stratégie « *market pull* » (= tirée par le marché), peu pratiquée dans la filière horticole française. Dans la configuration « *market pull* », la genèse de l'innovation et son appropriation dépendent pleinement des attentes et du comportement des consommateurs. Ce sont ainsi les attentes et les comportements des consommateurs qui viennent régir la conception de l'innovation (Badillo, 2013).

Comment mieux intégrer les attentes des consommateurs dans le développement des innovations horticoles ? Le projet de recherche DEXINNOV est né du constat que les connaissances sur le comportement du consommateur face à une innovation étaient quasi-inexistantes dans la filière horticole (Pantin-Sohier, 2018). Dans ce projet, nous avons cherché à concilier les deux approches « *technology push* » et « *market pull* ». Les freins et les leviers au développement d'un produit horticole innovant par les acteurs de la filière ont été analysés. En parallèle, nous avons caractérisé le comportement des consommateurs urbains face à une innovation horticole.

2. Le positionnement des acteurs de la chaine de valeur d'un produit horticole destiné au marché urbain vis-à-vis de l'innovation

2.1. Une définition partagée de l'innovation produit en horticulture

Au début du projet DEXINNOV, il n'existait pas de définition de l'innovation produit qui soit partagée par les différents maillons de la filière horticole. Ces derniers ont été sollicités pour établir cette définition, qui a été construite à l'aide de la méthode Delphi (Dalkey, 1963). Cette méthode d'intelligence collective demande de consulter individuellement différents experts de façon anonyme sur un même sujet, tout en garantissant la libre expression de chacun d'eux. En procédant par itérations, l'avis synthétisé des experts est remis en question par chaque expert individuellement. Cette méthode perm*et al*ors d'éviter les biais provoqués par les effets de groupe.

Les entretiens conduits avec une dizaine d'experts de la filière horticole nous ont amenés à définir ainsi une innovation horticole : **« celle qui apporte quelque chose de nouveau pour le consommateur : une nouvelle variété végétale, un nouveau mode d'utilisation du végétal ou/et un nouveau mode d'entretien ».**

Cette définition place le consommateur au cœur de l'innovation horticole. C'est le sens des travaux qui ont été menés pour mieux comprendre la perception des innovations par les consommateurs.

2.2. Le positionnement des entreprises de production vis à vis de l'innovation produit

2.2.1. Des difficultés à se positionner sur l'innovation produit

L'innovation, et en particulier l'acquisition de nouvelles variétés, est une des sources de création de valeur en production ornementale. Cela a été notamment montré pour la production de pépinière ornementale (Justin, 2009). Tous les ans, de nouvelles variétés de plantes ornementales sont proposées par les obtenteurs, mettant en avant de nouvelles formes ou de nouvelles couleurs de feuillages ou de fleurs. En 2023, 1032 nouvelles variétés à vocation ornementale ont accédé à une protection au niveau européen (CPVO 2024) dont environ 4 % ont été soumises par des entreprises françaises (Griesbach 2023).

En France, les entreprises de production spécialisées dans l'obtention de nouvelles variétés et la multiplication de jeunes plants sont peu nombreuses. La plupart des entreprises se sont spécialisées dans la culture de plants vendus à un stade plus avancé (Plottu, 2014). Cette « spécialisation verticale » se manifeste par une dépendance au marché international et en particulier vis-à-vis des Pays Bas pour l'approvisionnement en jeunes plants des entreprises françaises (Plottu, 2014).

Pour mieux comprendre le positionnement de la production horticole vis-à-vis de l'innovation, une enquête a été réalisée auprès de 32 producteurs français. Ceux-ci étaient installés dans la région Pays de la Loire et ne réalisaient pas de vente directe auprès des consommateurs. L'analyse des enquêtes montrent deux grands freins à l'innovation :

- la maitrise des savoir-faire : celle-ci apparait au travers de la question de la capacité d'intégration de l'innovation dans les systèmes de production actuels. Elle soulève des questions liées à la mécanisation, au matériel spécifique nécessaire. La notion de savoir-faire fait également appel aux compétences des opérateurs, en lien avec les difficultés actuelles de la production horticole à recruter de la main d'œuvre qualifiée ;
- la maitrise des couts : produire une innovation n'assure pas forcément la viabilité de l'entreprise et pose la question du positionnement prix du produit vis-à-vis de la clientèle. Les freins en matière de logistique, de livraison et donc de capacité à répondre aux exigences de la clientèle sur ce point ont été identifiés.

Parmi les leviers identifiés par les producteurs, le principal repose sur la structuration de la filière et la capacité des acteurs à travailler ensemble. Les outils développés par l'interprofession pour favoriser l'échange de connaissances sont ainsi perçus comme des leviers. Il est intéressant de noter que lors de l'enquête menée auprès des distributeurs (voir paragraphe suivant) ceux-ci-ont également identifié les échanges entre les maillons de la filière comme leviers à l'adoption et la diffusion des innovations.

2.2.2. Des innovations collectives dans le domaine du marketing

La filière horticole française est courte avec très peu de regroupement de l'offre. Les entreprises de production sont donc en prise directe avec les consommateurs. Ces dernières années, des acteurs de la production horticole, ont développé collectivement des marques visant à rassurer les consommateurs sur la qualité des plantes et donc potentiellement à leur (re)donner confiance sur leur capacité à maintenir en vie une plante (Fayolle, 2023 ; VALHOR, 2022).

