



innovations agronomiques

n°112 / mai 2026



CASDAR 2020

Ce numéro met en lumière les résultats de projets lauréats de l'appel à projets CASDAR 2019 (Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural), dans les catégories « Innovation et Partenariat » et « Recherche Technologique ». Soutenus par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, ces projets portent des innovations concrètes et à fort impact pour le monde agricole, en apportant des solutions nouvelles aux enjeux techniques, économiques et environnementaux des filières.

/// Crédits photos : WEBER Jean / INRAE • BEAUMONT Eric / INRAE • NICOLAS Bertrand / INRAE
VASSEUR DELAITRE Gilles / INRAE • LOUCOUGARAY Grégory / INRAE



Innovations Agronomiques

Volume 112 – Mai 2026

CASDAR 2020

Ce numéro met en lumière les résultats de projets lauréats de l'appel à projets CASDAR 2020 (Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural), dans les catégories « Innovation et Partenariat » et « Recherche Technologique ». Soutenus par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, ces projets portent des innovations concrètes et à fort impact pour le monde agricole, en apportant des solutions nouvelles aux enjeux techniques, économiques et environnementaux des filières.

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 : Stephane Ingrand, Inrae – DS Agriculture ; Isabelle Litrico, DS Agriculture

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) : 978-2-7380-3027-6

ISBN (ePub) : 978-2-7380-3028-3

DOI : <https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol112>

Pour citer ce numéro : Collectif. Innovations agronomiques. CASDAR 2019, 2026, 112. [10.17180/innovagro-2026-vol112](https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol112)

Photos de couverture : WEBER Jean / INRAE ; BEAUMONT Eric / INRAE ; NICOLAS Bertrand / INRAE ; VASSEUR DELAITRE Gilles / INRAE ; LOUCOUGARAY Grégory / INRAE

Licence : 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

Développement agricole et rural d'innovations et de partenariats

Filières végétales

Grégory VÉRICEL, Aloïs ARTAUX, Pietro BARBIERI, Enguerrand BUREL, Joséphine DEMAY, Quentin GIRARD, Charlotte GLACHANT, Claire JOUANY, Morgan MAIGNAN, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE & Alain MOLLIER, 2026 - Mise au point de références pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée des cultures en Agriculture Biologique.
Innovations Agronomiques 112, 1-16

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art01>

Grégory VÉRICEL, Aloïs ARTAUX, Pietro BARBIERI, Enguerrand BUREL, Joséphine DEMAY, Quentin GIRARD, Charlotte GLACHANT, Claire JOUANY, Morgan MAIGNAN, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE & Alain MOLLIER, 2026 - Mise au point et adaptation d'indices de nutrition phosphatée pour différentes espèces de grandes cultures au contexte de l'Agriculture Biologique.
Innovations Agronomiques 112, 17-35

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art02>

Filières animales

Mélanie GOUJON, 2026 - Les parcours en élevage de monogastriques en agriculture biologique : un levier pour l'autonomie alimentaire ?
Innovations Agronomiques 112, 36-53

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art03>

Alice HOLVOET, Loïc VIGUIER, Enguerrand BUREL, Amélie CARRIÈRE & Natacha SAUTEREAU, 2026 - Caractérisation des pratiques culturales en grandes cultures – comparaison entre l'agriculture



biologique et l'agriculture conventionnelle.
Innovations Agronomiques 112, 54-68
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art04>

Jean-Louis POULET, Sébastien GUIOCHEAU, Florian DASSE & Anne-Lise JACQUOT, 2026 - Assurer la viabilité de la traite conventionnelle (non robotisée) par une approche multidimensionnelle.
Innovations Agronomiques 112, 69-85
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art05>

Marion KENTZEL, Isabelle LEGRAND & Hélène CHAMBAUT, 2026 - Produire de la viande bovine bio avec les veaux mâles du troupeau allaitant pour approvisionner la restauration collective locale : les modèles
Innovations Agronomiques 112, 86-99
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art06>

Laura WARIN, Auriane FOREAU, Laurine MESSENGER, Isabelle BOUVAREL, Elsa DELANOUE, Solenn FASSION, Maryse GUINEBRETIERE, Frédérique MOCZ, Clémence LESIMPLE, Félicie AULANIER, Ludovic CALANDREAU, Elisabeth DUVAL & Bertrand MEDA, 2026 - Stratégies d'amélioration du bien-être des poulets élevés en système standard.
Innovations Agronomiques 112, 100-114
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art07>

Développement agricole et rural de recherche technologique pour la compétitivité et la durabilité des filières de la production à la transformation

Filières végétales

Laure SOUCEMARIANADIN, Lionel BARGEOT, Jean-Yves CAHUREL, Bertrand LAROCHE, Sébastien MINETTE, Jean-Pascal MURE, Fiona OBRIOT, Anne-Sophie PERRIN, Joëlle SAUTER, Véronique STANGRET, Romain TSCHILLER & Matthieu VALE, 2026 - Utilisation des typologies de sols TypTerres pour améliorer le conseil agronomique.
Innovations Agronomiques 112, 115-128
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art08>

Laurent GLAIS, Melen LECLERC, Heiner DENZER, Christophe LANGRUME, Stéphane JUMEL, Christophe DARGIER, Philippe LATY, Philippe DOLO, Sébastien VAST, Sarah CARDON, François VERNEY, David DUPRÉ, Frédéric BOULARD, Loïc DANIEL, Maryse URVOY, Laura DEMEY & Yves LE HINGRAT, 2026 - Phénotyper par capteurs le Couvert végétal de la pomme de terre pour mieux lutter contre le virus Y : Projet CANOPY (2020-2025).
Innovations Agronomiques 112, 129-147
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art09>

Bruno NGALA, Ronan LE COINTE, Philippe LARROUDÉ, Florian MANCEAU, Jérémy CIGNA, Sylvain POGGI, Amandine MOLLET, Philippe DOLO, François VERHEGGEN & Yves LE HINGRAT, 2026 - Prévion du risque de dégâts causés par les taupins sur les pommes de terre, et stratégies de lutte durables.
Innovations Agronomiques 112, 148-174
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art10>

Cyrielle MASSON, Adeline PICOT, Flora PENSEC, Yohana LALOUM, Aude MORONVALLE, Marie-Neige HEBRARD, Marie BELAIR & Agnès VERHAEGHE, 2026 - Diversité, pathogénicité et origine des espèces de Botryosphaeriaceae dans les noyeraies en France.
Innovations Agronomiques 112, 175-187
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art11>

François VAN-MEERHAEGHE & Solenn BOURIEL, 2026 - Haies réunionnaises : biodiversité, services écosystémiques et pratiques de plantation.



Innovations *Agronomiques* 112, 188-197
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art12>

Xavier DELPUECH, Arnaud CHARLEROY & Pascal NEVEU, 2026 - Un centre de ressources numériques pour faciliter le partage et l'interopérabilité des données expérimentales dans la filière viticulture – œnologie.

Innovations *Agronomiques* 112, 198-207
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art13>

Marlène FAURE, Ryad BENDOULA, Faten AMMARI, Séverine MAUDEMAIN & Katell CREPON, 2026 - Détection des insectes ravageurs des grains dans les céréales : 1. Le potentiel de l'imagerie hyperspectrale.

Innovations *Agronomiques* 112, 208-221
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art14>

Marlène FAURE, Faten AMMARI, François CHAMBON, Séverine MAUDEMAIN & Katell CREPON, 2026 - Détection des insectes ravageurs des grains dans les céréales : 2. Performances de la Spectroscopie en Proche Infrarouge (SPIR) pour détecter et quantifier des insectes.

Innovations *Agronomiques* 112, 222-234
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art15>

Filières animales

Rachel GRAINDORGE, Camille BORTOLI, Léo KERAUDREN & Bruno PARIS, 2026 - Des outils numériques adaptés pour la surveillance, l'aide à la décision et le pilotage de systèmes de cultures agroécologiques diversifiés en territoires ultramarins.

Innovations *Agronomiques* 112, 235-248
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art16>

Diane BUISSON, Jean-Michel ASTRUC, Maxime BEN BRAIEK, Bertrand BOUFFARTIGUE, Fabien CORBIÈRE, Christel COUZY, Renée DE CREMOUX, Stéphane FABRE, Pierre MARTIN, Isabelle PALHIÈRE, Alain PINTON, Jérôme RAOUL, Silvia RODRIGUEZ-RAMILO & Gwénola TOSSER-KLOPP, 2026 - PRESAGE : Préparer la création d'un observatoire des anomalies génétiques en petits ruminants.

Innovations *Agronomiques* 112, 249-273
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art17>

Stéphanie LA CARBONA, Camille TOUTAIN, Xavier QUENTIN, Philippe CAMUSET, Juliette FAZILLEAU, Catherine CAZEAUX, Cécile LAITHIER, Maxime LE BLOND, Aurore WACHE-DUVACHELLE, Venceslas VILLIER, Loïc FAVENNEC, Romy RAZAKANDRAINIBE & Damien COSTA, 2026 - Parasite *Cryptosporidium* en élevage laitier touchés par la cryptosporidiose : probabilité de contamination du lait et pratiques à risque.

Innovations *Agronomiques* 112, 274-285
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art18>



Mise au point de références pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée des cultures en Agriculture Biologique

Grégory VERICEL¹, Aloïs ARTAUX², Pietro BARBIERI³, Enguerrand BUREL⁴, Joséphine DEMAY³, Quentin GIRARD⁵, Charlotte GLACHANT⁶, Claire JOUANY⁷, Morgan MAIGNAN⁸, Eve-Anna SANNER⁹, Matthieu VALE¹⁰, Alain MOLLIER¹¹

¹ ARVALIS, 31450 Baziège, France

² Chambre d'agriculture Pays de la Loire, 49105 Angers, France

³ Bordeaux Sciences Agro, UMR ISPA, 33175 Gradignan, France

⁴ ITAB, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

⁵ ARVALIS, 27170 Ecardenville-la-Campagne, France

⁶ Chambre d'agriculture de région Île de France, 77350 Le Mée-sur-Seine, France

⁷ INRAE, UMR AGIR, 31326 Castanet Tolosan, France

⁸ GAB des Côtes d'Armor, 22193 Plérin, France

⁹ CREABIO, 32000 Auch, France

¹⁰ AUREA AgroSciences, 45160 Ardon, France

¹¹ INRAE, UMR ISPA, 33140 Villenave-d'Ornon, France

Correspondance : g.vericel@arvalis.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art01>

Résumé

Face à la diminution significative des teneurs en P_2O_5 Olsen des sols agricoles français et plus particulièrement sur les parcelles en agriculture biologique (AB), il apparaît primordial d'outiller les agriculteurs afin de les aider à mieux anticiper les situations à risque. La méthode de diagnostic de référence pour les grandes cultures établie par le Comifer (Comité Français d'Études et de Développement de la Fertilisation Raisonnée) est mise en défaut en AB où le rendement des cultures semble assez peu affecté par de faibles teneurs en phosphore (P) des sols. Afin de faire progresser le diagnostic de carence en P en AB, une étude de la réponse des cultures AB à l'offre en P du sol a été réalisée. Elle a débouché sur une proposition de seuils de réponse à la disponibilité en P adaptés à l'AB, nettement inférieurs à ceux actuellement utilisés en agriculture conventionnelle (AC).

Mots-clés : phosphore, agriculture biologique, diagnostic de carence, analyse de terre

Abstract: Development of references for crops phosphorus nutrition diagnosis in organic farming

Due to the significant decrease in Olsen P_2O_5 observed in French soils and given that these levels are generally lower in plots managed using organic farming (OF), it is essential to raise awareness among OF farmers about diagnosing phosphorus (P) deficiency to help them better anticipate risky situations. The reference diagnostic method for field crops, as established by Comifer (French Committee for Sustainable Fertilization Study and Development), does not seem well adapted to OF because crop yields are relatively unaffected by low P levels in the soil. To improve P deficiency diagnosis in OF, a study of crops response to soil P supply in OF was carried out and led to the proposal for response to P



soil availability thresholds adapted to OF, significantly lower than those currently used in conventional agriculture.

Keywords: phosphorus, organic farming, deficiency diagnosis, soil analysis

1. Introduction

Longtemps considéré en agriculture biologique (AB) comme un enjeu secondaire par rapport à la nutrition azotée et à la gestion des adventices, le maintien de la fertilité des sols vis-à-vis du phosphore (P) fait partie aujourd'hui des préoccupations des agriculteurs engagés dans ce mode de production. En effet, une diminution significative des teneurs en P Olsen du sol a pu être observée sur près des deux tiers de la SAU en France entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020 (Lemerrier *et al.*, 2023) et ces teneurs dans les parcelles en AB sont en moyenne plus faibles que dans les parcelles en agriculture conventionnelle (AC) (Véricel *et al.*, 2025). De plus, en AB, l'utilisation d'engrais minéraux phosphatés solubles est interdite et les sources de phosphore disponibles sont plus limitées notamment pour les systèmes spécialisés en grandes cultures n'ayant pas ou peu accès à des effluents d'élevage (Fontaine *et al.*, 2019). De ce fait, la gestion de la fertilité phosphatée dans ces systèmes nécessite davantage d'anticipation qu'en AC où une carence peut être assez rapidement corrigée par l'utilisation d'engrais phosphatés solubles, de type superphosphates, qui contiennent du P très majoritairement disponible pour les plantes.

En grandes cultures, le raisonnement de la fertilisation phosphatée repose essentiellement sur la méthode de diagnostic du Comifer basée sur l'interprétation de teneurs en P du sol mesurées par une analyse de terre à l'aide d'un référentiel établi en système conventionnel (Comifer, 2019). Des seuils « d'impasse » (Timpasse) et de « de renforcement » (Trenforcement) y sont définis, par type de sol et par niveau d'exigence des cultures vis-à-vis du P, comme le niveau d'offre du sol en P respectivement au-delà duquel l'absence de fertilisation n'induit aucune perte sensible de rendement et en dessous duquel un apport de fertilisant à hauteur des exportations par la culture ne suffit pas à atteindre son rendement potentiel. En pratique, Timpasse correspond à la teneur en P du sol au-dessus de laquelle la perte de rendement observée en absence de fertilisation P ne dépasse jamais, dans la totalité des situations expérimentales explorées - soit une centaine d'essais P longue durée, 10 % du potentiel de rendement. Trenforcement est défini, quant à lui, comme la valeur de teneur en P au-delà de laquelle la perte de rendement observée pour un niveau de fertilisation égal aux exportations de P n'excède jamais 10 % du potentiel atteint pour un niveau de fertilisation deux à trois fois supérieur aux exportations.

Pourtant, bien souvent, le rendement des grandes cultures conduites en AB n'est pas ou peu affecté par de faibles teneurs en P des sols, même lorsqu'elles sont inférieures aux seuils de réponse établis dans cette méthode (Colomb *et al.*, 2013). En effet, dans ce contexte de production où l'usage d'intrants de synthèse est proscrit et limite très fréquemment le rendement des cultures, l'impact réel du P sur leur développement est difficile à évaluer car bien souvent une faible disponibilité du P est concomitante avec des limitations en d'autres éléments tels que l'azote (N). Dans ces conditions, le potentiel de production des cultures est plus faible qu'en AC et les besoins en P des couverts peuvent probablement être satisfaits par une offre du sol moindre. De plus, en raison de l'absence d'utilisation de fongicides et de plus faibles quantités de P apporté sous forme soluble, l'AB est plus favorable que l'AC à la colonisation de la rhizosphère par des mycorhizes (Oehl *et al.*, 2003 ; Gosling *et al.*, 2006 ; Garbaye, 2013) ce qui pourrait faciliter le prélèvement de P par les cultures (Dai *et al.*, 2014 ; Plassard *et al.*, 2015). Il est alors légitime de s'interroger sur la pertinence d'utiliser des référentiels établis en AC dans le contexte de l'AB pour lequel leur validité n'a pas été démontrée (Fontaine *et al.*, 2019).

L'objectif de cette étude est d'améliorer le diagnostic d'offre en P du sol, en se dotant de références adaptées au contexte de l'AB. Ceci revêt en effet un intérêt majeur pour gérer la fertilité phosphatée des sols en systèmes AB et assurer ainsi leur durabilité. Pour y parvenir, une **caractérisation de la**



réponse du rendement des cultures au niveau de disponibilité en P des sols en AB a été réalisée. Un objectif était de déterminer s'il existe des réponses spécifiques au P dans ce contexte de production, en interaction notamment avec la faible disponibilité en N du sol. Ceci devant permettre en outre de vérifier si les seuils de teneurs en P du sol utilisés dans la méthode du Comifer (2019) sont adaptés au contexte de l'AB ou s'il convient de choisir d'autres valeurs de seuils.

2. Matériels et méthodes

2.1. Essais « courbe de réponse au P » sur blé et maïs

Six essais « courbes de réponse » en micro-parcelles ont été conduits de 2021 à 2023 sur blé tendre et maïs dans une diversité de conditions pédoclimatiques afin de quantifier la réponse du rendement de ces deux cultures au statut P du sol dans des situations conduites en AB. Les parcelles retenues étaient conduites en AB depuis 2017 pour la plus récente et depuis 1990 pour la plus ancienne. Pour maximiser les chances d'observer une réponse au P des cultures, un objectif de teneur du sol en P Olsen inférieur à 20 mg de P_2O_5 / kg a été fixé pour le choix des parcelles (tableau 1). Ce choix a été motivé par l'observation antérieure à cette étude de situations en AB et en AC témoignant d'une absence de réponse à P du blé tendre malgré des teneurs en P du sol comprises entre Timpasse et Trenforcement (travaux d'Arvalis non publiés). A l'exception d'un essai mis en place seulement à l'automne 2022, les essais « courbe de réponse » ont été conduits pendant deux années consécutives sur la même parcelle afin de bénéficier en seconde année de la différenciation de disponibilité en P du sol initiée par les pratiques de fertilisation de la première année.

Tableau 1 : dispositifs expérimentaux et principales caractéristiques des sols au moment de l'implantation des essais. (« ND » : non déterminé)

Lieu	Cultures	Type de sol	pH eau	C org. g kg ⁻¹	C/N	P total	P Olsen mg P_2O_5 kg ⁻¹	P Org.
Auch (32)	Blé 2022 Blé 2023	Argilo-calcaire	8,5	11,2	7,4	1200	11,7	93
Coignières (78)	Blé 2022 Blé 2023	Limon	6,7	11,7	9,5	ND	19,9	166
Saint-Quentin-Les Anges (53)	Maïs 2022 Blé 2023	Limon-argilo-sableux	6,4	13,3	6,6	ND	17,2	285
Salvagnac (81)	Blé 2022 Maïs 2023	Argileux	8,3	13,4	8,5	1100	12,1	183
Seillac (41)	Blé 2022 Blé 2023	Limon-argileux	7,0	15,6	9,6	800	14,7	199
Marcilly s/ Tille (21)	Blé 2023	Argilo-limoneux	8,1	26,2	9,8	2200	17,9	480

Dans chaque essai, six doses d'apport de P ont été testées de manière à obtenir un gradient de disponibilité en P dans le sol et ainsi pouvoir étudier la réponse des cultures à ce facteur. De plus, pour évaluer l'influence de la fertilisation N sur la réponse à P en AB, ces modalités ont été croisées à deux niveaux de fertilisation N (tableau 2).

**Tableau 2** : plan expérimental croisant des doses de fertilisants organiques P et N

		Traitement P et dose P visée (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)					
		P0 (0)	P1 (10)	P2 (20)	P3 (40)	P4 (80)	P5 (120)
Traitement N et dose N apportée (kg N ha ⁻¹)	N1 (56)	2	12	22	41	81	120
	N2 (120)	4	14	24	44	83	122

Entre parenthèses : doses de N et P visées. En italique : doses de P réellement apportées

Compte tenu de la réglementation AB, le recours à des fertilisants minéraux n'était pas possible. Il a fallu donc identifier un fertilisant riche en P disponible et pauvre en N et un fertilisant riche en N et pauvre en P applicable en AB pour conduire ces essais. Après plusieurs tests et analyses, un compost de guano et de fumier de fientes de volailles issus d'élevages biologiques riche en P (15.9 % de P₂O₅ et 7.5 % de N) et de la poudre de plume riche en N (13.3 % de N et 0.5 % de P₂O₅) ont été retenus. Etant donné que la teneur en P de la farine de plume n'était pas tout à fait nulle, les doses exactes de P réellement apportées diffèrent légèrement des doses souhaitées (tableau 2).