Peu d'entreprises de production françaises peuvent assumer un rôle majeur dans la création variétale en ornement. Néanmoins, les producteurs français ont la capacité de proposer seuls ou en collectif des innovations marketing et commerciales, c'est à dire qui change la manière dont le produit est adressé au marché et aux clients (BPI France).

2.3. Une typologie des acteurs de la distribution selon leur positionnement par rapport à l'innovation horticole

Les acteurs de la distribution jouent un rôle central dans la chaine de valeur d'une innovation horticole en assurant la rencontre entre une innovation et les consommateurs urbains.

2.3.1. Des modèles innovants de commercialisation des produits horticoles en ville

Depuis plusieurs années les distributeurs de produits horticoles en ville évoluent. Les acteurs classiques que sont les jardineries et les fleuristes sont bousculés par le poids croissant des grandes surfaces alimentaires et de bricolage (VALHOR, 2024). Par ailleurs, le commerce en ligne a connu une croissance très importante post-Covid, avec le positionnement d'acteurs « pure players ».[20]

Au côté des circuits classiques et majeurs de distribution, de nouvelles formes de distribution se développent. Une analyse de la presse professionnelle nous a permis d'identifier ainsi plusieurs nouvelles formes de distribution spécifiques au milieu urbain.

L'ensemble des circuits de distribution identifiés sont représentés en Figure 1. Les distributeurs de la jardinerie, les fleuristes, la grande distribution alimentaire et les producteurs détaillants sont les acteurs majoritaires, avec 74 % des sommes dépensées par les foyers français en 2023 pour les achats de végétaux. Les magasins de bricolage, d'ameublement et la vente à distance sont des circuits secondaires (respectivement 3 % et 7 % des sommes dépensées) (VALHOR, 2024). Les nouveaux concepts urbains sont – *a priori*- minoritaires, mais nous les avons intégrés avec cette étude, leur positionnement par rapport à la clientèle venant bousculer le modèle classique de la filière.

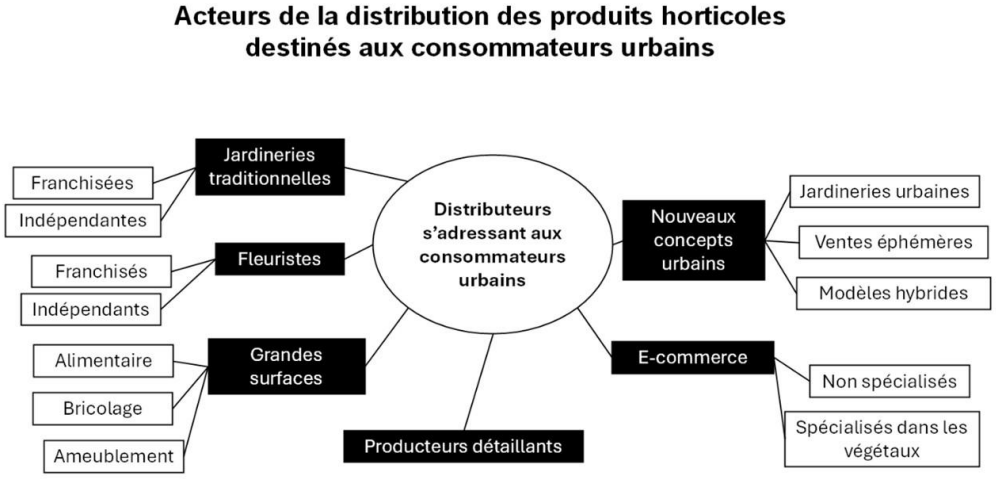


Figure 1 : Typologie d'acteurs de la distribution des produits horticoles en ville

Ces nouveaux modes de distribution sont des innovations elles-mêmes dans la façon de commercialiser les plantes auprès des urbains :

- les jardineries urbaines se définissent comme des lieux de ventes pour les plantes, y compris plantes d'extérieur, situées dans de petits magasins de centre-ville. Elles se distinguent des fleuristes ayant une offre centrée sur les fleurs coupées et la plante d'intérieur cadeau[21] ;

[20] Voir par exemple : Anjou Agricole 2020. Quand les plantes prennent la voie du net. Consulté le 21 octobre 2024 https://www.anjou-agricole.com/quand-les-plantes-prennent-la-voie-du-net

[21] Voir par exemple : Floramédia, 2022. La jardinerie urbaine, un concept qui répond aux nouvelles attentes consommateurs. Consulté le 3 décembre 2024 sur **https://floramedia.fr/tendance-jardineries-urbaines-commerce-proximite/**

- les acteurs « hybrides » commercialisent à la fois des plantes et un service ou un produit complètement différent : par exemple un salon de thé, un coiffeur, une librairie[22] ;
- les ventes éphémères de plantes se déroulent pendant quelques heures ou quelques jours, le recrutement des consommateurs ayant lieu essentiellement via les réseaux sociaux. Les lieux de vente sont originaux et facilement accessibles en centre-ville (Pitrel, 2028). Sur le marché horticole, les ventes éphémères ont été une innovation. Innovation d'organisation d'abord avec des ventes de courte durée sur des lieux qui n'y sont habituellement pas dédiés, s'accompagnant d'une innovation sur le modèle d'affaires, les coûts étant liés à l'approvisionnement de plantes en gros et à la location ponctuelle de locaux vacants, et le besoin en main d'œuvre ponctuel. Il s'agit aussi d'une innovation marketing par une communication centrée sur les réseaux sociaux attirant une clientèle jeune et novice en jardinage. Une des activités clés est de savoir créer le buzz et donner le sentiment d'urgence.