Les six essais ont été conduits sans répétition des traitements expérimentaux : en effet leur objectif était de créer un gradient de teneurs en P du sol pour étudier la réponse des cultures à ce gradient et non d'évaluer l'effet d'une dose de fertilisant.

2.2. Valorisation d'un essai phosphore longue durée en AB

Des données historiques sur la période 2006 à 2023 de l'essai longue durée AB de Dunière de la Ferme expérimentale d'Etoile-sur-Rhône (26) ont également été mobilisées. Ce dispositif situé dans la plaine de Valence, en sol limono-sableux profond sans cailloux des terrasses alluviales de la vallée du Rhône, est constitué de cinq parcelles d'environ 0.6 ha accueillant chaque année les cinq cultures de la rotation étudiée. Chaque parcelle est elle-même subdivisée en quatre sous-parcelles afin de comparer différentes stratégies de fertilisation. L'essai est conduit en AB depuis 2000 avec pour rotation type une succession Luzerne porte-graine (2 ans) / Maïs grain / Soja / Blé tendre qui a néanmoins connu quelques variations ponctuelles. En effet, en raison de contraintes agronomiques, la luzerne et le soja ont parfois été remplacées par du colza ou du tournesol. De plus, en 2007 et 2008, le blé tendre a été implanté sur deux parcelles du dispositif au lieu d'une seule et cela a aussi été le cas avec le maïs en 2011. Enfin, en 2015, l'ensemble des parcelles ont été implantés en maïs.

A partir de 2005, deux modes de gestion différenciée du P ont été introduits dans l'essai et chacun conduit sur deux sous-parcelles pour chacune des cinq parcelles :

- **P+**, visant à compenser les exportations de P voire à redresser les teneurs en P du sol par des apports d'engrais riches en N et P à base de farines de poisson, de farines de viande ou de guano d'oiseaux marins et de fumiers de volailles compostés ;
- **P-**, visant à apporter des quantités de N équivalentes à P+ mais pas (ou très peu) de P par des apports d'engrais riches en N et pauvres en P principalement constitués de farines de plumes ou de soies de porc.

De 2005 à 2023, les parcelles P+ ont reçu en moyenne 73 kg de P₂O₅/ha/an et 63 kg N/ha tandis que les parcelles P- n'ont reçu que 9 kg de P₂O₅/ha/an et 43 kg N/ha/an. La luzerne et le soja ne nécessitant pas d'apport de N, n'ont reçu aucun fertilisant sur les parcelles P- mais ont régulièrement reçu de faibles apports de N sur les parcelles P+ étant donné l'impossibilité, en AB, d'apporter un fertilisant à la fois riche en P biodisponible et ne contenant pas de N. En revanche, le maïs et le blé ont reçu des apports de N équivalents entre les parcelles des parcelles P+ et P-.



Cette différenciation a conduit à l'apparition d'un gradient de teneurs en P_2O_5 Olsen dans le sol avec des valeurs comprises entre 10 et 30 ppm de P_2O_5 pour les parcelles P- (moyenne : 17 ppm de P_2O_5) et comprises entre 15 et 57 ppm de P_2O_5 pour les parcelles P+ (moyenne : 36 ppm de P_2O_5).

2.3. Variables mesurées

Des variables permettant de caractériser la disponibilité en P du sol et la réponse des cultures ont été mesurées dans les différents essais. Tout d'abord, sur les six essais « courbe de réponse au P », la teneur en P Olsen a été mesurée sur des échantillons de terre prélevés dans l'horizon 0-25 cm avant et après chaque apport de fertilisants. Ceci a permis d'évaluer leur impact sur la disponibilité en P.

Sur l'essai longue durée de Dunière, les teneurs en P Olsen du sol ont été mesurées sur chaque parcelle en 2005, 2010, 2013, 2015, 2019 et 2023.

Enfin, chaque année, pour l'ensemble des essais, la biomasse des grains à la récolte a également été mesurée afin de déterminer le rendement des cultures.

2.4. Analyse des données

La réponse au P des cultures de blé et de maïs a ensuite été évaluée en étudiant la relation entre leur rendement et la teneur en P Olsen du sol.

Pour l'essai de Dunière, comme les teneurs en P Olsen du sol n'ont pas été mesurées chaque année, les valeurs manquantes ont été estimées par interpolation linéaire entre deux dates de prélèvement. De plus, sur cet essai, afin de s'affranchir des effets année, le rendement des cultures provenant des traitements P+ et P- entre 2010 et 2023 a été exprimé en indice de rendement c'est-à-dire en pourcentage du rendement maximal obtenu par l'ensemble des traitements la même année.

Ensuite, lorsque cela était possible, des modèles de réponse ont été ajustés aux données de ces essais selon différents formalismes (Mitscherlich, quadratique plateau ou linéaire plateau) afin de définir des seuils de teneurs en P en dessous desquels la variable d'intérêt est impactée (Utilisation de l'application JusteP Shiny R par A. Mollier, <https://justep.sk8.inrae.fr/>).

2.5. Diagnostic sur un observatoire de la fertilité des sols en AB

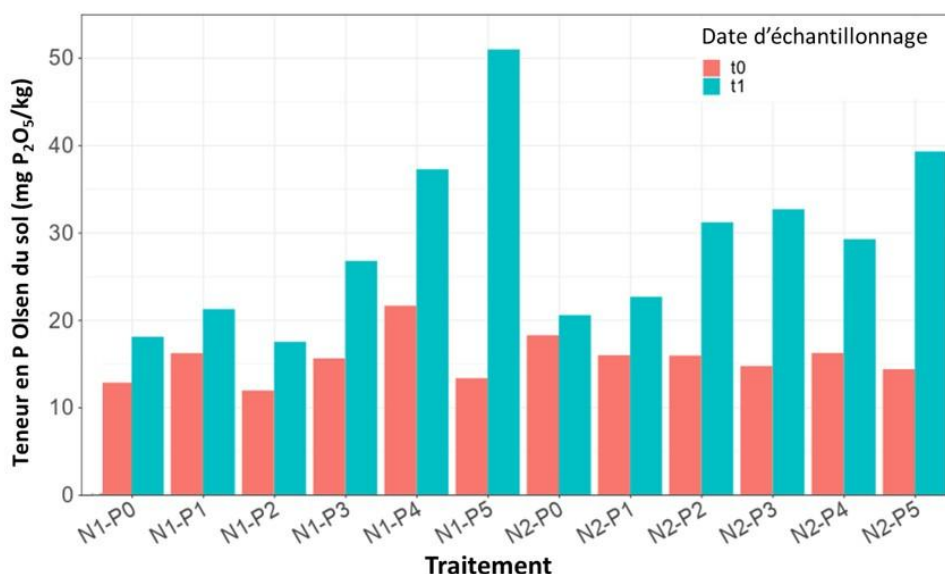
Une dernière étape a consisté à évaluer l'impact de l'utilisation de ces nouveaux seuils établis pour des cultures conduites en AB dans le cadre d'une démarche de diagnostic de la disponibilité du P du sol. Pour cela, les 201 parcelles d'un observatoire de la fertilité des sols en AB mis en place dans le cadre du projet PhosphoBio (Girard *et al.*, 2021. ; Maignan et Véricel, 2022 ; Véricel *et al.*, 2025) ont été mobilisées. Des analyses de terre incluant la détermination de la teneur en P Olsen ont été réalisées durant l'automne et l'hiver 2021-2022 pour chacune de ces parcelles. Ces dernières ont été réparties, selon la teneur en P Olsen de leur sol, en différentes classes définies d'une part à partir des valeurs Timpasse et Trenforcement et d'autre part à partir des nouveaux seuils de réponse à P adaptés à l'AB définis dans cette étude. Les classements ainsi obtenus ont ensuite été comparés.

3. Résultats

3.1. Caractérisation de la réponse des cultures à la disponibilité en P des sols en AB

Les analyses de terre réalisées avant et après les apports d'engrais sur les six essais « courbes de réponse au P » conduits sur blé et maïs ont permis de vérifier l'établissement du gradient de disponibilité en P escompté. Par exemple sur le site de Seillac, les doses de P apportées ont conduit à

la création d'un gradient de disponibilité en P avec des valeurs de P Olsen comprises entre 12 et 51 mg P_2O_5 kg⁻¹ (figure 1).



t0 : mesure avant les apports d'engrais phosphaté – t1 : mesure quelques semaines après l'apport

Figure 1 : Teneurs en P Olsen du sol avant et après apport des fertilisants organiques N et P sur l'essai courbe de réponse à Seillac (41) 2022

Description de la figure

Cette figure est un diagramme en barres groupées représentant la teneur en phosphore assimilable (P Olsen, exprimé en mg P_2O_5 /kg) mesurée dans le sol selon différents traitements (deux niveaux de N, N1 et N2 et 6 niveaux de P, de P0 jusqu'à P5).

Chaque traitement est présenté avec deux barres :

- une barre rouge correspondant au moment d'échantillonnage avant apport d'engrais phosphaté t0 ;
- une barre bleue correspondant au moment d'échantillonnage quelques semaines après apport d'engrais phosphaté t1.

Globalement, les barres t0 des différents traitements se situent à la même hauteur et les barres t1 sont systématiquement plus élevées que celles de t0, indiquant une hausse de la teneur en P Olsen entre les deux dates d'échantillonnage. Certains traitements, comme N1-P5 et N2-P5, présentent des augmentations particulièrement marquées.

Sur d'autres sites, les effets des apports de fertilisants sur les valeurs de P Olsen ont été moins prononcés. Cela peut s'expliquer par des propriétés physico-chimiques du sol mais également des conditions d'incorporation des engrais au sol différentes d'un site d'essai à l'autre. La relation entre teneur en P Olsen du sol mesurée après apport et le rendement a été étudiée sur chaque essai. Sur certains sites, comme celui de Salvagnac en 2022, le rendement du blé semblait être un peu moins élevé pour les valeurs les plus faibles de teneur en P_2O_5 Olsen (figure 2).

Cependant, aucune réponse nette des différentes variables mesurées sur le blé ou le maïs à la teneur en P du sol n'a pu être observée dans la plupart des essais, en 2022 ou en 2023 et toutes les tentatives d'ajustement de modèle de réponse ont échoué, quel que soit le formalisme retenu. Par ailleurs, l'augmentation de la dose de N apportée a conduit, en moyenne et toutes doses de P confondues, à une augmentation du rendement dans la moitié des couples site x année. En revanche, aucun effet de la dose d'azote sur la réponse du rendement des cultures à la teneur en P_2O_5 Olsen du sol n'a pu être mis en évidence.

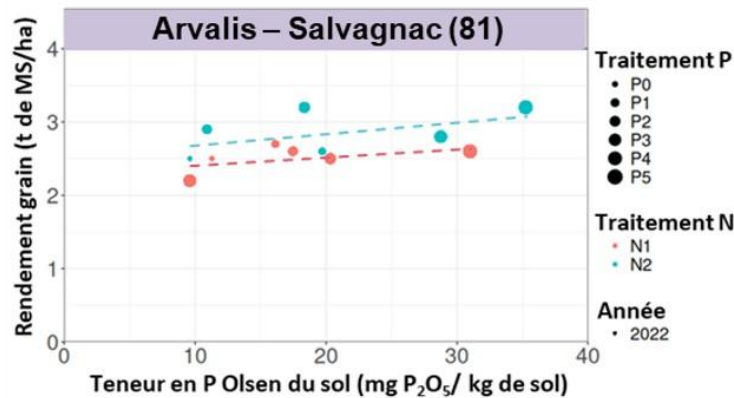


Figure 2 : Exemple de courbe de réponse du rendement en blé en fonction de la teneur en P_2O_5 Olsen du sol. Essai de Salvagnac (81) 2022.

Description de la figure

La figure est un nuage de points mettant en relation la teneur en P assimilable du sol (en mg de P_2O_5 Olsen/ kg de sol) avec le rendement en grain du blé, exprimé en tonnes de matière sèche par hectare dans un essai à Salvagnac (81) conduit en 2022 pour deux niveaux de conduite azotée : N1 et N2.

Les points correspondant à la conduite N2 se situent en moyenne légèrement au-dessus (de 2.5 à 3.2 t de MS/ha) des points N1 (de 2 à 2.7 t de MS/ha).

Deux droites de régression apparaissent pour chaque niveau de N : ces deux droites présentent une pente légèrement positive, indiquant que rendement augmente de manière modérée lorsque la teneur en P Olsen du sol augmente.

Cela semble indiquer que, même pour des teneurs en P Olsen du sol inférieures au seuil Trenf du Comifer (Comifer, 2019), le P ne semble pas ou très peu limiter la croissance des cultures en AB. D'autres facteurs limitants comme les adventices, dont la densité était importante dans plusieurs essais, sont probablement prépondérants.

Dans l'essai longue durée de Dunière, qui dispose de beaucoup plus d'antériorité, la relation entre indice de rendement et teneur en P_2O_5 Olsen du sol a pu être modélisée selon différents formalismes pour le blé tendre et le maïs ce qui a permis de définir pour ces cultures des seuils de réponse au P en-dessous desquels la valeur de l'indice de rendement n'est pas optimale (figure 3).

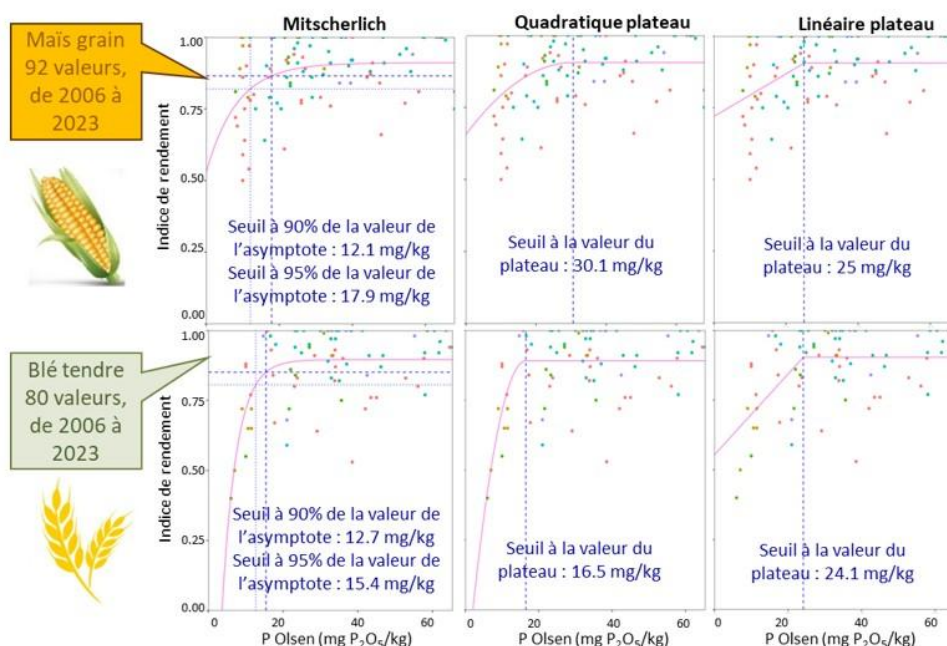


Figure 3 : Réponse du maïs (haut) et du blé tendre (bas) à la teneur en P Olsen du sol de Dunière (26) modélisée selon 3 formalismes (de gauche à droite, Mitscherlich, quadratique plateau et linéaire plateau).

Description de la figure

La figure est composée de 6 graphiques en nuage de points mettant en relation l'indice de rendement à la teneur en phosphore du sol, soit pour le maïs (92 valeurs, de 2006 à 2023), soit pour le blé (80 valeurs, de 2006 à 2023) et faisant apparaître des modèles d'ajustement de ces relations obtenus selon trois formalismes : Mitscherlich, quadratique plateau et linéaire plateau. La figure fait également apparaître des seuils de réponse du rendement de ces deux cultures obtenus grâce aux différents modèles. Dans le cas du modèle de Mitscherlich, deux seuils sont définis permettant d'atteindre 90 ou 95 % de la valeur de l'indice de rendement à l'asymptote. Pour les deux autres modèles, le seuil de réponse correspond à la teneur en P Olsen du sol à laquelle le plateau d'indice de rendement est atteint. Les seuils de réponse obtenus respectivement pour atteindre 90 et 95 % de l'asymptote du modèle de Mitscherlich et les plateaux du modèle quadratique plateau et du modèle linéaire plateau sont de 12,1, 17,9, 30,1 et 25 mg de P_2O_5 Olsen /kg de terre pour le maïs. et de 12,7, 15,4, 16,5 et 24,1 mg/kg pour le blé.

Les droites en pointillés bleu représentent les seuils de réponse au phosphore. Pour les modèles quadratique et linéaire plateau, ils sont déterminés par l'abscisse à partir de laquelle l'indice de rendement atteint son plateau. Pour le modèle de Mitscherlich, deux seuils ont été définis correspondant respectivement à l'abscisse pour laquelle l'indice de rendement atteint 90 et 95 % de la valeur de son asymptote. Indice de rendement = ratio entre le rendement d'un traitement donné et le rendement maximal obtenu par l'ensemble des traitements la même année.

Selon les modèles d'ajustement, le seuil de réponse à la teneur en P Olsen du sol varie de 12 à 30 ppm de P_2O_5 pour le maïs et de 13 à 24 ppm pour le blé tendre.

La même approche a été appliquée aux autres cultures présentes dans l'essai de Dunière (soja, luzerne porte-graine, colza et tournesol) mais, en raison soit d'un nombre insuffisant de données, soit d'une trop grande dispersion des points, aucun modèle parmi les trois testés n'a pu être ajusté (figure 4).

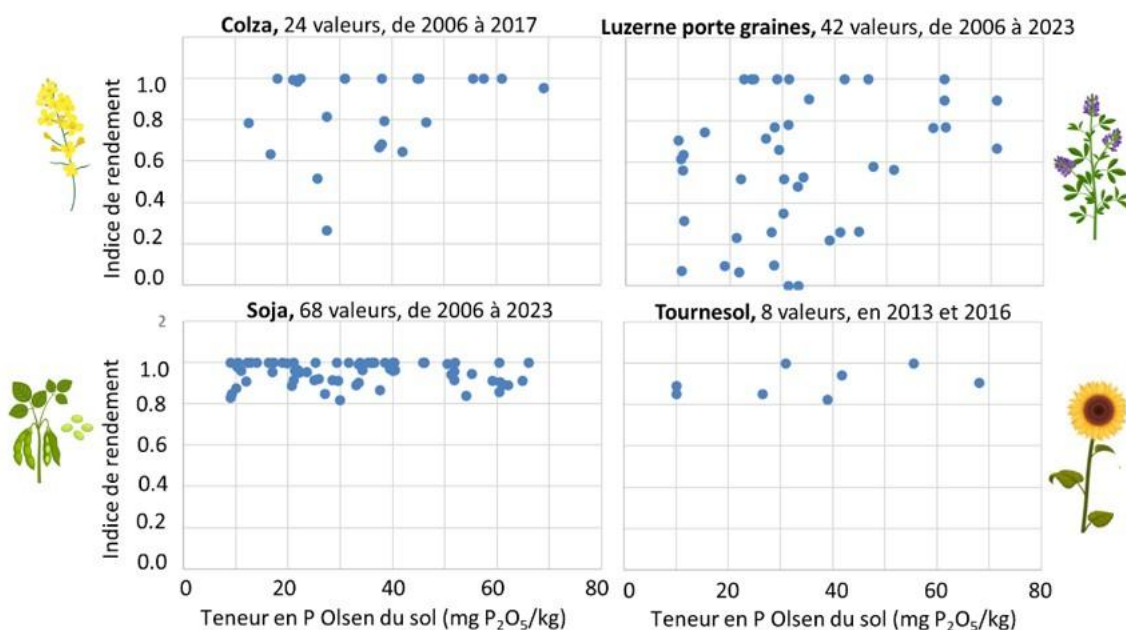


Figure 4 : Réponse du colza, de la luzerne-porte-graine, du soja et du tournesol aux teneurs en P₂O₅ Olsen du sol sur l'essai de Dunière (26).

Description de la figure

La figure est composée de quatre graphiques en nuage de points mettant en relation la teneur du sol en phosphore assimilable (P Olsen, en mg P₂O₅/kg) sur l'axe horizontal avec l'indice de rendement sur l'axe vertical, chacun correspond à une culture différente : Le colza (24 valeurs, de 2006 à 2017), la luzerne porte-graines (42 valeurs, de 2006 à 2023), le soja (68 valeurs, de 2006 à 2023) et le tournesol (8 valeurs, années 2013 et 2016).