2.3.2. Trois modèles de distributeurs par rapport à l'innovation horticole

Un travail d'enquête a été réalisé auprès d'acteurs de la distribution horticole sous forme d'entretiens semi-directifs, l'objectif étant d'identifier les leviers et les freins à l'innovation en horticulture ornementale. En juillet 2021, 23 entreprises ont été auditées : jardineries urbains, modèles hybrides, jardineries franchisées et indépendantes, fleuristes franchisés et indépendants, producteurs détaillants et e-commerce. Cependant, faute de temps disponible, les GMS, GSA et GSB (grandes et moyennes surfaces, grande surface alimentaire, grande surface de bricolage) n'ont pas été contactées. En raison du contexte sanitaire lié à la crise COVID, les ventes éphémères et les ventes évènementielles ont été annulées et les acteurs n'ont pas pu être interviewés.

En parallèle, nous avons décrit à dire d'experts les acteurs de la distribution des produits horticoles. Chaque type de distributeur a été caractérisé en utilisant un Business model canvas (BMC) qui résume son modèle économique en neuf composantes. Les comparaisons des composantes du BMC entre les différents types de distributeurs a permis de mettre en évidence quelques points saillants relatifs au modèle économique de chaque distributeur.

Trois grands modèles de distributeurs ont été identifiés en fonction de leur positionnement sur le marché urbain et par rapport à l'innovation :

- le type « Grandes surfaces » se caractérise par un modèle contraint structurellement : peu flexible, exigeant des logistiques amont et aval gourmandes en volumes d'heures de travail et de matières, plutôt synonymes de stratégies « Coût-volume ». Ce modèle dispose cependant d'une forte capacité financière lui permettant de tester de nouveaux produits/concepts et de communiquer à grande échelle via tous les moyens disponibles (site internet, télévision, radio, flyers, catalogues…). La proximité avec les clients passe par l'expertise des vendeurs. Il intègre les jardineries et la grande distribution. Ce type de distributeurs dispose des moyens suffisants pour imposer une marque susceptible de devenir un repère solide pour les consommateurs et envisager ainsi le lancement de nouveautés à moindre risque (Pantin-Sohier, 2018) ;
- le type « e-Commerce et événementiel » repose sur une logistique sans faille incluant les flux intenses de communication sur lesquels il s'appuie. Il s'agit d'un modèle à forte flexibilité qui n'existe que par son pouvoir de séduction envers les différentes cibles de clientèle visées. Ce modèle est très distant des attentes du client. Il n'y a pas ou peu de conseil, et celui-ci n'est pas personnalisé. Le modèle « e-Commerce et événementiel » regroupe les acteurs pure-players du jardin et de la fleur coupée et les acteurs des ventes éphémères et des ventes

[22] Voir par exemple : Samson 2020. À la Végétalerie, on pourra boire un thé et acheter des plantes. Consulté en ligne le 3 décembre 2024 sur https://www.letelegramme.fr/cotes-d-armor/saint-brieuc-22000/a-la-vegetalerie-on-pourra-boire-un-the-et-acheter-des-plantes-3680859.php

évènementielles de plantes. Les innovations horticoles poussées par ce type de distributeurs sont portées par leur désirabilité sociale ;

- le type « détaillant » est un modèle contraint par des disponibilités financières fragiles et des surfaces de vente modestes mais qui est très flexible : les nouveautés y sont facilement les bienvenues. La communication se fait plutôt de « bouche à oreilles », via un éventuel site internet et par la devanture. Ce modèle regroupe tous les commerces de centre-ville : fleuristes, jardineries urbaines, lieux de vente hybride mais également les producteurs détaillants. La proximité avec les clients est au cœur de leur proposition de valeur. La personnalisation de l'offre et des conseils permet de diminuer le risque perçu face à une nouveauté et de rassurer les consommateurs.

2.4. Une cartographie des acteurs

Le travail d'analyse du positionnement des acteurs de la filière horticole vis-à-vis de l'innovation produit a permis de construire une cartographie des acteurs de la filière horticole impliqués dans la chaine de valeur d'un produit horticole urbain (Figure 2). Elle identifie le rôle tenu par chaque type d'acteurs de la filière vis à vis des innovations horticoles. Le positionnement des acteurs BtoB (commerce d'entreprise à une autre entreprise) n'a pas été analysé dans le cadre de ce travail.