Pour le colza, les indices de rendement varient fortement, de 0,2 à 1, pour des valeurs de teneurs en P₂O₅ Olsen du sol comprises entre 10 et 50 mg/kg mais assez peu au-delà de 50 mg/kg (indices compris entre 0.8 et 1). Pour la luzerne porte-graines, en dessous de 45 mg de P₂O₅ Olsen par kg de terre, les indices de rendement se dispersent entre 0 et 1. Au-delà, leur valeur est plus élevée et se situe entre 0.6 et 1. Pour le soja, les indices de rendement sont très élevés (compris entre 0,8 et 1) quelle que soit la teneur en P₂O₅ Olsen du sol (comprise entre 10 et 65 mg/kg de P₂O₅ Olsen). Pour le tournesol, enfin, les indices de rendements restent également dans une gamme de valeurs élevées (entre 0.8 et 1) sans lien apparent avec la teneur en P₂O₅ Olsen du sol qui varie entre 10 et 70 mg/kg.

Pour le colza et la luzerne porte-graines, respectivement, en dessous de 45 et 50 ppm de P₂O₅ Olsen, il ne semble pas y avoir de relation entre l'indice de rendement et la teneur en P du sol. En revanche, au-delà de ces valeurs, les indices de rendement sont globalement plus élevés avec des valeurs comprises entre 0.8 et 1 pour le colza et entre 0.6 et 1 pour la luzerne porte-graine. Pour le soja et le tournesol, les indices de rendement sont très élevés (compris entre 0,8 et 1) quelles que soient les teneurs en P₂O₅ Olsen du sol dans une gamme comprise entre 10 et 70 mg/kg ce qui suggère que si un seuil de réponse existe, sa valeur est inférieure à 10 mg de P₂O₅ Olsen de terre.

3.2. Identification de seuils de réponse des cultures au P en AB

Pour le blé tendre et le maïs, la coexistence, selon le modèle d'ajustement retenu, de quatre valeurs seuils différentes obtenues à partir des données de l'essai longue durée de Dunière, s'avère peu satisfaisante pour la mise en œuvre d'un diagnostic. Afin d'aboutir à des références plus opérationnelles et en s'inspirant des seuils Timpasse et Trenforcement de la méthode du Comifer (1995 et 2019), deux seuils ont été proposés pour ces cultures. Le seuil « critique » a été défini comme le



seuil en dessous duquel les pertes de rendement dues à disponibilité insuffisante du P du sol sont assez fréquentes et peuvent être très importantes. Sa valeur correspond à la valeur seuil minimale obtenue à partir des quatre modèles et arrondie à plus ou moins 5 ppm de P_2O_5 Olsen et est ainsi établie à 15 ppm de P_2O_5 Olsen pour le blé tendre et 10 ppm pour le maïs. Le seuil « de vigilance » correspond au seuil de teneur en P au-delà duquel les pertes de rendement sont rares et relativement limitées. Sa valeur est obtenue en arrondissant à plus ou moins 5 ppm de P_2O_5 Olsen la valeur seuil maximale obtenue à partir des quatre modèles et atteint 25 ppm de P_2O_5 Olsen pour le blé tendre et 30 ppm pour le maïs. Des seuils de réponse au P ont également été proposés pour le colza et la luzerne porte-graine.

Tableau 3 : proposition de seuils de réponse des cultures en AB à la teneur en P_2O_5 Olsen du sol

Culture	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil « critique » <i>Seuil en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé (ppm de P_2O_5 Olsen)</i>	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil « de vigilance » <i>Seuil au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible (ppm de P_2O_5 Olsen)</i>	Pertes de rendement liées au P estimées à :
Soja		Non défini	11 % (entre 0 et 17 %, 3 valeurs)	10	4 % (entre 0 et 18 %, 65 valeurs)
Tournesol		Non défini	13 % (entre 11 et 15 %, 2 valeurs)	10	8 % (entre 0 et 17 %, 6 valeurs)
Maïs grain	20 % (entre 0 et 50 %, 10 valeurs)	10	13 % (entre 0 et 46 %, 44 valeurs)	30	10 % (entre 0 et 34 %, 38 valeurs)
Blé tendre	30 % (entre 2 et 60 %, 11 valeurs)	15	14 % (entre 0 et 41 %, 17 valeurs)	25	10 % (entre 0 et 47 %, 50 valeurs)
Colza		Non défini	19 % (entre 0 et 74 %, 17 valeurs)	45	4 % (entre 0 et 21 %, 7 valeurs)
Luzerne- porte graine		Non défini	46 % (entre 0 et 100 %, 35 valeurs)	50	21 % (entre 0 et 44 %, 7 valeurs)

Les 2ème, 4ème et 6ème colonnes du tableau indiquent respectivement les valeurs moyennes, minimales et maximales des pertes de rendement ainsi que le nombre d'observations sur le site de Dunière pour des teneurs en P_2O_5 Olsen inférieures au seuil « critique », comprises entre le seuil « critique » et le seuil « de vigilance » et supérieures au seuil « de vigilance ».

En l'absence d'ajustement d'au moins un des trois modèles de réponse à P testés, seuls des seuils « de vigilance » ont été déterminés, par lecture graphique (figure 4), en retenant la teneur en P_2O_5 Olsen du sol en dessous de laquelle des pertes de rendement de plus de 20 % pouvaient être observées. Ces seuils ont été estimés à 45 ppm de P_2O_5 pour le colza et à 50 ppm pour la luzerne porte-graine. Pour le soja et le tournesol, comme aucune perte de rendement liée à une faible disponibilité en phosphore n'a été observée, le seuil « de vigilance » a été fixé à la valeur minimale de teneur en P Olsen mesurée dans l'essai de Dunière soit 10 ppm de P_2O_5 .

L'ensemble des seuils ainsi déterminés pour différentes cultures sont synthétisés dans le tableau 3.



3.3. Mise en œuvre des seuils dans une démarche de diagnostic

Les 201 parcelles de l'observatoire PhosphoBio ont été réparties en trois classes de teneurs en P Olsen de leur sol selon les nouveaux seuils établis pour l'AB dans cette étude (seuils PhosphoBio). Par simplification, les seuils « critique » et « de vigilance » en AB présentés dans le tableau 3 ont été fixés respectivement à 15 et 25 ppm de P_2O_5 Olsen pour l'ensemble des cultures peu ou moyennement exigeantes (soja, tournesol, blé tendre et maïs) tandis que pour les cultures très exigeantes (colza et luzerne), les valeurs proposées sont de 15 et 50 ppm. Les 201 parcelles de cet observatoire ont également été réparties en trois classes à partir des seuils Timpassse et Trenforcement de la méthode du Comifer puis les deux classements obtenus (à l'aide des seuils PhosphoBio ou des seuils Comifer) ont été comparés l'un à l'autre (figure 5).

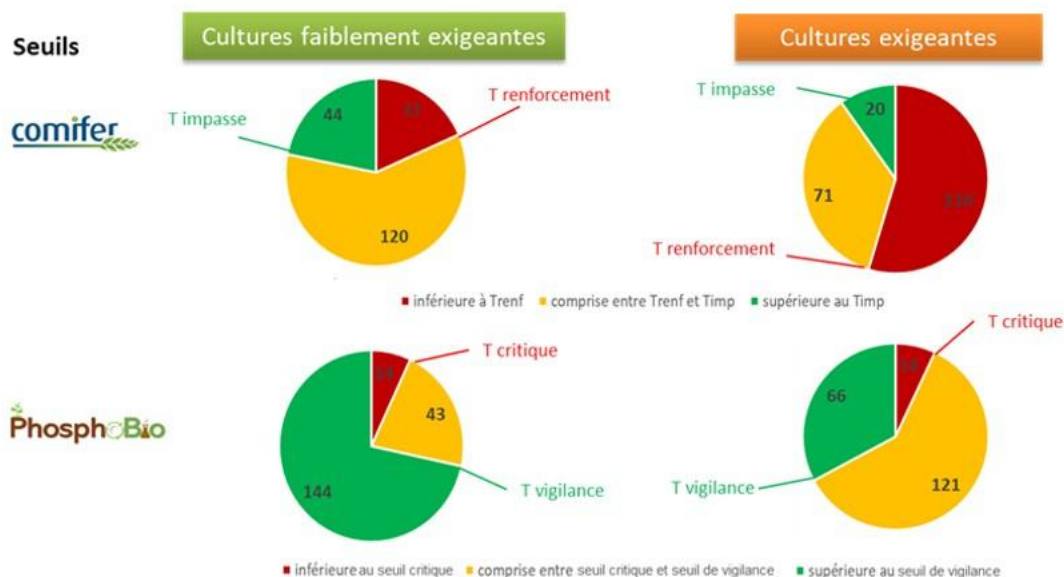


Figure 5 : Comparaison de deux diagnostics de disponibilité en P du sol appliqués aux parcelles de l'observatoire PhosphoBio, l'un à partir des seuils établis dans le projet PhosphoBio, l'autre avec les seuils de la méthode Comifer.

Description de la figure

La figure présente 4 diagrammes circulaires dans lesquels sont réparties les parcelles de l'observatoire PhosphoBio selon trois classes de disponibilité en P de leur sol :

- rouge : teneur en P de la parcelle inférieure à Trenforcement (Comifer) ou au seuil critique (PhosphoBio) ;
- vert : teneur en P de la parcelle supérieure à Timpassse (Comifer) ou au seuil de vigilance (PhosphoBio) ;
- jaune : teneur en P de la parcelle comprise entre les deux seuils.

Chaque diagramme correspond à la répartition des parcelles obtenue pour une classe d'exigence en P des cultures (cultures faiblement exigeantes et cultures exigeantes) et selon une méthode d'interprétation (seuils Comifer et seuils PhosphoBio définis dans cette étude).

Pour les cultures faiblement exigeantes, près des deux tiers des parcelles (120) présentent des teneurs en P comprises entre les seuils Trenforcement et Timpassse du Comifer (couleur jaune), les autres parcelles étant réparties assez équitablement entre les deux autres classes définies à l'aide des seuils du Comifer. Avec les seuils définis dans cette étude (seuils PhosphoBio), près des trois quarts des parcelles (144) sont classées en vert (teneurs supérieures au seuil de vigilance) et très peu (14) sont classées en rouge (teneurs inférieures au seuil critique).

Dans le cas des cultures exigeantes, selon la méthode Comifer, un peu plus de la moitié des parcelles (110) présentent une très faible disponibilité en P (teneur inférieure à Trenforcement) alors qu'elles ne sont que 20 à avoir une teneur supérieure au seuil d'impassse (classées en vert). D'après les seuils PhosphoBio, seulement 14 parcelles sont considérées comme très pauvres en P et un tiers des parcelles (66) ont des teneurs satisfaisantes (supérieures au seuil de vigilance), les situations intermédiaires représentant plus de la moitié des parcelles de l'observatoire (121 parcelles).



Selon les seuils Comifer définis pour des cultures faiblement exigeantes en P, à peine un quart des parcelles de l'observatoire PhosphoBio présentent des teneurs en P_2O_5 Olsen satisfaisantes c'est-à-dire au-dessus du seuil d'impasse tandis qu'elles sont près des trois quarts à dépasser le seuil de vigilance issu de cette étude (seuil PhosphoBio). Pour les cultures très exigeantes, plus de la moitié des parcelles de l'observatoire présentent des teneurs en P_2O_5 Olsen jugées très faibles c'est-à-dire inférieures au seuil Trenforcement mais ne sont plus que 7 % à avoir une teneur inférieure au seuil critique AB.

4. Discussion

Une limite des seuils de réponse des cultures au P établis dans le cadre de cette étude est qu'ils proviennent du seul essai de Dunière alors que les résultats d'environ 90 essais P longue durée conventionnels ont été mobilisés pour élaborer les seuils d'interprétation de la méthode du Comifer. Il va de soi que ces seuils ne sont pas représentatifs de l'ensemble des conditions pédoclimatiques rencontrées en France métropolitaine. Les six essais bisannuels « courbe de réponse à P » devaient permettre d'explorer une plus large gamme de pédoclimat mais aucune réponse des cultures à P n'y a été observée. Cette absence de réponse dans des situations où les teneurs en P_2O_5 Olsen du sol sont majoritairement comprises entre le seuil critique et le seuil de vigilance définis à partir des résultats de l'essai de Dunière voire légèrement inférieures au seuil critique semble toutefois confirmer que les seuils d'interprétation des teneurs en P_2O_5 utilisés la méthode du Comifer sont élevés pour le contexte AB.

Par ailleurs, le classement des cultures en termes d'exigence vis-à-vis du P (c'est-à-dire selon l'intensité des pertes de rendement en situation de P limitant) qui ressort de cette étude est globalement conforme aux classes d'exigences proposées par le Comifer : le colza et la luzerne porte-graine figurent parmi les cultures les plus exigeantes en P tandis que le soja et le tournesol sont très peu exigeantes (Comifer, 2019).

En revanche, ces seuils de teneur limitante en P définis dans un contexte d'AB sont nettement inférieurs aux seuils utilisés en conventionnel (seuils Trenf et Timp respectivement de 50 et 80 ppm de P_2O_5 Olsen pour le colza et la luzerne et de 20 et 70 ppm pour le blé tendre, le maïs, le soja et le tournesol en sols de limons de Rhône-Alpes correspondant à l'essai de Dunière). Plusieurs hypothèses non explorées dans cette étude pourraient expliquer cet écart. Tout d'abord, du fait d'un rendement très souvent limité par d'autres facteurs que le P (azote, adventices), la demande en P des cultures est généralement plus faible en AB qu'en AC ce qui pourrait se traduire, à niveau d'offre en P du sol équivalent, par une moindre limitation par P du rendement en AB. C'est la raison pour laquelle les essais courbe de réponse à P de cette étude ont été mis en place avec deux niveaux de disponibilité en N, mais, du fait de leur absence de réponse quelle que soit la dose de N, ils n'ont pas permis de vérifier cette hypothèse. Par ailleurs, plusieurs études soulignent l'effet positif de l'AB sur l'abondance et l'activité microbienne de sols (Blanchart *et al.*, 2005, Carpentier, 2023) ainsi que sur l'activité mycorhizienne (Oehl *et al.*, 2003 ; Gosling *et al.*, 2006 ; Garbaye, 2013). La production de phosphatase et la quantité de P lié à la biomasse microbienne pourraient être favorisées dans les sols en AB ce qui pourrait avoir pour effet d'augmenter la vitesse des flux de P qui réapprovisionnent la solution du sol après prélèvement de P par les racines des plantes. La présence de mycorhizes en plus grande quantité dans les sols en AB est aussi un facteur possible d'amélioration de la disponibilité et de l'accessibilité du P, par rapport à l'AC.

Enfin, dans leur définition, les seuils du Comifer et ceux de cette étude ne sont pas tout à fait équivalents. Timpasse est la teneur en dessous de laquelle une absence d'apport de P peut entraîner une perte maximale de rendement de 10 % en considérant pour un type de sol et classe d'exigence des cultures données, l'ensemble des situations recensées par le Comifer tandis que la teneur « critique »



correspond au seuil de réponse à P le plus sécuritaire parmi ceux obtenus avec différents modèles d'ajustement sur la base d'un seul essai.

Les seuils d'interprétation de la teneur en P_2O_5 Olsen du sol définis dans cette étude ont été utilisés pour établir un diagnostic de fertilité vis-à-vis du P sur à l'ensemble des parcelles de l'observatoire PhosphoBio. La même démarche a été conduite en parallèle avec les seuils de la méthode Comifer dont les valeurs sont nettement plus élevées. Logiquement, le diagnostic reposant sur les nouveaux seuils adaptés à l'AB apparaît beaucoup moins préoccupant que celui obtenu avec la méthode du Comifer. Quelques parcelles présentent encore des teneurs en P_2O_5 Olsen qui peuvent être considérées comme très insuffisantes mais, dans la majorité des cas, les teneurs sont satisfaisantes pour assurer une bonne alimentation en P des cultures.

Des travaux en cours pour proposer une rénovation des seuils du Comifer suggèrent toutefois que ces derniers pourraient être revus à la baisse sans que cela ne conduise à une grande prise de risque de perte de rendement (Denoroy *et al.*, 2023).

Dans l'attente d'une révision de ces seuils, ceux proposés pour l'AB dans cette étude ont le mérite d'être moins « sécuritaires » que les seuils du Comifer et donc plus facilement atteignables ou plus faciles à maintenir pour les agriculteurs en AB. En outre, ils leur offrent un bon compromis entre limiter le risque d'appauvrir la fertilité phosphatée du sol en raison d'une absence de fertilisation et ne pas fertiliser inutilement dans un contexte où l'accès à des engrais phosphatés bon marché est difficile.

5. Conclusion

Six essais « courbe de réponse à P » ont été conduits en AB sur blé tendre et maïs. L'absence de réponse du rendement de ces cultures observée malgré de très faibles teneurs initiales en P_2O_5 Olsen suggère que les teneurs-seuils en P_2O_5 Olsen actuellement utilisées pour interpréter l'analyse de terre sont très sécuritaires et peu adaptées à ce mode de production. De nouveaux seuils ont été proposés spécifiquement pour l'AB en étudiant, dans un essai P longue durée, la réponse de différentes cultures (blé, maïs, soja, tournesol, colza et luzerne-porte graine) au niveau de disponibilité en P du sol. Le classement des cultures en termes d'exigence vis-à-vis du P observé dans cet essai conduit en AB reste globalement le même qu'en conventionnel mais les valeurs des seuils « critique » et « de vigilance » - définis pour l'AB à 15 et 25 ppm de P_2O_5 Olsen pour les cultures peu ou moyennement exigeantes (soja, tournesol, blé et maïs) et à 15 et 50 ppm pour les cultures très exigeantes (colza et luzerne porte-graine) - sont nettement inférieures aux seuils Timpassé et Trenforcement de la méthode du Comifer. Enfin, les nouveaux seuils ont été utilisés pour dresser un état des lieux de la fertilité des sols vis-à-vis de P en AB sur un observatoire de 200 parcelles. L'offre en P du sol semble assez peu préoccupante pour une majorité des situations même s'il subsiste encore quelques situations à risque. L'ensemble de ces travaux devrait contribuer à faire progresser le diagnostic de carence en P en AB et à améliorer la gestion de cet élément.

Ethique

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

Grégory VERICEL : <https://orcid.org/0009-0005-1490-5331> ;

Aloïs ARTAUX : <https://orcid.org/0009-0004-9688-5639> ;

Pietro BARBIERI : <https://orcid.org/0000-0003-3248-4487> ;

Enguerrand BUREL : <https://orcid.org/0000-0003-1966-7844> ;

Joséphine DEMAY : <https://orcid.org/0000-0001-5416-2601> ;

Quentin GIRARD : <https://orcid.org/0009-0008-5711-7417> ;

Charlotte GLACHANT : <https://orcid.org/0009-0004-6646-6986> ;

Claire JOUANY : <https://orcid.org/0000-0003-0122-3268> ;

Morgan MAIGNAN : <https://orcid.org/0009-0005-1790-4713> ;

Eve-Anna SANNER : <https://orcid.org/0009-0003-2285-5667> ;

Matthieu VALE : <https://orcid.org/0009-0001-0769-4258> ;

Alain MOLLIER : <https://orcid.org/0000-0002-6261-5284>

Contributions des auteurs

Grégory VERICEL : recueil, gestion et analyse des données, conceptualisation, rédaction, supervision, Aloïs ARTAUX, Enguerrand BUREL : gestion et analyse des données, rédaction (révision et correction), Charlotte GLACHANT, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE : recueil des données, Pietro BARBIERI, Joséphine DEMAY : relecture, Quentin GIRARD, Morgan MAIGNAN : recueil, gestion et analyse des données, Claire JOUANY : recueil, gestion et analyse des données, conceptualisation, Alain MOLLIER : analyse des données, conceptualisation, supervision

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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

Cette étude a mobilisé pour sa réalisation de nombreux essais.

Nous remercions également les équipes de l'Association de Gestion de la Ferme Expérimentale d'Etoile (AGFEE), de la Chambre d'agriculture de la Drôme, d'Arvalis et de la FNAMS basées à Etoile-sur-Rhône (26) qui assurent la conduite des cultures et leur suivi sur l'essai de Dunière depuis 1999.

Merci aussi aux équipes du CreaBio, de la chambre d'Agriculture Pays de la Loire, de la chambre d'Agriculture de région Ile de France, aux équipes Arvalis d'En Crambade (31), de Bretenières (21), d'Ouzouer-le-Marché (41) et de Montans (81) et à l'équipe technique de Dijon-Céréales pour la mise en place et la réalisation des essais CRPAB en 2022 et 2023 et à l'équipe Arvalis de Châlons en Champagne qui a conduit en 2023 l'essai « INP » sur luzerne à La Veuve (51).



Merci à Coralie Chesseron (INRAE, UMR ISPA) et à l'ensemble de l'équipe technique du laboratoire AUREA pour la réalisation des analyses chimiques.

Enfin, nous adressons nos remerciements à l'ensemble des agriculteurs qui ont accepté de mettre à notre disposition une de leurs parcelles pour accueillir ces essais.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet PhosphoBio (projet CASDAR Innovation et Partenariat 2020 n° 20AIP1626879) qui a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt.

Références bibliographiques

Blanchart, E., Cabidoche, J.-M., Gautronneau, Y., Moreau, R. (2005). Les aspects spatiaux et environnementaux de l'agriculture biologique. *Agriculture biologique en Martinique : quelles perspectives de développement ?*, IRD éditions, pp.325-379, 2-7099-1555-3.

Colomb, B., Jouany, C., Prieur, L. (2013) Des bilans de phosphore majoritairement négatifs pour les systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage en Midi-Pyrénées. Quels impacts sur le phosphore biodisponible des sols et l'état de nutrition des cultures ? *Innovations Agronomiques*, 32, pp.73-82.

Carpentier, S. (2023). Caractérisation de la fertilité du sol et de la biodiversité au sein d'un réseau de parcelles. *Sciences du Vivant [q-bio]*.

Comifer, Groupe PK. (1995). *Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. Brochure Comifer*.

Comifer, Groupe PKMg. (2019). *La fertilisation P-K-Mg : Les bases du raisonnement. Éditions Comifer*.

Dai M., Hamel C., Bainard L.D., Arnaud M.S., Grant C.A., Lupwayi N.Z., Malhi S.S., Lemke R. (2014). Negative and positive contributions of arbuscular mycorrhizal fungal taxa to wheat production and nutrients uptake efficiency in organic and conventional systems in the Canadian prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 74, pp.

Denoroy, P., Mollier, A., Jouany, C., Montagnier, C., Castillon, P., Duval, R., Champolivier, L., Hanocq, D., Gratecap, J.-B., Thiebault, F., Gérard, P., Dizien, C., & Jordan-Meille, L. (2023). Actualiser l'estimation des seuils d'impasse P pour les grandes cultures en France : Des propositions opérationnelles. In *16es Rencontres Comifer-Gemas* (Tours, France, 21–23 novembre 2023).

Fontaine, L., et al. (2019). InnovAB – Améliorer les systèmes de grande culture en agriculture biologique : Enseignements d'un réseau d'expérimentations de longue durée. *Innovations Agronomiques*, 71, 295–309.

Garbaye J. (2013). La symbiose mycorhizienne, une association entre les plantes et les champignons. *Éditions Quae*, Versailles, 251 p.

Girard, Q., Véricel, G., & Cabeza-Orcel, P. (2021). Fertilisation phosphatée en agriculture biologique : L'observatoire PhosphoBio est en place. *Perspectives Agricoles*, 493, 65–67.

Gosling P., Hodge A., Goodlass G., Bending G.D. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113, pp.17-35.

Lemerrier, B., Caubet, M., Le Pioufle, N., Rabot, E., Pasquier, C., Bispo, A., & Saby, N. (2023). Évolutions du pH et des teneurs en P, K et Mg dans les sols de France hexagonale entre 2003 et 2020 à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. In *16es Rencontres Comifer-Gemas* (Tours, France, 21–23 novembre 2023).

Maignan, M., & Véricel, G. (2022). Fertilité des sols en conduite biologique : Le phosphore sous surveillance. *Perspectives Agricoles*, 501, 44–48.

Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Mäder P., Boller T., Wiemken A. (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of central Europe. *Applied and Environmental Microbiology*, 69 (5), pp. 2816-2824.



Plassard C., Robin A., Le Cadre E., Marsden C., Trap J., Herrmann L., Waithaisong K., Lesueur D., Blanchart E., Chapuis-Lardy L., Hinsinger P. (2015). Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ? *Innovations Agronomiques*, 43, pp. 115-138.

Véricel, G., Lemerrier, B., Saby, N., & Gravé, J. (2025). Fertilité des sols : Les teneurs en phosphore sont a priori plus faibles en agriculture biologique. *Perspectives Agricoles*, 532, 22–24.

Pour citer cet article : Grégory VÉRICEL, Aloïs ARTAUX, Pietro BARBIERI, Enguerrand BUREL, Joséphine DEMAY, Quentin GIRARD, Charlotte GLACHANT, Claire JOUANY, Morgan MAIGNAN, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE & Alain MOLLIÉ, 2026 - Mise au point de références pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée des cultures en Agriculture Biologique. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art01>



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.



Mise au point et adaptation d'indices de nutrition phosphatée pour différentes espèces de grandes cultures au contexte de l'Agriculture Biologique

Grégory VERICEL¹, Aloïs ARTAUX², Pietro BARBIERI³, Enguerrand BUREL⁴, Joséphine DEMAY³, Quentin GIRARD⁵, Charlotte GLACHANT⁶, Claire JOUANY⁷, Morgan MAIGNAN⁸, Eve-Anna SANNER⁹, Matthieu VALE¹⁰, Alain MOLLIER¹¹

¹ ARVALIS, F-31450 Baziège, France

² Chambre d'agriculture Pays de la Loire, 49105 Angers, France

³ Bordeaux Sciences Agro, UMR ISPA, 33175 Gradignan, France

⁴ ITAB, 149 rue de Bercy 75595 Paris Cedex 12, France

⁵ ARVALIS, 27170 Ecardenville-la-Campagne, France

⁶ Chambre d'agriculture de région Île de France, 77350 Le Mée-sur-Seine, France

⁷ INRAE, UMR AGIR, 31326 Castanet Tolosan, France

⁸ GAB des Côtes d'Armor, 22193 Plérin, France

⁹ CREABIO, 32000 Auch, France

¹⁰ AUREA AgroSciences, 45160 Ardon, France

¹¹ INRAE, Bordeaux Sciences Agro, UMR ISPA, 33140 Villenave-d'Ornon, France

Correspondance : g.vericel@arvalis.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art02>

Résumé

En agriculture biologique (AB), l'analyse de terre n'est pas toujours adaptée pour détecter de manière fiable les situations qui présentent des risques de carence en phosphore (P) pour les cultures. L'indice de nutrition phosphatée (INP), qui s'appuie sur une analyse du végétal, pourrait constituer un indicateur complémentaire pour ce diagnostic mais, faute de référentiel d'interprétation opérationnel, notamment pour les légumineuses, son utilisation en grandes cultures n'est pas développée. Un premier volet de cette étude a donc consisté à déterminer des équations de teneur critique en P pour le soja et la luzerne. Un second volet a permis de définir, pour ces deux cultures mais aussi pour le blé et le maïs, des valeurs seuils d'INP au-delà desquelles le rendement n'est pas pénalisé. Enfin, les références obtenues ont été testées sur un observatoire de parcelles en AB. Si les résultats de diagnostic obtenus en utilisant l'INP sur blé et maïs semblent prometteurs, une validation dans d'autres situations est encore nécessaire pour les deux légumineuses.

Mots-clés : phosphore, agriculture biologique, diagnostic de carence, indices de nutrition phosphatée

Abstract: Development of references for crops phosphorus nutrition diagnosis in organic farming

In organic farming (OF), soil analysis is not always well adapted to correctly identify situations with phosphorus (P) deficiency risk for crops. The phosphorus nutrition indice (PNI), which relies on plant analysis, could be a complementary indicator for this diagnosis, but due to the lack of references ready to use for interpreting PNIs, especially for legumes, it remains rarely used in field crops. The first part of the study focused on establishing critical P content equations for soybeans and alfalfa. The second part defined threshold values for these two crops and as well for bread wheat and maize, above which yield



is not negatively impacted. Finally, the references obtained were tested on a field observatory in OF. While the diagnosis results obtained using PNI on wheat and maize appear promising, validation in a broader range of situations is still needed for both legumes.

Keywords: phosphorus, organic farming, deficiency diagnosis, phosphorus nutrition indices

1. Introduction

Le maintien de la fertilité des sols vis-à-vis du phosphore (P) représente un enjeu important pour l'agriculture biologique (AB). En effet, en France, les teneurs en P Olsen du sol dans les parcelles en AB sont en moyenne plus faibles que dans les parcelles en agriculture conventionnelle (AC) (Véricel *et al.*, 2025), elles-mêmes fréquemment sujettes à une diminution significative de ces teneurs entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020 (Lemercier *et al.*, 2023). De ce fait, la gestion de la fertilité phosphatée dans les systèmes AB nécessite une vigilance accrue et une anticipation plus importante qu'en AC, où une carence peut être assez rapidement corrigée par des apports de superphosphates, mais dont l'utilisation n'est pas autorisée en AB. Afin de raisonner au mieux la fertilisation, il est essentiel d'établir un diagnostic afin d'évaluer le niveau de disponibilité du P dans le sol ou l'état de nutrition phosphatée des cultures.

En France, le raisonnement de la fertilisation phosphatée des grandes cultures repose essentiellement sur un diagnostic basé sur l'interprétation de teneurs en P du sol mesurées par une analyse de terre à l'aide d'un référentiel établi en système conventionnel (Comifer, 2019). Pourtant, le rendement des grandes cultures conduites en AB n'est bien souvent pas ou peu affecté par de faibles teneurs en P des sols, même lorsqu'elles sont inférieures aux seuils de réponse établis dans cette méthode. En effet, dans ce contexte de production, l'impact réel du P sur le développement des cultures est difficile à évaluer car une faible disponibilité du P est souvent concomitante à des carences en d'autres éléments tels que l'azote (N). Par ailleurs, par ses effets positifs sur l'activité biologique des sols (Blanchart *et al.*, 2005), notamment l'abondance de vers de terre (Coulis, 2015) et la colonisation de la rhizosphère par des mycorhizes (Gosling *et al.*, 2006 ; Garbaye, 2013), l'AB pourrait concourir à améliorer la disponibilité de P (Plassard *et al.*, 2015). Le potentiel de production des cultures est plus faible en AB qu'en AC, et les besoins en P des cultures peuvent probablement être satisfaits par une offre du sol moindre. Il est alors légitime de s'interroger sur la pertinence d'utiliser des référentiels établis en AC dans le contexte de l'AB, pour lequel leur validité n'a pas été démontrée (Fontaine *et al.*, 2019).

D'autres approches existent, notamment un diagnostic basé sur l'analyse de plante et le calcul d'un indice de nutrition phosphatée (INP) développé initialement pour les prairies permanentes (Thélier-Huché, 1999 ; Jouany *et al.*, 2021). Cet indicateur rend compte du niveau de satisfaction des besoins en P absorbé par les plantes qui ne dépend pas uniquement de l'offre en P du sol, mais également du potentiel de production de biomasse déterminé par de nombreux facteurs dont la disponibilité en N du milieu. Son utilisation en grandes cultures pourrait s'avérer complémentaire de l'analyse de terre pour diagnostiquer l'état de satisfaction des besoins en P des cultures en AB, très souvent confrontées à des co-limitations.

Bien que l'INP soit essentiellement utilisé pour raisonner les apports de fertilisants en prairies, il existe également des modèles de teneurs critiques en P permettant le calcul de ces indicateurs pour le blé et le maïs (Ziadi *et al.*, 2007 et 2008 ; Bélanger *et al.*, 2015 ; Cadot *et al.*, 2018 ; Lemaire *et al.*, 2019 ; Morel *et al.*, 2021 ; Seghouani *et al.*, 2025 ; Fontana *et al.*, 2025). Cependant, la relation entre la valeur des INP de ces espèces et l'atteinte du potentiel de rendement est peu documentée, ce qui pourrait expliquer qu'ils ne soient pas utilisés en routine. De plus, il n'existe pas à ce jour de références équivalentes pour les légumineuses, qui occupent pourtant une place essentielle dans les systèmes en AB.



Mobiliser l'analyse de plantes en grandes cultures biologiques en complément de l'analyse de terre pourrait améliorer le diagnostic de nutrition phosphatée, et présente un réel intérêt pour surveiller la fertilité des sols en systèmes AB et assurer ainsi leur durabilité. Pour cela, deux pistes ont été explorées dans cette étude :

- **la mise au point d'indices de nutrition phosphatée pour deux espèces de légumineuses.** Des travaux ont été conduits en AC sur une légumineuse à graines, le soja, et sur une légumineuse fourragère, la luzerne, afin d'établir des références nouvelles et pallier l'absence de relations de teneur critique en P sur les plantes de cette famille ;
- **l'adaptation d'indices de nutrition phosphatée au contexte des grandes cultures AB.** Il s'agit d'évaluer si les courbes de teneurs critiques en P déjà développées en AC pour le blé tendre et le maïs, ou établies en AC dans cette étude pour le soja et la luzerne, pourraient être utilisées pour des systèmes en AB, et de proposer des seuils d'interprétation permettant d'identifier les situations où une limitation en P risque d'affecter la croissance et le rendement des cultures.

2. Matériels et méthodes

2.1. Notions de teneur critique et d'indice de nutrition

Au cours de la croissance des cultures, les teneurs en éléments minéraux de leurs tissus et notamment en azote (N) et en phosphore (P) diminuent au fur et à mesure que la quantité de biomasse produite augmente : on parle de principe de dilution (Salette et Lemaire, 1981). Une courbe de dilution critique peut être définie pour chaque espèce et chaque élément par la relation entre la teneur en cet élément dans les parties aériennes du peuplement végétal (T_C , en g.kg⁻¹ MS) et sa biomasse en situation de nutrition optimale de type : $T_C = a \times \text{biomasse}^b$ où *biomasse* est la biomasse des parties aériennes de la culture (en t MS.ha⁻¹), et *a* et *b* des paramètres dépendants de la culture et de l'élément nutritif considéré. Cette courbe peut être construite à partir de l'ensemble des points correspondant, pour une date donnée, à la teneur critique (T_C) en cet élément, c'est-à-dire la teneur au-delà de laquelle la matière sèche aérienne n'augmente pas de façon significative malgré une augmentation de disponibilité en cet élément (Justes *et al.*, 1994). Si, pour un niveau de biomasse donné, la teneur réelle (T_R) du couvert végétal en l'élément considéré est égale à sa teneur critique (T_C), le couvert est à l'optimum de nutrition vis-à-vis de cet élément. Si $T_R < T_C$, le couvert végétal est en état de carence, si, au contraire, $T_R > T_C$, il est en état de surfertilisation, ce qui se traduit par une consommation dite « de luxe ». Cette approche, d'abord développée pour N sur prairies (Salette et Lemaire, 1981), a été étendue à d'autres cultures comme le blé (Justes *et al.*, 1994) puis à d'autres éléments comme le P (Cadot *et al.*, 2018).

Par ailleurs, en conditions de croissance non limitantes, la composition des tissus végétaux présente un certain équilibre entre les différents éléments, notamment N et P (Salette et Huché, 1991). Ainsi, la teneur critique des parties aériennes des végétaux en un élément (T_C) peut aussi être déterminée en fonction de leur teneur en azote (T_N , en g.kg⁻¹ MS) par la relation linéaire suivante : $T_C = c \times T_N + d$ avec *c* et *d*, des paramètres dépendants de la culture et de l'élément considéré. Ce type de relation a d'abord été établi pour le phosphore (P) et le potassium (K) sur prairies (Salette et Huché, 1991), puis pour P sur maïs (Ziadi *et al.*, 2007), blé (Ziadi *et al.*, 2008) et colza (Cadot *et al.*, 2018).

Enfin, le rapport entre la teneur mesurée en l'élément et sa teneur critique permet de définir un indice de nutrition qui caractérise l'état de nutrition de la plante vis-à-vis de cet élément. Ces définitions ne sont néanmoins valables qu'au cours de la période végétative. Durant le remplissage des grains, la teneur en éléments minéraux de la plante décline plus rapidement du fait de l'accumulation d'amidon dans les grains : l'utilisation d'indices de nutrition au cours de cette phase doit donc se faire avec circonspection (Lemaire et Gastal, 1997).



Dans le cas de P, l'indice de nutrition phosphatée (INP) se calcule selon la relation suivante : $INP = 100 \times \frac{tP}{P_c}$ avec tP , la teneur en P mesurée dans la plante et P_c la teneur critique en P (tP et P_c , en g.kg⁻¹ MS).

Une revue bibliographique a permis d'identifier l'ensemble des relations déjà publiées permettant de déterminer P_c pour le blé tendre et le maïs. Des formalismes de type $P_c = a \times \text{biomasse}^b$ (2 relations pour le blé : Cadot *et al.*, 2018 et Fontana *et al.*, 2021 et 4 pour le maïs : Cadot *et al.*, 2018, Gagnon *et al.*, 2020, Morel *et al.*, 2021 et Seghouani *et al.*, 2025), $P_c = a \times tN + b$ (5 relations pour le blé : Ziadi *et al.*, 2008 (2 relations), Cadot *et al.*, 2018, Véricel *et al.*, 2019 et Fontana *et al.*, 2021 et 4 pour le maïs : Ziadi *et al.*, 2007 (2 relations), Cadot *et al.*, 2018 et Gagnon *et al.* 2020), $P_c = a \times tN^2 + b \times tN + c$ (2 relations pour le blé tendre : Bélanger *et al.*, 2015 et Cadot *et al.*, 2018) et $P_c = a \times tN^b$ (1 relation pour le blé : Fontana *et al.*, 2021) ont ainsi été répertoriées. Contrairement au blé tendre et au maïs, il n'existe pas à ce jour de modèle donnant la teneur critique en P pour les légumineuses.

2.2. Détermination de relations de teneurs critiques en phosphore pour le soja et la luzerne

2.2.1. Suivi du soja sur un essai P longue durée.

Afin d'établir des relations entre la teneur en P du soja et sa teneur en N ou sa biomasse, étape préalable indispensable à la construction d'INP pour cette espèce, un suivi spécifique a été réalisé au printemps 2021 sur une culture de soja en place sur l'essai P longue durée de l'INRAE de Toulouse – Auzeville (31). Cet essai, conduit depuis 1969 en agriculture conventionnelle avec quatre niveaux de fertilisation phosphatée allant de l'absence d'apport de P à des doses équivalentes à quatre fois le niveau d'exportations de P des cultures, a permis l'établissement d'un très fort gradient de teneurs en P du sol qui varient de 7 ppm à 53 ppm de P₂O₅ Olsen selon les traitements. En plus des mesures de rendement de la culture et de la teneur en P du sol réalisées en routine sur chaque micro-parcelle de l'essai, la biomasse du soja et sa teneur en N et en P ont été mesurées à 11 dates différentes au cours de son développement.

2.2.2. Essai courbe de réponse au P sur luzerne

Un essai « courbe de réponse au phosphore » en micro-parcelles a été mis en place durant la campagne 2022-2023 sur une parcelle de luzerne conduite en conventionnel sur sol de craie à La Veuve (51), en Champagne. Le choix s'est orienté vers la mise en place d'un essai dédié car aucun essai P longue durée déjà existant et incluant de la luzerne n'a été identifié. De plus, étant donné la faible disponibilité du P des phosphates naturels, seuls engrais phosphatés ne contenant pas de N autorisés en AB, il est apparu préférable de conduire cet essai en AC. La teneur en P du sol sur la parcelle retenue est de 52 ppm de P₂O₅ Olsen. Cette valeur élevée, en comparaison à la valeur minimale observée sur l'essai d'Auzeville, reste néanmoins nettement inférieure au seuil de renforcement de la fumure en sol de craie pour la luzerne (90 ppm de P₂O₅ Olsen). Quatre niveaux de P (0, 40, 80 et 120 kg de P₂O₅/ha) apporté sous forme de superphosphate au semis (04/07/2022) ont été croisés avec deux niveaux de N (0 et 80 kg N/ha) apporté sous forme d'ammonitrate en sortie d'hiver (10/02/2023). Cet apport d'azote sur luzerne avait pour objectif de simuler un reliquat d'azote minéral élevé en sortie d'hiver et de vérifier la robustesse des relations entre teneur en P et teneur en N ou entre teneur et P et biomasse de la luzerne, quel que soit le niveau de disponibilité en N du sol. La biomasse des parties aériennes de la luzerne et ses teneurs en P et en N ont été mesurées à quatre dates : le 27/04/2023 (hauteur de la luzerne de 30 à 35 cm), le 10/05/2023 (début initiation florale), le 26/05/2023 (1^{ers} bourgeons formés) et le 09/06/2023 (floraison). Cette dernière date correspond à un stade de récolte tardive pour une première coupe de luzerne et la biomasse mesurée a donc été considérée comme le rendement de cette première coupe.