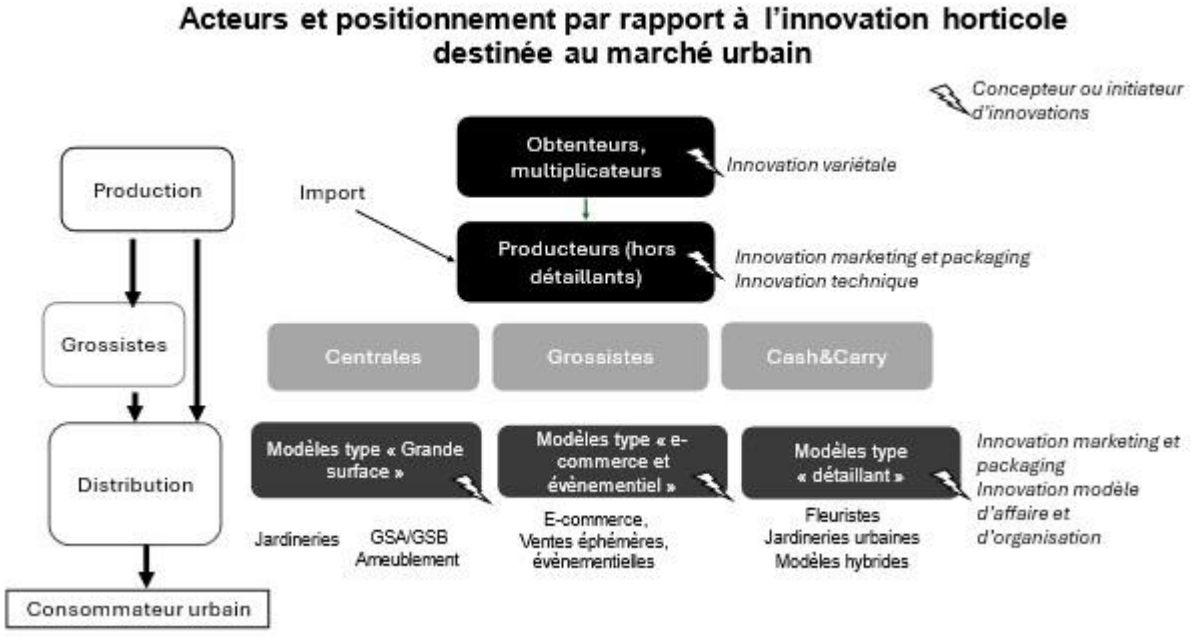


Figure 2 : Cartographie des acteurs impliqués dans la chaine de valeur d'un produit horticole destiné au marché urbain et leur positionnement vis-à-vis de l'innovation

3. La caractérisation du comportement des consommateurs face à une innovation horticole

3.1. De l'importance d'étudier la perception des innovations dans le secteur horticole

La littérature scientifique portant sur l'innovation s'intéresse en majeure partie au processus de diffusion de l'innovation avec l'objectif de répondre aux questions suivantes : qui sont les consommateurs qui adoptent ? Pourquoi certains produits sont adoptés et d'autres rejetés ? L'un des éléments de réponse réside dans le degré d'innovation d'un produit. Plus il est élevé, plus cela génère chez le consommateur

de l'incertitude sur l'utilité et la complexité de l'innovation (Hoeffler, 2003) et donc une résistance à son adoption (Ram et Sheth, 1989). En d'autres termes, s'il a l'impression de prendre un risque en l'achetant (économique, social, fonctionnel ou physique), s'il se demande s'il va réussir à s'en servir, s'il se dit que son utilisation va d'abord nécessiter une phase d'adaptation comportementale (modifier ses habitudes) ou encore si le produit ne correspond pas à ses schémas de croyance, la propension à rejeter le produit va s'accroître (Ram et Seth, 1989).

L'adoption d'une innovation ne dépend pas que des caractéristiques objectives du produit mais aussi du consommateur. Plus il va percevoir le produit comme nouveau, possédant des avantages que les autres alternatives n'ont pas (Rogers, 2003) et une technologie qui lui est inconnue (Lowe *et al*pert, 2015), plus il va percevoir le produit comme innovant. La perception est un mécanisme cognitif, qui nous permet d'interpréter les différents stimuli sensoriels qui nous entourent, à travers le prisme de ce qu'ils déclenchent en nous et de qui nous sommes. Il est donc nécessaire de prendre en compte le point de vue du consommateur (Hernard *et al*., 2001 ; Gourville, 2006), car influencé par ses propres motivations, il va alors percevoir l'innovation à sa manière et ensuite déclencher une envie de l'adopter ou non. A notre connaissance, la plupart des études portent sur des produits manufacturés (Alexander *et al*., 2008 ; Herzenstein *et al*., 2007 ; Hoeffler, 2003), nécessitant une exploration spécifique pour le végétal d'ornement. Par ailleurs, les modèles dominants d'adoption des innovations ont traditionnellement négligé le rôle des émotions, malgré l'importance de ce concept dans la prise de décision des consommateurs. Néanmoins, un courant notable de recherche sur les émotions dans l'adoption de l'innovation a vu le jour ces dernières années qui permet d'enrichir notre compréhension de la psychologie de l'adoption de l'innovation (Valor *et al*., 2022).

Le rôle des émotions est d'autant plus pertinent à intégrer que le végétal occupe une place importante dans la vie des français. Il contribue au bien-être, sa présence dans leur quotidien est source d'affects positifs et agréables (VALHOR, 2021). Il possède une valeur symbolique, lorsqu'il est offert, acheté pour des occasions ou pour se faire plaisir, il contribue à véhiculer des messages et des émotions. Il se noue une relation anthropomorphique avec le végétal où le sujet l'humanise par attribution de certains traits de personnalité et où il se préoccupe du mal qu'il peut lui faire (Jacquemier et Pantin-Sohier, 2018 ; Pantin-Sohier *et al*., 2018). Sa valeur esthétique, véhiculée par ses différentes entrées sensorielles (couleur, forme, taille, odeur, etc.), est un facteur prédominant dans la décision d'achat (Klingeman *et al*., 2004 ; VALHOR, 2011). En effet, la qualité de la plante est l'une des caractéristiques les plus importantes pour le consommateur (Behe et Barton, 2000), et il va l'évaluer au travers de ses attributs intrinsèques (Townsley-Bascramp et Marr, 1995). Pour Behe *et al*. (2014), cela peut s'expliquer par une faible présence d'attributs extrinsèques autour de la plante : packaging minimaliste, peu de marques, étiquette avec des informations succinctes (si présentes) et pas toujours compréhensibles pour le consommateur.