2.2.3. Analyse des données

Les relations entre la teneur en P et la biomasse du soja et de la luzerne ont été étudiées à partir des données mesurées en 2021 dans l'essai P longue durée d'Auzeville et l'essai « courbe de réponse au phosphore » de La Veuve, en s'inspirant des travaux de Justes *et al.* (1994) pour établir la courbe de dilution de N sur blé tendre. Les valeurs « critiques » ont été déterminées en identifiant, à chacune des 11 dates de mesure pour le soja et à chacune des 4 dates pour la luzerne, les valeurs de biomasse aérienne de la culture et de teneur en P associée à cette biomasse au-delà desquelles toute augmentation de la disponibilité en P du sol n'entraîne pas d'augmentation significative de la biomasse mais uniquement une augmentation de la teneur en P associée.

Les équations de teneur critique en P (P_c) du soja et de la luzerne ont été déterminées en ajustant, à partir des valeurs critiques identifiées, la relation entre la teneur en P et la biomasse de ses parties aériennes selon un modèle exponentiel de type $P_c = a \times \text{Biomasse}^b$. Deux autres équations de P_c , l'une pour le soja, l'autre pour la luzerne ont été déterminées en ajustant cette fois, toujours à partir des mêmes points critiques, la relation entre les teneurs en P et en N des parties aériennes selon un modèle linéaire de type : $P_c = a \times tN + b$.

2.3. Elaboration de référentiels d'interprétation des indices de nutrition phosphatée par confrontation à des indices de rendement

2.3.1. Calcul d'indices de nutrition phosphatée du blé et du maïs dans un essai longue durée en AB

Afin d'identifier des seuils d'interprétation de l'INP pour le blé tendre et le maïs adaptés au contexte de l'AB, la relation entre l'INP de ces deux cultures et leur rendement a été étudiée à partir des données issues de l'essai de Dunière de la ferme expérimentale d'Etoile-sur-Rhône (26). Cet essai est conduit en AB depuis plus de 20 ans avec une rotation type « Luzerne porte-graine (2 ans) / Maïs grain / Soja / Blé tendre » et dont chaque terme est cultivé chaque année sur quatre parcelles élémentaires. De plus, deux conduites de fertilisation phosphatée distinctes sont mises en œuvre pour chaque culture, chacune sur deux parcelles élémentaires :

- **la stratégie P+**, visait à compenser les exportations de P voire à redresser les teneurs en P du sol par des apports d'engrais riches en N et P ;
- **la stratégie P-**, visait à apporter des quantités de N équivalentes à P+ mais pas (ou très peu) de P par des apports d'engrais riches en N et pauvres en P.

Cette différenciation a permis d'établir un gradient de disponibilité en P se matérialisant par des teneurs P_2O_5 Olsen du sol allant, en 2023, de 10 à 57 ppm (Véricel *et al.*, [en révision]).

Les indices de nutrition phosphatée (INP) du blé et du maïs dans l'essai de Dunière (26) ont été calculés selon chacune des relations identifiées précédemment à partir des données de biomasse et de teneurs en N et en P à floraison mesurées chaque année pour ces deux cultures de 2006 à 2023.

Des indices de rendement (IR) ont été calculés en divisant le rendement observé sur chaque parcelle élémentaire de blé ou de maïs de l'essai par le rendement maximal atteint la même année par cette même culture sur l'ensemble des parcelles de l'essai où elle est présente. Les valeurs d'IR obtenues de 2006 à 2023 sur chaque parcelle élémentaire (68 situations pour le blé et 66 pour le maïs) ont été mises en relation avec les valeurs d'INP correspondantes, calculées, pour le blé et le maïs, avec chacune des équations de P_c identifiées dans la bibliographie.

2.3.2. Elaboration de seuils d'interprétation des indices de nutrition phosphatée

Les INP du soja et de la luzerne ont été calculés respectivement pour chacune des 11 dates de mesure de biomasse de l'essai P longue durée d'Auzeville et des 4 dates de mesure de l'essai « courbe de réponse au P » en Champagne à partir des relations $P_c = a \times \text{Biomasse}^b$ et $P_c = a \times tN + b$



déterminées pour ces deux cultures. Les IR du soja et de la luzerne ont également été calculés sur ces essais, de la même manière que pour le blé tendre et le maïs.

L'ensemble des relations entre les INP et les IR du blé tendre, du maïs, du soja et de la luzerne ont ensuite été représentées graphiquement puis modélisées selon un formalisme linéaire plateau de type : $IR = p + a \times (INP - sINP)$ où IR est l'indice de rendement, p : sa valeur maximale, a : la pente de la relation avant qu'elle atteigne le plateau et sINP : la valeur d'INP au plateau. Ceci a été répété pour chaque mode de calcul de l'INP possible à partir des relations de Pc répertoriées ou établies pour chaque culture et pour chacune des dates où la biomasse a été mesurée dans les essais (une seule date pour le blé et le maïs, 11 pour le soja et 4 pour la luzerne).

Le seuil d'INP en dessous duquel se produit une perte de rendement, qui correspond au paramètre sINP de l'équation, a été déterminé à chaque fois que l'ajustement du modèle était possible. En cas d'échec d'ajustement, comme cela a été le cas pour le blé, le maïs et la luzerne, une approche alternative a été mise en œuvre pour définir des seuils. En cas d'échec d'ajustement, comme cela a été le cas pour le blé, le maïs et la luzerne, une approche alternative a été mise en œuvre pour définir des seuils. Un seuil « critique » d'INP en dessous duquel les pertes de rendement sont fréquentes et peuvent être très importantes et un seuil « de vigilance » au-delà duquel les pertes de rendement sont rares et relativement limitées ont alors été déterminés par simple lecture graphique, permettant ainsi de définir trois classes de valeurs d'INP : faibles, moyennes et élevées. Ces valeurs seuils d'INP ont été fixées en retenant des multiples de 5 : une détermination visuelle ne permettant guère un niveau de précision plus fin.

2.3.3. Identification des seuils d'interprétation des indices de nutrition phosphatée les plus discriminants

Afin d'évaluer la qualité d'un diagnostic de nutrition phosphatée reposant sur l'interprétation de ces seuils d'INP, trois niveaux de limitation du rendement par P ont été définis à partir des valeurs d'indice de rendement (IR) : « peu limitant » lorsque l'IR est supérieur à 0,8 (c'est-à-dire des pertes de rendement dues au P inférieures à 20 % du rendement maximal), « limitant » pour un IR compris entre 0,6 et 0,8 et « très limitant » pour un IR < 0,6 (plus de 40 % de pertes de rendement liées au phosphore). Le diagnostic de nutrition phosphatée est alors jugé « satisfaisant » dans les cas où l'INP est faible (inférieur au seuil « critique ») et où, d'après l'indice de rendement, le P est très limitant ou, à l'inverse, lorsque l'INP est élevé (supérieur au seuil « de vigilance ») et le P peu limitant. Le diagnostic est considéré comme « mauvais » lorsque le l'INP est faible et le phosphore est peu limitant ou, au contraire, lorsque l'INP est élevé et le phosphore est très limitant. Enfin, le diagnostic est considéré comme « acceptable » dans toutes les autres situations. Dans le cas du soja, culture pour laquelle un seuil d'interprétation d'INP a pu être déterminé par ajustement d'un modèle linéaire plateau pour chaque date de mesure de biomasse, les seuils « critique » et de « vigilance » ont été définis respectivement par les valeurs minimales et maximales de seuils d'INP obtenues pour l'ensemble des dates après avoir écarté les valeurs extrêmes.

Chaque situation pour laquelle un INP et un IR ont été calculés a ainsi été classée en fonction des valeurs prises par ces indicateurs de manière à déterminer le pourcentage de diagnostics « satisfaisants », « acceptables » ou « mauvais » pour le blé, le maïs, le soja ou la luzerne. Enfin, les formalismes de Pc et leurs seuils d'INP associés permettant, pour chacune de ces cultures, de minimiser le pourcentage de mauvais diagnostics ou de maximiser celui de bons diagnostics ont été identifiés afin de sélectionner les plus pertinents. Pour le blé tendre et le maïs, compte tenu des nombreuses relations de Pc déjà publiées, cette sélection a été opérée en deux étapes. Ont été identifiés, dans un premier temps, la relation la plus discriminante pour un mode de calcul de Pc donné (parmi les relations de type $Pc = a \times Biomasse^b$ et les relations de type $Pc = a \times tN + b$), puis, dans un second temps, le mode de calcul de l'INP donnant le meilleur diagnostic.



2.4. Diagnostic de carence en P des cultures AB à l'aide d'indices de nutrition.

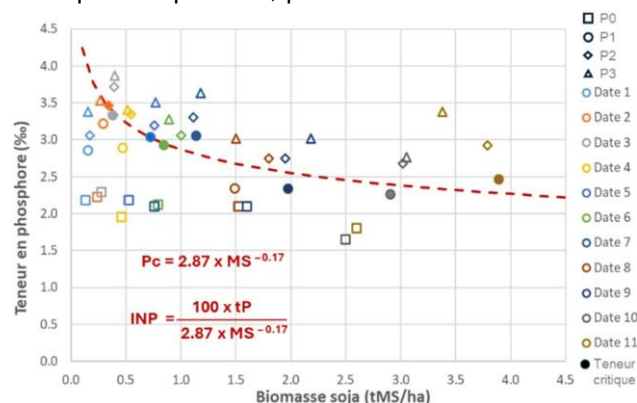
Un diagnostic de nutrition phosphatée des cultures a été réalisé sur 64 parcelles de blé, soja ou luzerne, conduites en AB et faisant partie de l'observatoire mis en place dans le cadre du projet PhosphoBio (Girard *et al.*, 2021. ; Maignan et Véricel, 2022 ; Véricel *et al.*, 2025). Une analyse de terre avait été réalisée durant l'hiver 2021-2022 sur l'ensemble des parcelles de cet observatoire puis des échantillons de biomasse ont été prélevés spécifiquement sur ces 64 parcelles, aux printemps 2022 et 2023, dans le but de tester l'utilisation des INP comme outil de diagnostic de la fertilité des sols en AB (Girard *et al.*, 2021). Les parcelles de maïs, trop peu nombreuses dans cet observatoire, n'ont pas été échantillonnées. Des INP ont été calculés pour de ces parcelles selon les deux modes de calcul lorsque cela était possible (pour 40 parcelles) ou seulement à partir de la teneur en N lorsque la valeur de la biomasse n'était pas disponible. Ils ont ensuite été mis en relation avec les teneurs en P_2O_5 Olsen mesurées sur ces mêmes parcelles afin de comparer deux approches de diagnostic reposant, soit sur l'analyse de terre, en utilisant les seuils adaptés à l'AB définis par Véricel *et al.* (2026), soit sur l'INP. La cohérence entre ces deux approches a été évaluée pour chaque culture en vérifiant si le classement des parcelles en trois groupes de fertilité phosphatée obtenu en utilisant les seuils d'INP correspondait au classement obtenu à l'aide des seuils d'interprétation de l'analyse de terre.

3. Résultats

3.1. Teneurs critiques en phosphore déterminées pour deux légumineuses

3.1.1. Teneurs critiques en phosphore pour le soja

La relation entre la teneur en P (tP) et la biomasse du soja a été étudiée à partir des données de 2021 de l'essai P longue durée d'Auzeville. Malgré un gradient de teneurs en P_2O_5 Olsen du sol très marqué entre les quatre niveaux de fertilisation appliqués depuis plus de 50 ans dans l'essai, aucune différence statistique de biomasse entre traitements n'a été mise en évidence pour les dates 1, 4 et 8 et, de ce fait, il n'a pas été possible, pour ces trois dates de mesure, de déterminer de valeur critique. Une équation



de teneur critique en P (P_c) du soja a été déterminée en ajustant, à partir des valeurs critiques identifiées pour les huit dates restantes, la relation entre tP et la biomasse de ses parties aériennes selon un modèle exponentiel (figure 1).

Figure 1 : Relation entre teneur en phosphore et biomasse des parties aériennes du soja dans l'essai P longue durée de l'INRAE d'Auzeville en 2021 pour 11 dates de mesure.

Description de la figure

La figure présente la relation entre teneur en phosphore et biomasse du soja pour 11 dates de mesure et 4 niveaux de fertilisation phosphatée. Pour une majorité de dates, le passage du niveau de fertilisation P0 à P1 s'accompagne d'une augmentation à la fois de la biomasse et de la teneur en P du soja tandis que le passage de P1 à P2 et de P2 à P3 s'accompagne, le plus souvent, uniquement d'une augmentation de teneur en P. Le symbole de légende plein représente, pour une date donnée, la teneur critique en P qui correspond à la valeur de teneur en P mesurée pour le niveau de fertilisation au-delà duquel la biomasse n'augmente plus (et seule la teneur en P continue d'augmenter). Une courbe en pointillés rouge matérialise la relation ajustée entre la teneur en P critique et la biomasse du soja qui suit une décroissance exponentielle et dont l'équation est indiquée sur le graphique.

P0, P1, P2 et P3 correspondent aux différents niveaux de fertilisation phosphatée testés (respectivement pas d'apport, apports de P équivalents à une, deux ou quatre fois les exportations). Le



symbole de légende plein correspond, pour une date donnée, à la valeur de biomasse ou de teneur en P la plus faible séparant deux groupes de biomasse statistiquement différentes et considérée comme une valeur « critique ». La courbe rouge est l'ajustement exponentiel décroissant des teneurs critiques en fonction de la biomasse.

La figure 2 présente une seconde équation de P_c du soja déterminée en ajustant, à partir des mêmes points critiques, la relation entre les teneurs en P et en N des parties aériennes selon un modèle linéaire.

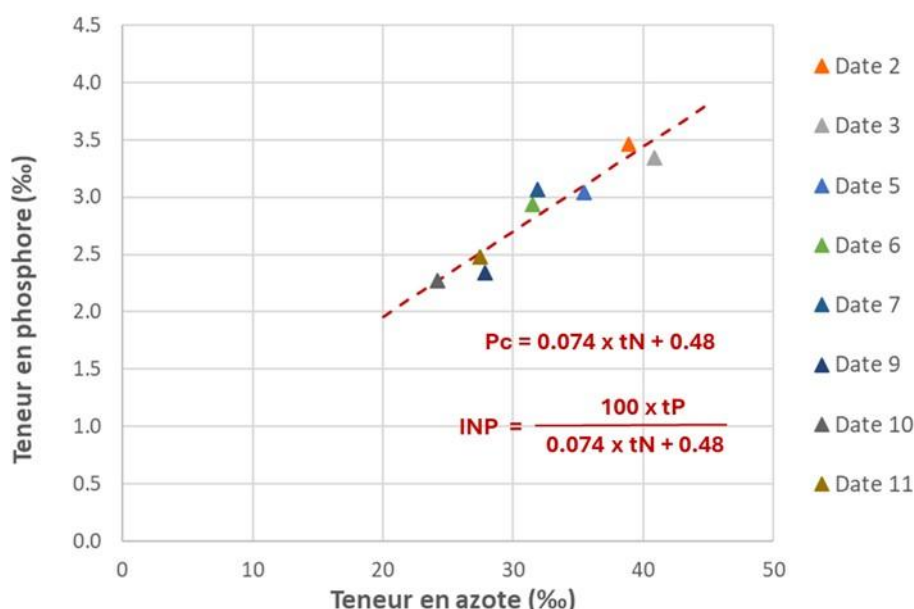


Figure 2 : Relation entre teneur en phosphore critique et teneur en azote établies pour le soja dans l'essai P longue durée de l'INRAE d'Auzeville en 2021 pour 8 dates de mesure.

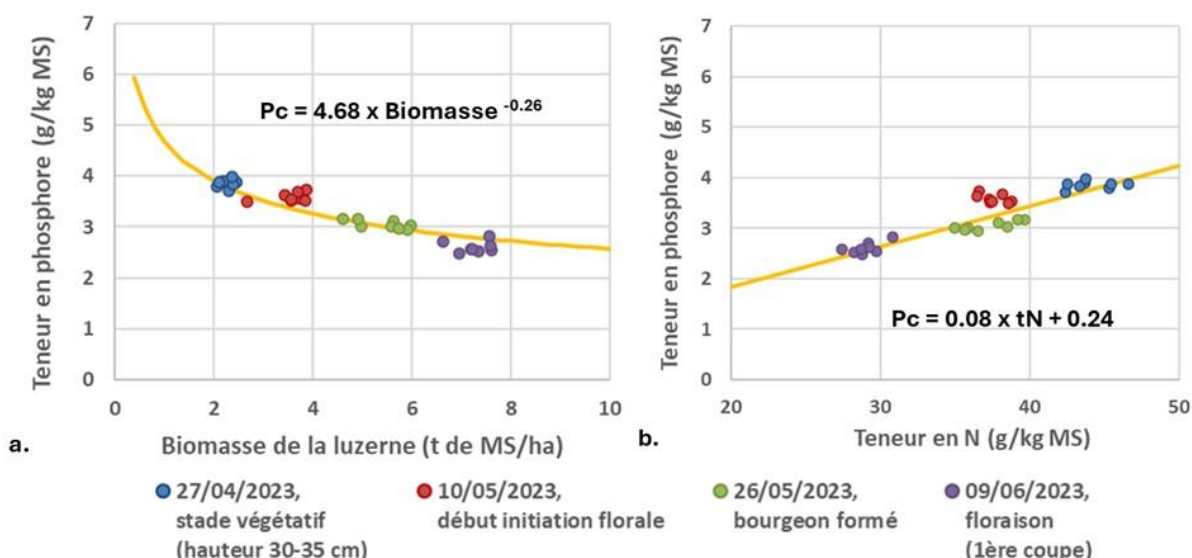
Description de la figure

La figure présente la relation entre teneur critique en phosphore et teneur en azote du soja pour 8 dates de mesure. Les points s'alignent assez bien sur leur droite de régression linéaire représentée en pointillés rouge et dont l'équation est indiquée sur le graphique : plus la teneur en azote est élevée et plus la teneur en P critique l'est également.

3.1.2 Teneurs critiques en phosphore pour la luzerne

Compte tenu de la teneur initiale du sol en P assez élevée (52 ppm de P_2O_5 Olsen), aucune différence statistiquement significative de biomasse n'a été observée entre les différents traitements à chacune des dates de mesure (stade végétatif, initiation florale, bourgeonnement et début floraison).

Il n'a donc pas été possible de déterminer de valeur de biomasse optimale de la luzerne – c'est-à-dire non limitée par P - aux différentes dates et d'en déduire P_c . Une courbe de dilution du P (figure 3, a) et une relation entre teneur en P et teneur en N des parties aériennes (figure 3, b) ont tout de même été ajustées en se basant sur les valeurs de biomasse et de teneurs en P et N mesurées sur les modalités sans apport de P (P0). En effet, bien que la différence ne soit pas statistiquement significative, leur biomasse moyenne est quand même inférieure à celles des autres modalités.



Les courbes jaunes correspondent à la courbe de dilution du phosphore et à la relation entre teneur en phosphore et teneur en azote établies à partir des mesures des teneurs et des biomasses sur le traitement P0

Figure 3 : Courbe de dilution du phosphore (a) et relation entre teneur en phosphore et teneur en azote (b) établies pour la luzerne

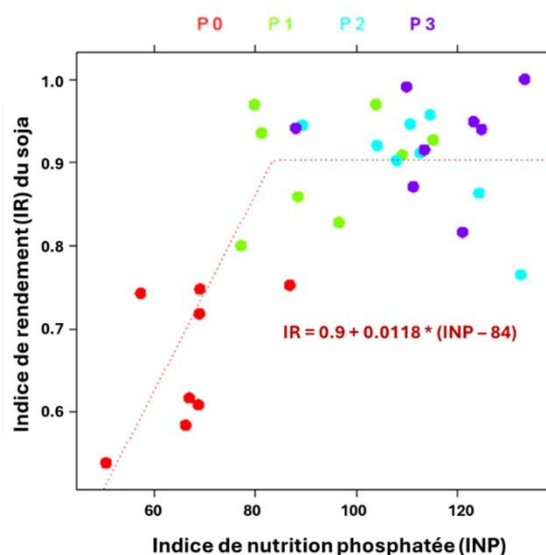
Description de la figure

Les graphiques a. et b. représentent la relation entre la teneur en phosphore et, respectivement, la biomasse et la teneur en azote de la luzerne mesurées à 4 stades de développement. Des ajustements de ces relations à partir des mesures sont représentés sous la forme d'une courbe exponentielle décroissante (graphique a.) et d'une droite croissante (graphique b.) dont les équations apparaissent sur chaque graphique. On observe qu'entre la date de mesure la plus récente et la date la plus tardive, la biomasse de la luzerne augmente tandis que ses teneurs en P et N diminuent.