D'après la théorie d'Olson (1972, 1978), le sujet recueille des informations issues de son environnement pour les utiliser et prendre une décision. Behe *et al*. (2014), Rihn *et al*. (2016), et Yue *et al*. (2011) ont validé cette théorie en montrant que certains attributs extrinsèques tels que le prix, la méthode de production, l'origine du produit ou encore la composition du pot sont également des informations qui impactent les préférences et les comportements d'achat des consommateurs dans le végétal. Il semble essentiel de poursuivre ces investigations en vue de saisir les attentes des consommateurs et leurs éventuelles évolutions.

Enfin, il convient de distinguer l'intention du comportement en matière d'adoption de l'innovation. En effet, Arts *et al*. (2011) montrent que les consommateurs ont davantage l'intention d'adopter les innovations qui sont plus complexes, qui correspondent mieux à leurs besoins et qui comportent moins d'incertitude. Toutefois, on constate que les consommateurs adoptent en réalité des innovations moins complexes et présentant des avantages relatifs plus importants. Ce décalage entre intention et comportement permet d'adapter l'offre à la demande en ne surestimant pas les intentions.

3.2. Deux études qualitatives exploratoires pour poser les bases définitionnelles de l'innovation du point de vue du consommateur

Une première étude exploratoire a été menée via un questionnaire en ligne. Ce questionnaire comportait deux phases : la première visait à caractériser l'innovation dans le secteur du végétal d'ornement en demandant aux participants de sélectionner les critères définissant une innovation et de décrire ce qu'ils considéraient comme une innovation dans ce domaine. La deuxième phase présentait trois produits différents pour évaluer leur perception de l'innovation et son intensité. Les produits incluaient une orchidée pigmentée, une plante issue de greffage adaptée aux espaces restreints et un emballage biodégradable. L'échantillon comprenait 54 participants, majoritairement urbains, recrutés en mai 2020. Les résultats se sont appuyés sur un traitement statistique pour les questions fermées et des données textuelles pour les questions ouvertes, analysées selon les recommandations de Bardin (2001) et Gavard-Perret *et al*. (2012).

Il ressort de cette première étude que le fait que le produit puisse posséder des avantages par rapport à d'autres alternatives est le critère le plus important pour définir une innovation. Le deuxième critère le plus retenu est de n'avoir jamais vu le produit jusqu'à présent. Enfin, la perception d'une nouvelle technologie en lien avec le produit est un critère d'innovation pour de nombreux consommateurs. À la question « Qu'est-ce qui serait pour vous une innovation dans un produit végétal ? », les réponses des participants s'articulent autour de trois dimensions principales. Tout d'abord, l'innovation pourrait porter sur les caractéristiques intrinsèques des plantes, telles que leur esthétique avec des couleurs ou des formes inédites, ou encore l'introduction de nouvelles variétés, comme des variétés hybrides ou résistantes aux nuisibles. Certains évoquent également des plantes dotées d'une utilité accrue, comme des vertus thérapeutiques ou dépolluantes, susceptibles de révéler des bienfaits encore méconnus. Ensuite, la simplicité d'entretien constitue un critère central : des plantes capables de s'auto-entretenir ou nécessitant peu d'efforts séduisent particulièrement. Enfin, une forte attente est exprimée autour de la naturalité et de la durabilité. Les participants souhaitent des produits exempts de produits chimiques, respectueux de l'environnement et utilisant des emballages biodégradables. Ces réponses reflètent une aspiration globale à des innovations qui allient esthétique, praticité et conscience écologique.

Pour aller plus loin, quatre groupes de discussion (n=33) ont été réalisés. Pour cette étude, la cible était des "jeunes urbains", recrutés selon les critères suivants : vivre en ville, être majeur et avoir moins de 60 ans, avoir fréquenté une jardinerie et acheté des plantes au cours des 12 derniers mois. Après une discussion autour de la définition d'une « plante innovante », plusieurs propositions de produits innovants ont été présentées aux participants (Figure 3) pour les faire réagir sur des produits concrets.

L'analyse a révélé que le terme "nouveau" est au cœur des discours des participants quand on les questionne sur les innovations dans la plante d'ornement. Cette nouveauté peut concerner la diversité des variétés avec l'introduction de nouvelles espèces, apportant une diversification des attributs sensoriels comme la palette de couleurs, la variation de forme. Les consommateurs mentionnent également l'adaptation des plantes aux contraintes externes comme une source d'innovation. Une plante innovante serait multi-résistante (maladies, sécheresse, etc.) et conçue pour mieux s'intégrer dans leur mode de vie et leur culture. L'innovation devrait donc apporter une valeur ajoutée perceptible aux participants, avec des avantages esthétiques et fonctionnels, ainsi que des économies de temps et d'espace.

L'analyse du discours met donc en lumière deux dimensions principales : la nouveauté perçue et l'avantage relatif (Lowe *et al*pert, 2015 ; Davis, 1989). Un produit est caractérisé comme innovant lorsque les participants le perçoivent comme nouveau, original ou différent. Cette perception est basée sur une comparaison avec leurs expériences passées et la catégorie de base à laquelle ils associent le produit. Inversement, lorsque le produit est déjà connu ou introduit "un simple changement de couleur", il n'est pas perçu comme nouveau et donc innovant. Deuxièmement, les produits sont comparés pour déduire leurs avantages. En particulier, lorsqu'ils sont combinés, les participants trouvent le produit

innovant. Cela concerne notamment les plantes qui combinent les aspects ornementaux *et al*imentaires, offrant une double utilité perçue comme une valeur ajoutée.

La nouveauté technologique a également été mentionnée, mais certains participants ont exprimé des réserves, questionnant l'utilité d'ajouter des aspects esthétiques à une plante aromatique ou potagère. Contrairement à ce que nous avons observé dans l'évocation spontanée autour de l'innovation, nous avons trouvé des verbatims liés au changement d'usage induit par le produit lors de la présentation (sur photo) de plusieurs innovations. Si l'utilisation et l'entretien de la plante diffèrent de ceux des usages communs, celle-ci peut être considérée comme innovante.

Les résultats montrent également que certaines innovations impactent fortement les émotions des participants qui utilisent des verbatims hédoniques avec des valences extrêmes. Enfin, certains extraits du corpus faisaient référence au risque perçu associé à certaines plantes.



Figure 3 : Six des douze innovations testées auprès des groupes de discussion lors du projet Dexinnov (crédits photos : Agrumes de Méditerranée, Thompson&Morgan, Hishtil, ASTREDHOR, Pots&Petals, Turn It Tropical)

3.3. Une enquête quantitative pour tester une proposition d'un modèle d'acceptation des innovations en plantes d'ornement (OPAIM)

Pour aller plus loin, une étude quantitative a été réalisée pour approfondir la compréhension des consommateurs concernant les facteurs influençant l'acceptation et le rejet des plantes ornementales innovantes en se basant sur un modèle comportemental. Le modèle TAM (Technological Acceptance Model) a été développé pour prédire l'adoption et l'utilisation individuelle des nouvelles technologies de l'information (Venkatesh et Davis, 2000). Il postule que l'intention comportementale d'un individu à utiliser une nouvelle technologie est déterminée par deux croyances : l'utilité perçue, définie comme le degré auquel une personne croit que l'utilisation d'une IT (*Information Technology* : Technologies de l'information) améliorera sa performance, et la facilité d'utilisation perçue, définie comme le degré auquel une personne croit que l'utilisation d'une IT sera sans effort (Davis, 1989).

Ces deux composantes étant également présentes dans les résultats des deux approches qualitatives précédentes (utilité perçue, utilité d'usage ou d'entretien), il a été proposé d'adapter le modèle TAM enrichi des autres composantes issues de ces deux étapes préliminaires. Ainsi, le modèle a été

augmenté avec les composantes : Nouveauté perçue, Affect, Risque perçu et Influence Sociale (Figure 4).

Ce nouveau modèle OPIAM - Ornamental Plants Innovation Acceptance Model - a été testé auprès des 1069 répondants français avec une répartition équilibrée selon le genre, l'âge et la région d'origine. De plus, il a été décidé de sélectionner une moitié de consommateurs ayant acheté des plantes au moins une fois depuis deux ans.

Les résultats montrent que, malgré l'ajout de variables exogènes, la différence de niveaux de variance entre l'utilité perçue (PU) et la facilité d'utilisation perçue (PEOU) est cohérente avec le modèle TAM d'origine. Ainsi, la PU est le prédicteur le plus puissant de l'attitude et de l'intention comportementale (PI). Cela indique également que la perception de la facilité d'utilisation l'emporte sur la nouveauté du concept. Les résultats démontrent que le risque perçu influence chaque catégorie de variable et a une influence favorable sur la PU et la PEOU. De plus, les résultats montrent que les processus cognitifs et affectifs sont d'importants prédicteurs des attitudes et des intentions comportementales. Ces résultats montrent que le modèle OPIAM testé empiriquement constitue une base solide pour mesurer l'acceptation des innovations ornementales et identifier les principaux facteurs déterminants. Des travaux complémentaires seront néanmoins nécessaires pour étudier le poids des variables modératrices (âge, genre, expertise…) sur les comportements face aux innovations ornementales. Il serait également intéressant d'ajouter des variables comme la néophobie qui n'ont pas été testées dans ce modèle. De plus, ce modèle a été testé sur la base de la présentation de 6 nouveaux produits (Figure 3). Il sera nécessaire d'en mesurer la performance en intégrant d'autres innovations.