3.2 Référentiels d'interprétation des indices de nutrition phosphatée établis pour le soja, le blé tendre, le maïs et la luzerne

3.2.1 Seuils d'interprétation des indices de nutrition phosphatée du soja déterminés par ajustement d'un modèle linéaire plateau

La modélisation de la relation entre l'indice de nutrition phosphatée (INP) et l'indice de rendement (IR) selon un formalisme linéaire plateau n'a pu être ajustée que pour le soja. La figure 4 illustre cet ajustement pour l'INP calculé à partir de la biomasse à la 10^{ème} date de mesure et le tableau 1 présente l'ensemble des résultats d'ajustement obtenus pour les INP calculés à partir de la biomasse et ceux calculés à partir de la teneur en N (tN), pour chaque date de mesure. L'ajustement n'a pas été possible pour 4 dates avec chacun des modes de calcul de l'INP. Le seuil d'INP en dessous duquel se produit une perte de rendement pour le soja, qui correspond au paramètre sINP de l'équation, a été déterminé pour toutes les autres dates (tableau 1). Il varie entre 77 et 127 lorsque l'INP est calculé à partir de la biomasse et entre 84 et 104 lorsque l'INP est calculé à partir de la teneur en N. Les seuils « critique » et de « vigilance » retenus en écartant les valeurs extrêmes sont respectivement de 80 et 120 pour l'INP « biomasse » et 90 et 100 pour l'INP « teneur en N ».



La couleur des points correspond aux quatre traitements de l'essai, P0 (rouge), P1 (vert), P2 (bleu turquoise) et P3 (indigo) qui correspondent à des niveaux de disponibilité en P croissants.

Figure 4 : Relation entre indice de rendement (IR) et indice de nutrition phosphatée (INP) du soja calculé à la date 10 à partir de la mesure de biomasse.

Description de la figure

La figure présente l'ajustement de la relation entre indice de rendement (IR) et indice de nutrition phosphatée (INP) du soja à partir du nuage de points mesurés. L'ajustement suit un formalisme de type « linéaire plateau » représenté par une droite croissante jusqu'à la valeur d'INP de 84 puis une droite horizontale correspondant à une valeur d'IR de 0.9. Les points rouges, correspondant au traitement P0, se détachent nettement des autres et présentent à la fois les INP et les IR les plus faibles.

Tableau 1 : Paramètres d'ajustement de la relation entre indice de rendement et INP du soja pour chacune des dates de mesure et chaque mode de calcul de l'INP.

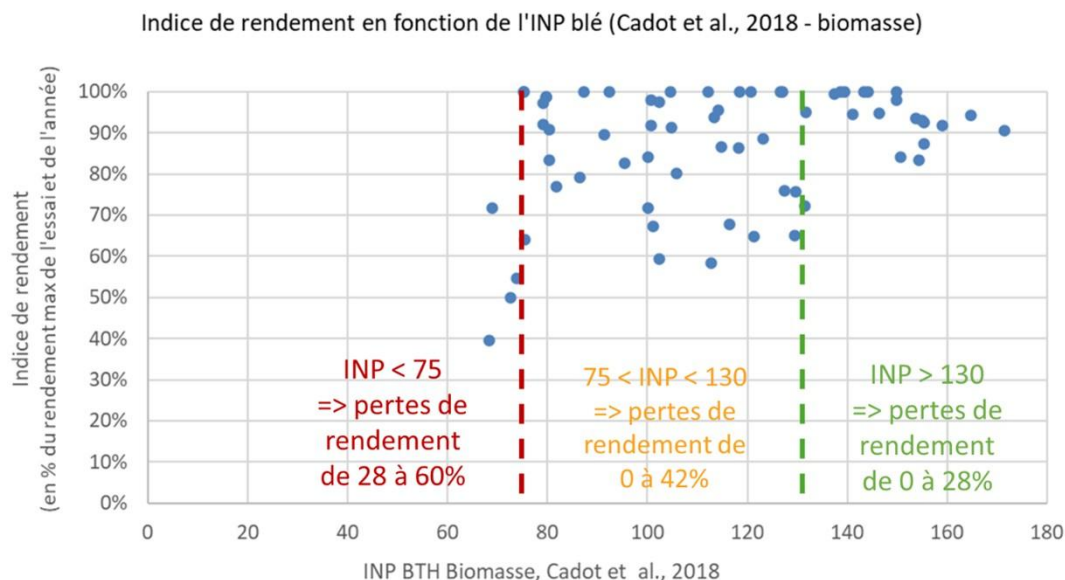
Date de mesure	INP calculé à partir de la biomasse				INP calculé à partir de la teneur en azote			
	p	a	sINP	ETR	p	a	sINP	ETR
1	0,93	0,0109	77	0,070	0,91	0,0118	84	0,077
2	0,99	0,0049	117	0,085	0,91	0,0079	92	0,079
3		ajustement impossible			0,91	0,0086	98	0,081
4	0,91	0,0125	77	0,068		ajustement impossible		
5	1,00	0,0049	127	0,080	0,90	0,0111	93	0,086
6		ajustement impossible			0,91	0,0092	99	0,075
7		ajustement impossible				ajustement impossible		
8		ajustement impossible				ajustement impossible		
9	0,91	0,0047	105	0,108		ajustement impossible		
10	0,90	0,0118	84	0,076	0,90	0,0068	104	0,109
11	0,91	0,0082	101	0,067	0,91	0,0070	96	0,086

ETR : écart type résiduel de l'ajustement



3.2.2 Seuils d'interprétation pour les indices de nutrition phosphatée du blé, du maïs et de la luzerne déterminés par lecture graphique

Faute d'ajustement d'un modèle linéaire plateau, les seuils « critiques » et « de vigilance » pour les INP du blé tendre, du maïs et de la luzerne ont été déterminés en positionnant, dans les nuages de points représentant les relations entre les IR et les INP calculées sur l'essai longue durée en AB de Dunière et sur l'essai courbe de réponse au P en Champagne, des droites délimitant des zones correspondant à des niveaux d'IR faibles, moyens et élevés. La figure 5 illustre les résultats obtenus pour la relation entre l'IR et l'INP du blé déterminé à partir de la courbe de dilution du P établie par Cadot *et al.*, 2018.



Ligne en pointillé rouge : seuil « critique » d'INP en dessous duquel les pertes de rendement sont assez fréquentes et peuvent être très importantes

Ligne en pointillé vert : seuil « de vigilance » pour l'INP au-dessus duquel les pertes de rendement sont rares et relativement limitées

Figure 5 : Indice de rendement en fonction de l'INP du blé calculé à partir de la teneur critique en phosphore déterminée à l'aide de la courbe de dilution du phosphore publiée par Cadot *et al.*, 2018.

Description de la figure

La figure se présente sous la forme d'un nuage de points mettant en relation l'INP du blé en abscisses avec son indice de rendement en ordonnées et délimité par 2 droites verticales en 3 zones.

De gauche à droite :

Ligne verticale en pointillé rouge au point 75 sur l'axe des abscisses représentant le seuil « critique » d'INP en dessous duquel les pertes de rendement sont assez fréquentes et peuvent être très importantes.

Ligne verticale en pointillé vert au point 130 sur l'axe des abscisses représentant le seuil « de vigilance » pour l'INP au-dessus duquel les pertes de rendement sont rares et relativement limitées.

La majeure partie des points se situent entre la ligne rouge et la ligne verte et correspondent à des indices de rendement (IR) compris entre 58 et 100 % du rendement maximal. Les IR des points situés à gauche de la ligne rouge vont de 40 % à 72 %. Les points à droite de la ligne verte ont tous des IR > 82 %.

Dans cet exemple, le seuil « critique » et le seuil « de vigilance » d'INP « biomasse » ont été fixés respectivement à 75 et 130. Pour un INP inférieur à 75, les pertes de rendement peuvent atteindre 60 % tandis qu'au-delà d'un INP de 130, elles n'excèdent jamais plus de 28 %.



3.2.3 Identification des seuils d'interprétation des indices de nutrition phosphatée les plus discriminants

La capacité de l'INP à permettre un diagnostic de nutrition phosphatée pertinent a été évaluée pour l'ensemble des relations de P_c publiées dans des études antérieures pour le blé tendre et le maïs ou établies dans cette étude pour le soja et la luzerne, chacune de ces relations étant associée à un jeu de seuils « critique » et « de vigilance » déterminé selon la méthode présentée au paragraphe 2.3.3. Le tableau 2 illustre les résultats obtenus pour l'INP calculé sur blé à partir de la relation de Cadot *et al.* (2018) : $P_c = 4,44 \times \text{Biomasse}^{-0,41}$.

Tableau 2 : Répartition des observations sur blé par classe d'INP calculé selon la relation de teneur critique en phosphore en fonction de la biomasse publiée par Cadot *et al.* (2018) et par classe d'IR.

Indice de rendement	INP Cadot <i>et al.</i> , 2018 (Biomasse)		
	Très limitant (INP ≤ 75)	Limitant ($75 < \text{INP} < 130$)	Non limitant (INP ≥ 130)
Très limitant (IR $\leq 0,6$)	3 (S)	2 (A)	0 (M)
Limitant ($0,6 < \text{IR} < 0,8$)	1 (A)	10 (S)	1 (A)
Peu limitant (IR $\geq 0,8$)	0 (M)	29 (A)	19 (S)

Diagnostics « satisfaisants » (S) : 49 %, Diagnostics « acceptables » (A) : 51 %, « Mauvais » diagnostics (M) : 0 %

Dans cet exemple, le diagnostic est jugé « satisfaisant » pour environ la moitié des situations (INP et IR classés comme « très limitants » ou INP et IR « limitants » ou INP « non limitant » et IR « peu limitant ») et « acceptable » pour les autres situations. Aucune situation n'a abouti à un « mauvais » diagnostic (IR « peu limitant » alors que l'INP est « très limitant » ou IR « très limitant » alors que l'INP est « non limitant »).

Cette évaluation, répétée pour chaque équation de P_c et chaque culture, a permis d'identifier les référentiels d'interprétation de l'INP (relations de P_c et jeux de seuils « critique » et « de vigilance » associés) les plus prometteurs qui sont détaillés en gras dans le tableau 3. Pour le blé et la luzerne, c'est l'INP calculé à partir d'une mesure de biomasse selon un formalisme de type $P_c = a \times \text{Biomasse}^b$ respectivement associé aux seuils « critiques » d'INP de 75 et 100 et aux seuils « de vigilance » de 130 et 110 qui conduit au plus grand nombre de diagnostics jugés « satisfaisants » ou « acceptables ». Pour le maïs et le soja, c'est l'INP calculé à partir de la teneur en N selon un formalisme $P_c = a \times tN + b$ qui apparaît le plus adapté.

Les pertes de rendements observées pour le blé et le maïs dans l'essai longue durée P en AB de Dunière, pour le soja dans l'essai longue durée P d'Auzeville et pour la luzerne dans l'essai « courbe de réponse au phosphore » en Champagne, pour des valeurs d'INP inférieures au seuil « critique », supérieures au seuil « de vigilance » ou comprises entre les deux sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Proposition de seuils d'interprétation de l'INP pour le blé, le maïs, le soja et la luzerne.

Culture (stade de mesure)	Equation P_c retenue	Pertes de rendement liées au P	Seuil « critique »	Pertes de rendement liées au P	Seuil « de vigilance »	Pertes de rendement liées au P
Blé tendre (avant mi- épiaison) n = 68	Cadot <i>et al.</i>, 2018 $P_c = 4,44 \times$ Biomasse^{-0,41}	46 % [28 %, 60 %] n=4	75	13 % [0 %, 42 %] n=41	130	7 % [0 %, 28 %] n=20
	Cadot <i>et al.</i> , 2018 $P_c = 0,083 \times tN$ + 0,88	19 % [0 %, 60 %] n=9	75	13 % [0 %, 50 %] n=48	120	9 % [0 %, 28 %] n=11



Maïs grain (avant début floraison) n = 66	Gagnon <i>et al</i> , 2020 Pc = 3,98 x Biomasse ^{-0,28}	17 % [0 %, 31 %] n=7	75	13 % [0 %, 46 %] n=50	130	6 % [0 %, 16 %] n=9
	Cadot <i>et al</i>, 2018 Pc = 0,083 x tN + 0,39	20 % [0 %, 39 %] n=7	100	12 % [0 %, 46 %] n=46	140	9 % [0 %, 47 %] n=13
Soja (entre 2 nœuds et début floraison) n = 352	PhosphoBio Pc = 2,97 x Biomasse ^{-0,17}	28 % [1 %, 46 %] n=98	80	10 % [0 %, 46 %], n=204	120	9 % [0 %, 23 %] n=50
	PhosphoBio Pc = 0,074 x tN + 0,48	26 % [1 %, 46 %] n=118	90	11 % [1 %, 38 %] n=54	100	9 % [0 %, 28 %] n=180
Luzerne (avant début floraison) n = 72	PhosphoBio Pc = 4,68 x Biomasse^{-0,26}	28 % [8 %, 56 %] n=23	100	16 % [0 %, 32 %] n=42	110	7 % [0 %, 11 %] n=7
	PhosphoBio Pc = 0,08 x tN + 0,24	19 % [0 %, 46 %] n=30	100	20 % [0 %, 56 %] n=35	115	12 % [0 %, 23 %] n=7

Les 3ème, 5ème et 7ème colonnes du tableau indiquent respectivement les valeurs moyennes, minimales et maximales des pertes de rendement ainsi que le nombre d'observations pour des valeurs d'INP inférieures au seuil « critique » (seuil d'INP en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé), comprises entre le seuil « critique » et le seuil « de vigilance » (seuil d'INP au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible) et supérieures au seuil « de vigilance ».

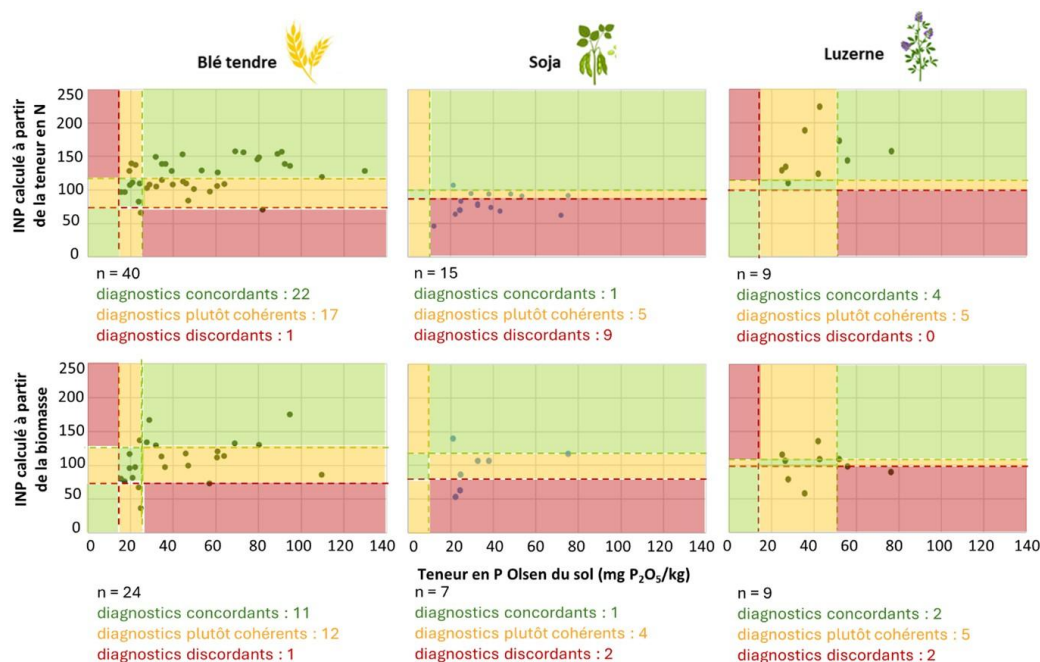
Les stades de mesures indiqués correspondent au domaine de validité du référentiel, « n » : nombre d'observations

En gras : mode de calcul le plus pertinent pour la culture

3.3. Diagnostic de carence en P des cultures AB à l'aide d'indices de nutrition.

Les INP du blé tendre, du soja et de la luzerne calculés sur les 64 parcelles de l'observatoire de la fertilité des sols en AB du projet PhosphoBio à partir des relations de Pc sélectionnées dans le tableau 3 ont été mis en relation avec les teneurs en P₂O₅ Olsen du sol mesurées pour ces mêmes parcelles (figure 6).

Le nombre de situations où ces deux approches de diagnostic concordent (teneur en P₂O₅ Olsen et INP tous deux inférieurs au seuil critique, ou tous deux compris entre le seuil critique et le seuil de vigilance ou tous deux supérieurs au seuil de vigilance) ou, au contraire, sont discordants (teneur en P₂O₅ Olsen inférieure au seuil critique et INP supérieur au seuil de vigilance ou teneur en P₂O₅ Olsen supérieure au seuil de vigilance et INP inférieur au seuil critique), ont pu être déterminés.



Les lignes en pointillés correspondent aux seuils critiques et aux seuils de vigilance définis, pour chaque culture, pour l'INP et pour la teneur en P du sol (seuil de vigilance : respectivement 25, 10 et 50 ppm P_2O_5 Olsen pour le blé tendre, le soja et la luzerne, seuil critique : 15 ppm pour le blé tendre et la luzerne, non défini pour le soja)

Les aires rouges, jaunes et vertes correspondent respectivement aux situations où les deux diagnostics (selon l'analyse de terre et selon l'INP) sont discordants, sont plutôt cohérents et concordent.

Figure 6 : Mise en relation sur les parcelles de l'observatoire PhosphoBio des INP (axe des ordonnées) calculés soit à partir de la teneur en azote (haut) soit à partir de la biomasse (bas) avec la teneur en P_2O_5 Olsen du sol (axe des abscisses) pour le blé tendre, le soja et la luzerne.

Description de la figure

La figure se compose de 6 graphiques mettant en relation, sous forme de nuages de points, la teneur en P Olsen du sol et l'INP calculé à partir de la teneur en N ou de la biomasse pour le blé, le soja et la luzerne. Chaque graphique comprend 2 lignes horizontales pointillées, l'une verte, l'autre rouge, qui correspondent respectivement aux seuils d'INP « critique » et de « vigilance » de chaque culture et 2 lignes verticales pointillées, l'une verte, l'autre rouge, qui correspondent respectivement aux seuils de teneur en P Olsen « critique » et de « vigilance » de chaque culture (pour le soja, la ligne rouge n'apparaît pas). Ces lignes délimitent dans chaque graphique des zones rouges, jaunes et vertes.

Pour le blé et la luzerne, la majorité des points d'observations se situent dans les zones jaunes et vertes, quelle que soit la méthode de calcul de l'INP. Pour le soja, la majorité des points correspondant à l'INP calculé à partir de la teneur en N, se trouvent dans la zone rouge tandis que ceux correspondant à l'INP calculé à partir de la biomasse se répartissent principalement dans les zones rouge et jaune.

Cette évaluation fait ressortir une assez bonne cohérence entre les diagnostics obtenus à partir d'une analyse de terre et ceux obtenus à partir de l'INP pour le blé et la luzerne. En revanche, pour le soja, ces deux approches de diagnostic sont assez peu concordantes : le diagnostic reposant sur l'INP indique, pour les parcelles de l'observatoire, des cas assez fréquents de nutrition phosphatée insuffisante, alors que le diagnostic basé sur l'analyse de terre ne met aucun risque de carence en P en évidence.

De plus, cette évaluation montre que, pour le blé et la luzerne, la concordance entre les deux types de diagnostics est meilleure en calculant l'INP à partir de la teneur en azote tandis que pour le soja, elle est plus grande en réalisant le calcul à partir de la biomasse. Ces résultats sont contradictoires avec ceux de l'évaluation du mode de calcul de l'INP jugé le plus pertinent présentés précédemment (tableau 3).