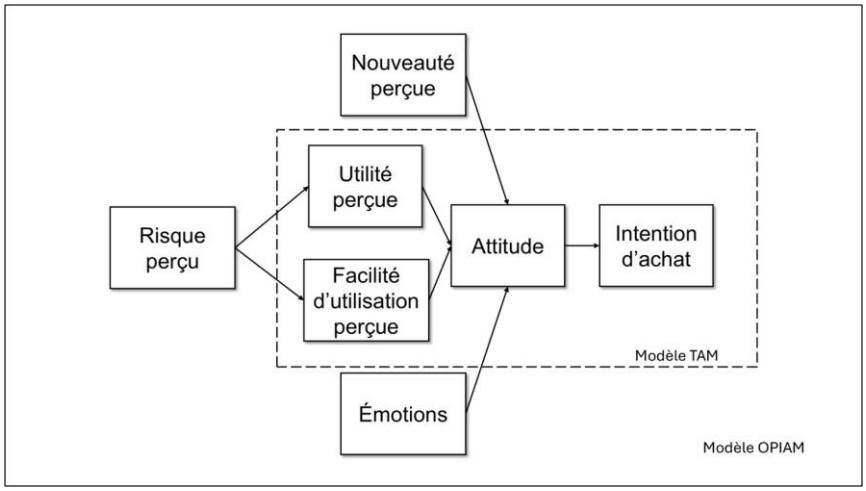


Figure 4 : Schéma du modèle OPIAM

4. Conclusion

Plusieurs dimensions entrent en considération dans la perception des innovations horticoles par les consommateurs. Les travaux menés dans le cadre du projet DEXINNOV invitent les acteurs de la filière à prendre en compte ces multiples dimensions dans la mise en avant des nouveautés horticoles. La dimension émotionnelle fait appel à des représentations symboliques, aux souvenirs et nostalgie conférés par le végétal, à la sensation de bien-être. La création d'espaces immersifs ou un travail sur le storytelling peuvent améliorer la mise en avant de nouveautés en sollicitant cette dimension. En ce qui concerne la dimension fonctionnelle, les communications sur des gammes de plantes « pratiques et faciles » ou « prêtes à consommer » sont donc plus pertinentes. Les services écosystémiques rendus par les plantes pourraient être plus valorisés faisant également appel à cette dimension fonctionnelle.

La diversité du monde végétal (formes, couleurs) rend complexe la question de la perception de l'innovation par le consommateur, mais ouvre aussi le champ des possibles pour la filière. Le projet DEXINNOV a mobilisé des outils de recherche qui étaient jusqu'alors peu voire pas utilisés par la filière horticole française. D'autres outils et méthodes existent qui enrichiraient les résultats obtenus par ce travail, par exemple l'oculométrie ou le marketing sensoriel.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Ronan Symoneaux : https://orcid.org/0000-0001-6792-8629

Gaelle Pantin-Sohier : https://orcid.org/0000-0002-5388-9187

Contributions des auteurs

Anne-Laure Laroche : contribution à la conceptualisation, à la méthodologie, à l'acquisition et à l'analyse des données, à la rédaction de l'article.

Allan Maignant : contribution à la conceptualisation, à la méthodologie, à l'acquisition et à l'analyse des données, à la rédaction de l'article, à la recherche de fonds, à l'administration du projet.

Ronan Symoneaux : contribution à la conceptualisation, à la méthodologie, à l'acquisition et à l'analyse des données, à la rédaction de l'article, à la recherche de fonds.

Gaëlle Pantin-Sohier : contribution à la conceptualisation, à la méthodologie, à l'acquisition et à l'analyse des données, à la rédaction de l'article, à la recherche de fonds.

Caroline Widehem : contribution à la conceptualisation, à la méthodologie, à l'acquisition et à l'analyse des données.

innovations agronomiques

n°107 / Novembr

Développement Agricole
Rural
Innovation
Partenariat
Recherche Technologique

Ce numéro traite de résultats de projets lauréats en 2019 de l'appel à projet CASDAR (Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural), «Innovation et Partenariat» et «Recherche Technologique. Ces projets sont financés par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire.

31 projets qui traitent de systèmes agricoles plus durables, de bien-être animal : repenser les pratiques pour des élevages plus respectueux, de sécurité sanitaire : nouvelles méthodes pour maîtriser les risques, de méthodes d'évaluation pour





Imène BELBOULA : contribution à la conceptualisation, à la méthodologie, à l'acquisition et à l'analyse des données.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient Naïs Segond pour sa contribution au projet DEXINNOV sur la perception des innovations par les consommateurs.

Déclaration de soutien financier

Le projet DEXINNOV a été cofinancé par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire avec la contribution financière du Compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR et par l'interprofession VALHOR.

Références bibliographiques

Alexander D.L., Lynch J.G., Wang G., 2008. As time goes by: Do cold feet follow warm intentions for really new versus incrementally new products? Journal of Marketing Research, 45, 3, 307-319.

Arts J. W., Frambach R. T., Bijmolt T. H., 2011. Generalizations on consumer innovation adoption: A meta-analysis on drivers of intention and behavior. International Journal of Research in Marketing, 28(2), 134-144.

Badillo P.-Y., 2013. Les théories de l'innovation revisitées : une lecture communicationnelle et interdisciplinaire de l'innovation ? Du modèle « Émetteur » au modèle communicationnel. Les Enjeux de l'information et de la communication, n° 14/1(1), pp. 19–34.

Bardin L., 2001. L'analyse de contenu, Paris, PUF.

Behe B.K., Barton S., 2000. Consumer perceptions of product and service quality attributes in Six U.S. States, Journal of Environmental Horticulture, 18, 2, 71-78.

Behe B.K., Campbell B.L., Hall C.R., Khachatryan H., Dennis J.H., Yue C., 2014. Consumer preferences for local and sustainable plant production characteristics, HortScience, 48, 2, 200-208.

Bpifrance. INNOVATION NOUVELLE GÉNÉRATION. 66p. Consulté le 21 octobre 2024 en ligne sur https://www.bpifrance.fr/nos-solutions/innovation

CPVO 2024. CPVO annual statisitics Year 2023. 8p. https://cpvo.europa.eu/en/about-us/what-we-do/statistics

Dalkey N., Helmer O., 1963. An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts. Management Science, 9(3), 458–467.

Davis F.D., 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Quarterly, 13 (3), 319–340,

Fayolle P., 2023. Silence, ça pousse ! : une marque et désormais six fournisseurs. Consulté en ligne le 21 octobre 2024 sur : https://www.lienhorticole.fr/actualites/article/838766/silence-ca-pousse-une-marque-et-desormais-six-fournisseurs

Gavard-Perret M.L., Gotteland D., Haon C., Jolibert A., 2012. Méthodologie de la recherche en sciences de gestion, France, Pearson.

Gourville J.T., 2006. Eager sellers and stony buyers: Understanding the psychology of new-product adoption, Harvard Business Review, 84, 6, 98-106.

Griesbach I., 2023. International statistics flowers and plants 2023. Volume 71. International Association of Horticultural Producers. 238p.

Henard D.H., Szymanski D.M., 2001. Why some new products are more successful than others, Journal of Marketing Research, 28, 3, 362-375.

Hendricks J., Briercliffe T., Oosterom B., Treer A., Kok G., Edwards T., Kong H., 2020. Ornamental Horticulture, a Growing Industry? (Oxfordshire: International Association of Horticultural Producers).

Herzenstein M., Posavac S.S., Josko Brakus J., 2007. Adoption of new and really new products: The effects of self-regulation systems and risk salience, Journal of Marketing Research, 44, 2, 251-260.

Hoeffler S., 2003. Measuring preferences for really new products, Journal of Marketing Research, 40, 4, 406-420.

Jacquemier-Paquin L., Pantin-Sohier G., Lancelot Miltgen C., 2018. Conveying personality traits through product design for a symbolic product. No. hal-01990369.

Justin J., Boulay J., Geoffriau E., Widehem C., Muller P., 2009. Où se crée la valeur ? Une application de l'analyse de Porter aux filières du végétal spécialisé. Management & Avenir, n° 28(8), 177-195. https://doi.org/10.3917/mav.028.0177.

Klingeman W.E., *et al.*, 2004. Consumer survey identifies plant management awareness and added value of dogwood powdery mildew resistance HortTechnology, 14, 2, 275-282.

Lowe B., Alpert F., 2015. Forecasting consumer perception of innovativeness, Technovation, 45-46, 1-14.

Olson J., 1978. Inferential belief formation in the cue utilization process, Advances in Consumer Research, 5, 706-713.

Olson J., Jacoby J., 1972. Cue utilization in the quality perception process, Third Annual Conference of the Association for Consumer Research, 167-179.

Pantin-Sohier G., Pantin F., Sohier A., Jacquemier-Paquin L., Serhal R., 2018. Comprendre les conditions d'acceptation de l'innovation dans le secteur végétal : enjeux et implications. Gestion 2000, 35(4), 97-120.

Pitrel T., 2018. Belles Plantes. Society 88, 55-57.

Plottu B., Widehem C., 2014. Des stratégies individuelles gagnantes de spécialisation à l'anticipation et à la gestion collective des risques - l'exemple de la filière française du végétal d'extérieur d'ornement. Management & Avenir, 2014/7 N° 73, p. 15-32. DOI : 10.3917/mav.073.0015

Ram S., Sheth J.N., 1989. Consumer resistance to innovations: The marketing problem and its solutions, The Journal of Consumer Marketing, 6, 2, 5-14.

Rihn A., Khachatryan H., Campbell B., Hall C., Behe B., 2016. Consumer preferences for organic production methods and origin promotions on ornamental plants: Evidence from eye-tracking experiments. Agricultural Economics, 47, 1-10.

Rogers E.M., 2003. Diffusion of innovations (5ème édition), New York, USA, Free Press.

Townsley-Brascamp W., Marr N.E., 1995. Evaluation and analysis of consumer preferences for outdoor ornamental plants, Acta Horticulturae, 391, 199-206.

VALHOR 2021. Les français et le végétal. KANTAR pour FranceAgriMer et VALHOR. 83p.

VALHOR 2022. Le Label Rouge pour la filière horticole. Consulté en ligne le 16 décembre 224 https://www.valhor.fr/developper-votre-activite/nos-labels-et-certifications/label-rouge

VALHOR 2024. Les achats de végétaux par les Français en 2023. KANTAR pour FranceAgriMer et VALHOR. 95p.

Valor C., Antonetti P., Crisafulli B., 2022. Emotions and consumers' adoption of innovations: An integrative review and research agenda. Technological Forecasting and Social Change, 179, 121609.

Venkatesh V., Davis F.D., 2000. A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. Management science, 46(2), 186-204.

Yue C., Dennis J.H., Behe B.K., Hall C.R., Campbell B.L., Lopez R.G., 2011. Investigating consumer preference for organic, local, or sustainable plants, HortScience, 46, 4, 610-615.

Pour citer cet article : Anne-Laure Laroche, Allan Maignant, Ronan Symoneaux, Gaëlle Pantin-Sohier, Caroline Widehem, *et al*.. DEXINNOV : une analyse de l'innovation produit en horticulture de l'amont de la filière à l'aval, jusqu'à sa perception par le consommateur. Innovations Agronomiques, 2025, 107, pp. 441-453. 10.17180/ciag-2025-vol107-art31

CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.