4. Discussion

Les travaux conduits dans cette étude ont permis de définir, pour le soja et la luzerne, deux jeux d'équations de teneur en P critique (P_c), soit en fonction de leur biomasse soit en fonction de leur teneur en azote à partir de deux essais conduits en AC. Grâce à ces équations, il est désormais possible de calculer des INP pour ces deux espèces. Dans le cas du soja, la teneur minimale du sol de l'essai en P_2O_5 Olsen du sol mesurée pour le traitement sans apport de P (P_0) était très faible (7 ppm) et une réponse significative du niveau de fertilisation phosphatée sur la biomasse a été observée. En revanche, pour la luzerne, la teneur initiale du sol en P était nettement plus élevée (52 ppm de P_2O_5 Olsen) et aucune différence significative de biomasse n'a pu être mise en évidence entre les traitements même si, en moyenne, la biomasse du P_0 était inférieure aux autres. Les relations de P_c pour cette culture doivent donc être considérées avec prudence car elles ont été obtenues en situation non (ou peu) limitante en P et nécessiteraient d'être validées dans un contexte où la réponse au P est plus marquée.

De plus, des seuils d'interprétation de l'INP servant à évaluer le risque de perte de rendement associé à une déficience en P à partir de la valeur de cet indicateur ont été établis pour ces deux légumineuses ainsi que pour le blé tendre et le maïs. Les références obtenues (relations de P_c et seuils d'interprétation des INP associés) ont été données à la fois pour les INP calculés à partir de la biomasse et pour les INP calculés à partir de la teneur en N (tableau 3), même si un seul de ces modes de calcul pourrait être privilégié, selon la culture. En effet, les seconds présentent l'avantage d'être plus faciles à mettre en œuvre : l'envoi à un laboratoire d'analyses d'un échantillon de plante suffit sans qu'il ne soit nécessaire de mesurer la biomasse. Quoiqu'un peu plus contraignants du fait de cette mesure supplémentaire nécessaire à leur calcul, les premiers permettent toutefois d'estimer simultanément un indicateur complémentaire : l'INN.

Les référentiels d'interprétation des INP du blé et du maïs ont été établis à partir de données provenant uniquement de l'essai longue durée AB de Dunière. De plus, dans cet essai, les prélèvements de biomasse utilisés pour le calcul des indices de nutrition ont été réalisés à la floraison des cultures qui correspond à la limite de validité de cet indicateur. Disposer d'un jeu de données obtenues à des stades plus précoces et couvrant une diversité de conditions pédoclimatiques aurait été préférable et apporterait plus de robustesse à ces référentiels. Néanmoins, ces premiers résultats sont prometteurs et semblent indiquer que, pour ces deux cultures, les relations de P_c , bien qu'ayant été établies à partir de jeux de données acquis en AC, peuvent être utilisées en contexte d'AB pour calculer des INP. En effet, si le mode de production (AC ou AB) peut avoir un fort impact sur la croissance des cultures et leur niveau de nutrition azotée, il est en revanche peu probable que les relations entre la teneur en P des plantes et leur biomasse ou leur teneur en N ne soient pas les mêmes pour ces deux modes de production.

Pour le soja comme pour la luzerne, les seuils d'interprétation de l'INP définis dans cette étude proviennent des essais ayant servi à construire leurs relations de P_c respectives (essai P longue durée d'Auzeville et essai « courbe de réponse au P » en Champagne), tous deux conduits en AC. Ces seuils sont donc, a priori, moins robustes que ceux proposés pour le blé et le maïs qui présentent l'avantage d'avoir été déterminés dans un contexte indépendant des essais ayant permis d'établir leurs relations de P_c respectives. Pour ces légumineuses, toutes deux largement présentes dans les systèmes de culture conduits en AB, il reste donc à valider la pertinence de ces seuils dans d'autres contextes et notamment en AB.

Les résultats de test des INP et de leurs référentiels d'interprétation sur les parcelles de l'observatoire PhosphoBio sont cohérents, pour le blé, avec les résultats d'analyses de terre et laissent à penser que l'INP pourrait être utilisé sur cette culture pour le diagnostic de carence en P. En revanche, pour la luzerne et surtout pour le soja, des divergences apparaissent entre le diagnostic reposant sur les INP et le diagnostic basé sur l'analyse de terre. Cependant, l'analyse de terre donne uniquement une



estimation de la quantité de P du sol assimilable par les plantes tandis que l'INP reflète le niveau de satisfaction de besoin de la plante en P qui résulte de cette offre en P du sol mais aussi des conditions d'absorption du P par la plante. Ces dernières pourraient être pénalisées, par exemple, par un déficit hydrique, par un faible enracinement pouvant être causé par un problème de structure du sol ou par un excès d'eau temporaire ou par une forte pression d'adventices. Des investigations supplémentaires auraient été utiles pour identifier la présence éventuelle d'autres facteurs limitants que le P qui expliquerait les écarts constatés, pour le soja et luzerne, entre les deux approches de diagnostic.

Ces écarts confirment, par ailleurs la nécessité de poursuivre, pour ces légumineuses, l'étape de validation des seuils d'interprétation des INP. Malgré cela, cette étude visant à faire progresser le diagnostic de carence en P en AB, ouvre de nouvelles perspectives pour le diagnostic de nutrition phosphatée à travers l'analyse de végétaux qui pourrait être utilisé de manière complémentaire à l'analyse de terre.

5. Conclusion

Deux essais conduits en AC ont permis d'établir pour une légumineuse à graine, le soja, et pour une légumineuse fourragère, la luzerne, des relations de teneur en P critique (Pc) nécessaires au calcul de l'INP qui n'existaient pas encore pour ces deux cultures. Pour chaque culture, deux relations ont été définies : l'une en fonction de la biomasse, l'autre en fonction de la teneur en azote. Toutefois, dans le cas de la luzerne, ces relations nécessiteraient d'être validées dans un contexte où la réponse au P est plus marquée. Des seuils d'interprétation de l'INP ont été définis pour ces deux légumineuses en étudiant, dans ces mêmes essais, la relation entre cet indicateur et l'indice de rendement de ces cultures. Des référentiels d'interprétation des INP adaptés au contexte de l'AB ont été proposés pour le blé tendre et le maïs. Ils associent à des relations de Pc qui avaient déjà été publiées pour ces cultures de nouveaux seuils déterminés à partir de données provenant d'un essai longue durée conduit en AB. La validité des seuils d'INP proposés pour le blé, le soja et la luzerne a été testée en réalisant un diagnostic de nutrition phosphatée sur un observatoire de parcelles conduites en AB. Les résultats obtenus, confrontés aux résultats d'analyse de terre des mêmes parcelles, sont prometteurs pour le blé tendre et semblent indiquer que l'INP indicateur pourrait être utilisé comme un outil de diagnostic complémentaire de l'analyse de terre. Les références obtenues nécessiteraient néanmoins d'être encore validées dans une gamme de situations plus large et notamment en AB pour le soja et la luzerne.

Ethique

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

Grégory VERICEL : [0009-0005-1490-5331](https://orcid.org/0009-0005-1490-5331), Aloïs ARTAUX : [0009-0004-9688-5639](https://orcid.org/0009-0004-9688-5639),



Pietro BARBIERI : [0000-0003-3248-4487](#), Enguerrand BUREL : [0000-0003-1966-7844](#),
Joséphine DEMAY : [0000-0001-5416-2601](#), Quentin GIRARD : [0009-0008-5711-7417](#),
Charlotte GLACHANT : [0009-0004-6646-6986](#), Claire JOUANY : [0000-0003-0122-3268](#),
Morgan MAIGNAN : [0009-0005-1790-4713](#), Eve-Anna SANNER : [0009-0003-2285-5667](#),
Matthieu VALE : [0009-0001-0769-4258](#), Alain MOLLIER : [0000-0002-6261-5284](#)

Contributions des auteurs

Grégory VERICEL : recueil, gestion et analyse des données, conceptualisation, rédaction, supervision,
Aloïs ARTAUX, Enguerrand BUREL : gestion et analyse des données, rédaction (révision et correction),
Charlotte GLACHANT, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE : recueil des données,

Pietro BARBIERI, Joséphine DEMAY : relecture, Quentin GIRARD, Morgan MAIGNAN : recueil, gestion
et analyse des données, Claire JOUANY : recueil, gestion et analyse des données, conceptualisation,
Alain MOLLIER : analyse des données, conceptualisation, supervision.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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

Cette étude a mobilisé pour sa réalisation de nombreux essais.

Nous adressons un remerciement particulier à l'équipe de l'unité expérimentale de l'INRAE d'Auzeville (31) qui a mis à disposition son essai longue durée P et a réalisé la conduite de la culture de soja en 2021 pour les besoins de nos travaux.

Merci aussi à l'équipe Arvalis de Châlons en Champagne qui a conduit en 2023 l'essai « INP » sur luzerne à La Veuve (51) ainsi qu'à l'agriculteur qui a accepté de mettre à notre disposition une de ses parcelles pour accueillir cet essai.

Nous remercions également les équipes de l'Association de Gestion de la Ferme Expérimentale d'Etoile (AGFEE), de la Chambre d'agriculture de la Drôme, d'Arvalis et de la FNAMS basées à Etoile-sur-Rhône (26) qui assurent la conduite des cultures et leur suivi sur l'essai de Dunière depuis 1999.

Merci enfin aux équipes techniques du laboratoire AUREA pour la réalisation des prélèvements et des analyses de terre et de végétaux.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet PhosphoBio (projet CASDAR Innovation et Partenariat 2020 n° 20AIP1626879) qui a bénéficié du soutien financier du Ministère en charge de l'Agriculture.

Références bibliographiques

Bélanger, G., Ziadi, N., Pageau, D., Grant, C., Högnäsbacka, M., Virkajärvi, P., Hu, Z., Lu, J., Lafond, J., Nyiraneza, J. (2015). A Model of Critical Phosphorus Concentration in the Shoot Biomass of Wheat. *Agronomy Journal*, 107(3), 963–970. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0451>

Blanchart, E., Cabidoche, J.-M., Gautronneau, Y., Moreau, R. (2005). Les aspects spatiaux et environnementaux de l'agriculture biologique. *Agriculture biologique en Martinique : quelles perspectives de développement ? IRD éditions*, pp.325-379, 2-7099-1555-3.



- Cadot, S., Bélanger, G., Ziadi, N., Morel, C., Sinaj, S. (2018). Critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of P fertilization. *Nutrient Cycling In Agroecosystems*, 112(3), 417–433. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9956-0>
- Comifer, groupe PKMg. (2019). La fertilisation P – K - Mg. Les bases du raisonnement. Editions Comifer. 39p.
- Coulis, M. (2015). Effets de la conversion à l'agriculture biologique sur l'abondance et la diversité de la macrofaune saprophage dans la canne à sucre en Martinique. 36p.
- Fontaine L. et al. (2019). InnovAB - Améliorer les systèmes de grande culture en agriculture biologique : enseignements d'un réseau d'expérimentations de longue durée. *Innovations Agronomiques*, 71, 295-309.
- Fontana, M., Bélanger, G., Hirte, J., Ziadi, N., Elfouki S., Bragazza, L., Liebisch, F., Sinaj, S. (2021). Critical plant phosphorus for winter wheat assessed from long-term field experiments. *European Journal of Agronomy*. 126, 126263. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126263>
- Fontana, M., Bélanger, G., Ciampitti, I., Ziadi, N., Guillaume, T., Steiner, S., Bragazza, L. (2025). Critical dilution curves for phosphorus, potassium, and sulfur along with relationships to nitrogen for major crops. *Plant And Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07929-y>
- Gagnon, B., Ziadi, N., Bélanger, G., Parent, G. (2020). Validation and use of critical phosphorus concentration in maize. *European Journal of Agronomy* 120, 126147. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126147>
- Garbaye J. (2013). La symbiose mycorhizienne, une association entre les plantes et les champignons. *Editions Quae*, Versailles, 251 p.
- Girard, Q., Véricel, G., Cabeza-Orcel, P. (2021). Fertilisation phosphatée en AB : l'observatoire PhosphoBio est en place. *Perspectives Agricoles n°493*, 65-67.
- Gosling P., Hodge A., Goodlass G., Bending G.D. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113, pp.17-35.
- Jouany, C., Morel, C., Ziadi, N., Bélanger, G., Sinaj, S., Stroia, C., Cruz, P., Theau, J.-P., Duru, M. (2021). Plant and soil tests to optimize phosphorus fertilization management of grasslands, *European Journal of Agronomy*, Volume 125.
- Lemaire, G., Gastal, F. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. In *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Lemaire G., Chapter 1. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag
- Lemaire, G., Sinclair, T., Sadras, V., Bélanger, G. (2019). Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. A review. *Agronomy For Sustainable Development*, 39(2), 27. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0570-6>
- Lemerrier, B., Caubet, M., Le Pioufle, N., Rabot, E., Pasquier, C., Bispo, A., Saby, N. (2023). Évolutions du pH et des teneurs en P K Mg dans les sols de France hexagonale entre 2003 et 2020 à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *16è Rencontres Comifer-Gemas : 21-22 et 23 novembre 2023 – Tours*. 10p.
- Maignan, M., Véricel, G. (2022). Fertilité des sols en conduite bio : le phosphore sous surveillance. *Perspectives Agricoles n°501*, 44-48.
- Morel, C., Plénet, D., Mollier, A. (2021). Calibration of maize phosphorus status by plant-available soil P assessed by common and process-based approaches. Is it soil-specific or not ? *European Journal of Agronomy* 122, 126174. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126174>
- Plassard C., Robin A., Le Cadre E., Marsden C., Trap J., Herrmann L., Waithaisong K., Lesueur D., Blanchart E., Chapuis-Lardy L., Hinsinger P. (2015). Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ? *Innovations Agronomiques*, 43, pp. 115-138.
- Salette, J., Huché, L. (1991). Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par analyse du végétal : principes, mise en œuvre, exemples. *Fourrages*. 125, 3-18.
- Salette, J., Lemaire, G. (1981). Sur la variation de la teneur en azote des graminées fourragères pendant leur croissance : formulation d'une loi de dilution. *Académie des Sciences*. Paris, 292 : 875-878.



Seghouani, M., Bravin, M.N., Lecharpentier, P., Mollier, A. (2025). Simulating phosphorus dynamics between the soil and the crop with the STICS model : Formalization and multi-site evaluation on maize in temperate area. *European Journal of Agronomy* 164, 127475. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127475>

Thélier-Huché L., Farruggia A., Castillon P. (1999). L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires. *Brochure Comifer*. 34 p.

Véricel, G., Hélias, R., Soenen, B. (2019) Mise au point d'indices de nutrition PK sur blé tendre pour évaluer la fertilité chimique des sols en AB. *Rencontres COMIFER-GEMAS*, Dijon – 20 et 21 novembre 2019.

Véricel, G., Lemerrier, B., Saby N., Gravé, J. (2025). Fertilité des sols : les teneurs en phosphore sont a priori plus faibles en bio. *Perspectives Agricoles* n°532, 22-24.

Véricel, G., Artaux, A., Barbieri, P., Burel, E., Demay, J., Girard, Q., Glachant, C., Jouany, C., Maignan, M., Sanner, E.-A., Valé, M., Mollier, A., 2026. Mise au point de références pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée des cultures en Agriculture biologique. *Innovations Agronomiques* n°112.

Ziadi, N., Belanger, G., Cambouris, A. N., Tremblay, N., Nolin M. C., Claessens, A. (2007). Relationship between P and N concentrations in corn. *Agronomy Journal*. 99 : 833–841. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0199>.

Ziadi N., Belanger, G., Cambouris, A. N., Tremblay, N., Nolin M. C., Claessens, A. (2008). Relationship between phosphorus and nitrogen concentrations in spring wheat. *Agronomy Journal*. 100 : 80–86. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0119>

Pour citer cet article : Grégory VÉRICEL, Aloïs ARTAUX, Pietro BARBIERI, Enguerrand BUREL, Joséphine DEMAY, Quentin GIRARD, Charlotte GLACHANT, Claire JOUANY, Morgan MAIGNAN, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE & Alain MOLLIER, 2026 - Mise au point et adaptation d'indices de nutrition phosphatée pour différentes espèces de grandes cultures au contexte de l'Agriculture Biologique. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art02>



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.



Les parcours en élevage de monogastriques en agriculture biologique : un levier pour l'autonomie alimentaire ?

Mélanie GOUJON¹

¹ Chambre d'agriculture de région des Pays de la Loire, 9 rue André Brouard BP 70510, 49105 ANGERS cedex 2

Correspondance : melanie.goujon@pl.chambagri.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art03>

Résumé

Le renforcement depuis 2022 du cahier des charges Agriculture Biologique (AB) appuie les enjeux d'autonomie protéique et interroge la cohérence des systèmes monogastriques biologiques. Dans ce contexte, les parcours apparaissent comme un levier potentiel, pour répondre à des enjeux à la fois alimentaires, zootechniques et sociétaux. Cet article présente les résultats du CASDAR VALORAGE, fondés sur des enquêtes auprès d'éleveurs de porcs et de poules pondeuses et sur des essais conduits en fermes commerciales. Les résultats montrent que les parcours sont largement associés au bien-être animal et à une image positive des élevages, mais que leur contribution réelle à l'alimentation des animaux reste variable et fortement dépendant des conditions pédoclimatiques, ainsi que de la composition et de la gestion du couvert végétal. Les essais mettent en évidence un potentiel de réduction des apports en aliments concentrés, sous réserve d'un pilotage technique fin du pâturage. Les parcours apparaissent ainsi comme un levier d'optimisation des systèmes, mobilisable en complément de l'alimentation à base de concentrés, plutôt que comme une solution autonome.

Mots-clés : Porcs, Poules pondeuses, Agriculture biologique, Autonomie protéique, Parcours

Abstract: Outdoor runs in organic monogastric farming: a lever for feed self-sufficiency?

The strengthening of organic farming (OF) regulations since 2022 reinforces protein self-sufficiency issues and raises questions about the coherence of organic monogastric systems. In this context, outdoor runs appear as a potential lever for addressing nutritional, zootechnical and societal challenges. This paper presents the results of the CASDAR VALORAGE project, based on surveys conducted among organic pig and laying hen farmers and on trials carried out on commercial farms. The results show that outdoor runs are widely associated with animal welfare and a positive image of livestock farming, but that their actual nutritional contribution to animal nutrition remains variable and strongly dependent on pedoclimatic conditions, as well as on sward composition and management. The trials highlight a potential for reducing concentrate feed inputs, provided that outdoor runs are managed with fine technical control. Outdoor runs therefore appear to be a lever for optimizing systems, to be used as a complement to concentrate-based feeding rather than as an autonomous solution.

Keywords: Pigs; Laying hens; Organic farming; Protein self-sufficiency; Outdoor runs

1. Introduction

Depuis le 1^{er} janvier 2022, l'alimentation des animaux monogastriques en agriculture biologique (AB) doit être composée à 100 % de matières premières issues de l'AB. Seuls les porcs de moins de 35 kg et les jeunes volailles peuvent encore recevoir jusqu'à 5 % de protéines non biologiques jusque fin 2026. Ce durcissement des règles de certification a profondément modifié les stratégies de formulation des aliments, les fabricants s'orientant majoritairement vers une réduction de la part des protéagineux au profit de matières premières plus faciles à équilibrer en acides aminés, comme le tourteau de soja.



Dans ce contexte, l'augmentation de la demande en soja biologique est estimée entre +40 % et +50 % (Coop de France, 2014 ; Cereopa, 2017). Or, la collecte française de soja biologique, contrainte par des conditions pédoclimatiques spécifiques, reste globalement stable, autour de 40 000 à 45 000 t (FranceAgriMer, 2017). L'importation constitue donc aujourd'hui la principale réponse à la hausse des besoins, interrogeant la cohérence environnementale et territoriale des filières monogastriques biologiques, compte tenu de l'impact environnemental de la culture du soja et de son transport. Plus largement, cette situation questionne la capacité de l'AB à rester fidèle à ses principes fondateurs, afin de maintenir la confiance des consommateurs et l'appui de la société.

À ces enjeux s'ajoutent des attentes sociétales fortes concernant la concurrence entre usages alimentaires des productions végétales (« feed/food »). À l'échelle mondiale, environ 40 % des terres arables sont destinées à l'alimentation des animaux d'élevage (Mottet *et al.*, 2017 ; FAO, 2023 ; Govoni *et al.*, 2023), tandis que l'idée selon laquelle les systèmes d'élevage doivent prioritairement valoriser des ressources non consommables par l'homme (herbe, résidus de culture, coproduits) s'affirme de plus en plus dans les débats scientifiques et sociétaux (Laisse *et al.*, 2018 ; Barbieri *et al.*, 2022 ; Bikker *et al.*, 2023 ; Gatto *et al.*, 2024).

Parallèlement, le lien au sol, fondement de AB, a été renforcé sur le plan réglementaire. Pour les monogastriques, ce renforcement se traduit notamment par l'obligation d'accès au plein air — y compris pour de nouvelles catégories d'animaux, telles que les poulettes futures pondeuses à partir de 2029 — et par une augmentation de la part minimale d'aliments d'origine locale, portée à 30 % depuis 2010.

Dans ce cadre, les parcours riches en protéines apparaissent comme une piste particulièrement pertinente pour l'alimentation des monogastriques. Ils permettent de répondre simultanément aux exigences réglementaires, aux attentes sociétales en matière de bien-être animal et aux objectifs d'autonomie alimentaire et économique des exploitations, tout en contribuant à limiter la concurrence feed/food et à améliorer la perception sociétale des élevages. Par ailleurs, les parcours rendent de nombreux services écosystémiques, notamment en termes de biodiversité, de stockage du carbone et de régulation climatique (Garcia *et al.*, 2023 ; Chiron *et al.*, 2022) comme l'ont aussi montré plusieurs projets CASDAR (PARCOURS, BOUQUET).

Des travaux conduits en station expérimentale ont mis en évidence l'intérêt alimentaire des parcours et des fourrages pour les monogastriques biologiques, tant chez les volailles que chez les porcins (cf. État de l'art). Toutefois, ces résultats restent encore peu traduits en références opérationnelles mobilisables en élevage et peu accompagnés par des outils de conseil adaptés. Dans le même temps, les retours de terrain (éleveurs, techniciens) indiquent que ces pratiques demeurent émergentes et suscitent de nombreux questionnements, notamment concernant la valeur alimentaire des ressources, leur gestion au quotidien et leur intégration dans les systèmes d'alimentation.

Dans ce contexte, le projet CASDAR VALORAGE visait à étudier les conditions d'optimisation de l'intégration des parcours et des fourrages dans l'alimentation, et plus largement dans les systèmes d'élevage des monogastriques en AB, en développant des solutions opérationnelles directement accessibles aux éleveurs.

Le présent article s'appuie sur les travaux conduits dans le cadre de ce projet et se centre sur l'utilisation des parcours par les éleveurs de volailles et de porcs en AB. Après un bref état de l'art, une première partie présente les enquêtes menées auprès des éleveurs afin de caractériser les pratiques existantes et les modalités de valorisation des parcours. Une deuxième partie décrit les essais conduits en fermes commerciales visant à évaluer l'intérêt et les conditions d'intégration des parcours dans les systèmes d'alimentation. Enfin, une discussion met en perspective les résultats obtenus en identifiant les leviers et les limites de développement de ces pratiques.



2. Etat de l'art : les parcours dans l'alimentation des monogastriques

2.1. Alimentation des volailles par les parcours en agriculture biologique

L'apport nutritionnel issu des parcours est potentiellement intéressant en poule pondeuse car la consommation de végétaux est significative, bien qu'influencée par le type de couvert implanté (Horsted *et al.*, 2006 ; Horsted *et al.*, 2007). Horsted *et al.* (2006) ont montré que l'ingestion de pâture par des poules pondeuses élevées en plein air varie de 10 à 30 g de matière sèche (MS) /poule/jour sur un parcours herbe-trèfle, et de 50 à 70 g de MS/poule/jour sur un parcours à base de chicorée. Par ailleurs, ces auteurs mettent en évidence une consommation sélective des espèces végétales : dans un mélange semé, des indices de sélectivité positifs sont observés pour des espèces à port bas (*Elytrigia repens*, *Lolium perenne*, *Trifolium repens* : 5,01 ; 5,40 ; 4,74), et des indices négatifs pour des espèces plus hautes (*Fagopyrum esculentum*, *Phacelia tanacetifolia* : -2,00 ; -2,06). Si les essais menés sur le sujet sont peu nombreux en pondeuse, ils restent prometteurs.

Les essais, plus nombreux, menés en poulet de chair, semblent confirmer l'intérêt de l'apport alimentaire issu des parcours. En effet, pour ce dernier, l'apport nutritionnel est intéressant car la consommation de végétaux peut représenter jusqu'à 20 % de la ration journalière (Weltin *et al.*, 2014 ; Jurjanz *et al.*, 2015). D'autres essais menés sur diverses espèces végétales consommées sur les parcours (Ortie, Fétuque, Ray Gras et Luzerne) ont permis de mettre en avant que si les végétaux sont récoltés jeunes et dans de bonnes conditions climatiques, la digestibilité apparente de l'azote est correcte ($63,80 \pm 9,68$; $82,10 \pm 4,75$; $79,90 \pm 4,53$; $73,91 \pm 10,92$, respectivement - Juin *et al.*, 2015). Par ailleurs, une moindre concentration en protéines de l'aliment encourage la consommation de végétaux sur les parcours (Horsted *et al.*, 2007 ; Germain, 2014). Des travaux menés à l'INRAE du Magneraud sur des parcours riches en biomasse et en protéines (graminées : fétuque, RGA ; chicorée et/ou légumineuses : luzerne, lotier, trèfle blanc, trèfle violet) ont montré des baisses de l'indice de consommation, tout en maintenant les poids (Brachet, 2017). Il a été estimé que 9 % des protéines consommées provenaient du parcours (Peron, 2019). Par ailleurs, la consommation de végétaux sur le parcours exerce des effets positifs sur les animaux : diminution du picage (Nielsen *et al.*, 2011), amélioration du confort digestif (Bébin *et al.*, 2013), expression du comportement naturel (Bignon *et al.*, 2015).

2.2. Alimentation des porcs par les parcours en agriculture biologique

Plusieurs travaux montrent que la quantité d'herbe ingérée par des porcs au pâturage est significative mais très variable d'un animal à l'autre (Mowat *et al.*, 2001 ; Riverra Ferre *et al.*, 2001 ; Gustafson et Stern, 2003, Sehested *et al.*, 2004). Jurjanz *et al.* (2013) indiquent que le niveau d'ingestion de pâture d'une truie peut atteindre 1,6 kg de MS/jour. Dans la même lignée, Maupertuis *et al.* (2018) montrent, dans un essai conduit à la ferme expérimentale des Trinottières, que cette quantité peut varier de 1,5 kg de MS/jour pour des truies de petit gabarit à 2,0 kg de MS/jour pour des truies de grand gabarit. Ce même essai, mené sur des truies gestantes rationnées à 80 % (ration témoin – 3 kg/truie/jour ; ration essai – 2,4 kg/truie/jour) et ayant accès à un parcours, met également en évidence leur forte motivation à pâturer et un maintien des performances de reproduction (Maupertuis *et al.*, 2018). La possibilité d'alterner parcours et fourrage conservé au cours de l'année est aussi une piste pour valoriser au mieux la ressource (Kongsted, 2014). L'intérêt serait également économique, en raison de la teneur élevée en protéines digestibles des légumineuses fourragères (Sommer et Sundrum, 2014).



3. Les enquêtes menées sur le terrain auprès des éleveurs

3.1. Matériels et méthodes

Les enquêtes ont été conduites en 2021 sur deux territoires du Grand Ouest, zones dynamiques en matière d'élevages de monogastriques : les Pays de la Loire et la Bretagne. En Pays de la Loire, la population de référence comprenait 145 élevages de porcs AB et 290 élevages de poules pondeuses AB. En Bretagne, elle comprenait 96 élevages de porcs AB et 326 élevages de poules pondeuses AB.

Les dispositifs mis en place différaient suivant la région. En Pays de la Loire, les données ont été collectées à partir d'une enquête postale, réalisée via l'enquête annuelle de l'Observatoire Régional de l'Agriculture Biologique (ORAB). Le questionnaire portait sur les pratiques d'élevage et d'alimentation, avec un focus particulier sur l'utilisation des parcours. Les retours ont été obtenus par courrier et complétés par des relances téléphoniques lorsque cela était nécessaire. Les taux de réponse s'élèvent à 39 % pour les élevages porcins et 34 % pour les élevages de poules pondeuses. L'échantillon obtenu présente une bonne représentativité de la population régionale, tant du point de vue de la répartition géographique que des types de systèmes, des tailles d'ateliers et des dates de conversion à l'AB.

En Bretagne, un dispositif spécifique a été mis en place, s'inspirant du modèle de l'ORAB. La démarche a combiné une enquête quantitative et une enquête qualitative. Cette dernière reposait sur un questionnaire intégrant à la fois des éléments descriptifs issus de l'ORAB et des questions spécifiques relatives aux pratiques d'utilisation des parcours. Le questionnaire a été diffusé par courrier électronique, avec des relances mail et/ou téléphoniques. Les taux de réponse s'élèvent à 32 % pour les élevages porcins et 11 % pour les élevages de poules pondeuses. En complément, une enquête qualitative a été conduite sous la forme d'entretiens semi-directifs, individuels et/ou collectifs. Au total, sept entretiens ont été réalisés auprès d'éleveurs porcins et onze entretiens auprès d'éleveurs de poules pondeuses. Ces entretiens visaient à approfondir la compréhension des pratiques, des motivations et des freins liés à l'utilisation des parcours dans les systèmes d'élevage en AB.

Les données issues des enquêtes quantitatives ont été centralisées dans deux bases de données dédiées, permettant une analyse descriptive des pratiques. Les entretiens qualitatifs ont fait l'objet d'une analyse thématique visant à compléter et à contextualiser les résultats quantitatifs.

3.2. Résultats

3.2.1. Chez les éleveurs de poules pondeuses biologiques

Dans les deux régions étudiées, les parcours des poules pondeuses reposent majoritairement sur des prairies, le plus souvent à dominante de graminées (35 % des répondants en Pays de la Loire) ou associant graminées et légumineuses (48 % des répondants en Bretagne). Dans les deux régions, une majorité des éleveurs exprime des difficultés à décrire précisément la composition floristique de leur couvert.

Concernant l'aménagement des parcours, les éleveurs se sont largement approprié ce levier. En Pays de la Loire, 93 % des éleveurs déclarent avoir réalisé des aménagements afin de favoriser l'exploration par les poules. Parmi eux, les trois quarts ont mis en place des dispositifs agroforestiers et environ deux tiers des haies. Cette dynamique se retrouve en Bretagne, où les entretiens soulignent l'importance de dispositifs guidant les poules et leur offrant des zones d'abri. Sont notamment mentionnés l'élargissement des horaires d'ouverture des trappes, l'implantation d'arbres fruitiers, de petits fruits ou d'arbustes disposés en peignes, ainsi que, plus ponctuellement, la mise en place d'un pâturage tournant dynamique.

Du côté des motivations, en Pays de la Loire, 87 % des éleveurs associent le parcours au bien-être animal. L'obligation réglementaire est évoquée dans 33 % des cas, avec une forte influence de la taille



de l'élevage : 40 % des éleveurs de plus de 8 000 poules citent l'obligation réglementaire comme motivation, contre 15 % des éleveurs de moins de 1 000 poules. En Bretagne, la motivation pour l'usage de parcours est unanimement le bien-être animal, évoqué comme relevant du « bon sens ». Lors des entretiens, les apports alimentaires du parcours sont également mentionnés, les éleveurs indiquant que « elles trouvent des herbes et des insectes ». La contribution du parcours à l'apport protéique est évoquée avec prudence : « c'est de la valeur alimentaire mais je [ne] sais pas ce que ça vaut », « l'aliment bio coûte environ 550 €/tonne, si elles vont chercher déjà 10 % dans les parcours c'est top ».

En Pays de la Loire, 72 % des éleveurs n'expriment aucune difficulté particulière liée à l'utilisation des parcours. Lorsque des contraintes sont mentionnées, elles concernent principalement la prédation (37 %), tandis que la biosécurité n'est évoquée que de manière plus marginale (7 %). En Bretagne, les éleveurs sont plus nombreux à faire état de difficultés, portant sur la gestion des parcours (37 %), leur entretien (32 %) et la prédation (21 %). Ils décrivent notamment une forte pression de pâturage, se traduisant par une consommation à ras, du piétinement, du creusage et la formation de nids de poussière.

En Pays de la Loire, 81 % des éleveurs ne prévoient pas de faire évoluer leurs pratiques liées aux parcours. Parmi ceux envisageant des changements, les projets concernent majoritairement l'agroforesterie (42 %). D'autres évolutions sont citées de manière plus ponctuelle, telles que l'agrandissement des parcours, l'installation de dispositifs d'enrichissement pour les poules, la mise en place d'ombrières photovoltaïques ou la création de parcours d'hiver. En Bretagne, seuls 14 % des éleveurs prévoient de maintenir leur système en l'état. Les projets d'évolution portent principalement sur les aménagements des parcours (41 %, notamment agroforestiers), sur la nature des couverts (32 %), et plus marginalement sur des changements de pratiques, tels que le pâturage tournant.

3.2.2. Chez les éleveurs de porcs biologiques

En Pays de la Loire, 47 % des éleveurs de porcs AB disposent de parcours pour leurs animaux, contre 36 % en Bretagne. Il s'agit majoritairement d'accès plein air intégral pour un ou plusieurs stades physiologiques (troues gestantes et/ou allaitantes, porcs à l'engraissement), ou de combinaisons entre bâtiments et parcours. La principale différence régionale concerne les troues, avec 39 % des troues gestantes en plein air intégral en Pays de la Loire contre 27 % en Bretagne.

Les parcours sont essentiellement constitués de prairies, à dominante de graminées (34 %) ou associant graminées et légumineuses (19 %) en région Pays de la Loire. La description de la composition reste souvent imprécise, 31 % des éleveurs répondant simplement « prairie ». En Bretagne, les parcours reposent sur des mélanges de graminées (ray-grass, fétuque, dactyle) et de légumineuses (trèfle), ou sur une flore spontanée. Des cultures spécifiques sont également citées (radis, topinambour, chicorée). Globalement, la composition des parcours est mieux connue que pour les poules pondeuses, avec chez certains éleveurs une volonté explicite de favoriser les espèces riches en protéines afin d'en améliorer la valeur alimentaire.

Cinquante-quatre pourcent des éleveurs ligériens pratiquent le pâturage tournant, les autres ayant recours à un pâturage continu. Les aménagements agroforestiers restent peu fréquents (17 %), même si des dispositifs d'ombrage artificiels sont régulièrement utilisés. À l'inverse, en Bretagne, l'agroforesterie est fortement associée aux parcours (60 % des élevages). La présence d'arbres, de haies, voire de zones boisées ou de sous-bois, est récurrente dans les discours : « Les porcs ont une partie de forêt », « J'ai pas mal d'arbres de tous types dans les parcs », « Les glands, c'est pire que des Haribo ». La rotation du pâturage et le renouvellement des parcs sont également cités dans environ la moitié des élevages.

Dans les Pays de la Loire, le parcours est avant tout perçu comme un moyen pour favoriser l'expression des comportements naturels des porcs (exploration, fouissage). Près de la moitié des éleveurs



associent également le plein air à une image positive de l'élevage auprès des citoyens, tandis que la contribution du pâturage à l'apport alimentaire reste secondaire (24 %). En Bretagne, la dimension de bien-être animal est unanimement citée (100 %), comme l'illustrent les verbatims : « dehors, les cochons ne sont pas en état de stress », « elles adorent la boue », « elles fouissent ». Le parcours est aussi perçu comme un levier d'image positive, en particulier en circuits courts (70 %). L'intérêt du pâturage dans les apports alimentaires est fréquemment évoqué, 60 % des éleveurs se déclarant demandeurs de références techniques.

Outre le bien-être animal, les motivations apparaissent diversifiées. Dans les Pays de la Loire, l'objectif alimentaire est cité par environ un quart des éleveurs, en lien avec la recherche d'économies et d'apports nutritionnels complémentaires (protéines, fibres). Certains évoquent également des pratiques relevant du « bon sens » ou du fait d'avoir « toujours fait comme ça ». En Bretagne, l'alimentation est également mise en avant dans les discours, à la fois pour ses apports nutritionnels (et effet favorable sur le transit intestinal), pour son intérêt économique, mais aussi dans une réflexion de cohérence globale du système d'élevage.

Dans les Pays de la Loire, 80 % des éleveurs n'expriment aucune difficulté particulière liée aux parcours. Les contraintes mentionnées concernent principalement l'entretien des parcelles et des clôtures. En Bretagne, des difficultés sont plus fréquemment exprimées : gestion des parcelles (40 %), notamment face aux comportements naturels des porcs (fouissage, piétinement, bauges), conditions pédoclimatiques (27 %) et contraintes réglementaires liées à la biosécurité (20 %).

Enfin, 20 % des éleveurs ligériens envisagent une évolution de leurs pratiques, portant principalement sur l'adaptation ou la création de parcours. En Bretagne, les évolutions envisagées concernent d'abord la création de nouveaux parcours (21 %), mais aussi des modifications de conduite ou d'équipements.

4. Les essais menés dans des fermes commerciales

4.1. Les essais de parcours enrichis pour les poules pondeuses en bâtiment fixe

4.1.1. Matériels et méthodes

À partir de 2021, deux élevages de poules pondeuses ont été suivis :

- un élevage localisé dans le Finistère, comprenant un bâtiment de 9 370 poules pondeuses, réparties en quatre lots de 2 000 à 2 700 animaux, chaque lot disposant d'un accès à un parcours arboré indépendant (un lot « essai », un lot « témoin », deux lots non étudiés) ;
- un élevage situé en Isère, composé d'un bâtiment de 6000 poules pondeuses qui donnait accès à deux parcours « essai » et d'un bâtiment de 9000 poules pondeuses qui donnait accès à trois parcours « témoin ». L'ensemble des cinq parcours étaient arborés.

Le dispositif expérimental retenu était identique dans les deux élevages. Dans chaque parcours essai, deux bandes semées, perpendiculaires au bâtiment (100 m × 6 m), ont été implantées avec un mélange à dominante protéique. Le mélange semé comprenait 12 kg de luzerne, 6 kg de ray-grass anglais, 4 kg de trèfle blanc, 6 kg de fétuque élevée, 3 kg de trèfle violet et 1 kg de chicorée. Les semis ont été réalisés au début de l'automne 2021 dans les deux élevages. Afin de favoriser l'implantation du couvert, les bandes ont été protégées des animaux par des filets jusqu'au démarrage de l'essai. Par ailleurs, les poules du lot essai recevaient le même aliment que celles du lot témoin, à savoir un aliment complet classique, afin d'éviter toute prise de risque par les éleveurs.

Dans chacun des élevages, un seul lot de poules pondeuses a fait l'objet d'un suivi, et différents relevés et mesures ont été réalisés :

- performances zootechniques : taux de ponte, indice de consommation, mortalité ;



- exploration du couvert et bien-être animal : méthode EBENE, répartition spatiale des animaux sur le parcours ;
- évaluation du couvert végétal : mesures à l'herbomètre sur les bandes semées et sur des quadrats mis en défens, notation de la couverture et de la composition florale sur quatre quadrats par bande ;
- travail de l'éleveur : temps consacré, pénibilité et ressenti.

4.1.2. Résultats

Un couvert végétal difficile à planter et à maintenir

Des difficultés sont apparues dès la phase d'implantation du couvert. En Isère, au démarrage de l'essai, six mois après le semis, l'implantation était jugée moyenne, avec une proportion importante de sol nu (25 % des bandes), une absence de levée de la luzerne et une levée limitée de la fétuque. Une arrière-saison sèche, associée à l'absence de passage du rouleau, peuvent expliquer en partie ces résultats. En Bretagne, le démarrage de l'essai a été repoussé d'un an en raison de la claustration obligatoire liée à l'Influenza aviaire. Le couvert apparaissait alors plus dense et mieux implanté, sans sol nu, mais avec une proportion élevée d'adventices (environ un tiers du couvert).

Dans l'élevage situé en Isère, le couvert a été fortement sollicité entre juin et octobre. La proportion de sol nu est ainsi passée de 24 % à 71 %. À la fin du mois d'octobre, le couvert était presque entièrement consommé : les légumineuses avaient quasiment disparu, et seules des graminées subsistaient. Initialement plus élevé en fond de bande, le taux de sol nu devient, en fin de période, plus important à l'avant du parcours (80 % contre 60 % en fond de bande), traduisant une utilisation préférentielle. Un contrôle réalisé un an après la fin du suivi confirme une dégradation durable du couvert, avec plus de 68 % de sol nu, témoignant d'une faible résistance à la consommation et au grattage des animaux.

Dans l'élevage du Finistère, l'évaluation de l'utilisation du couvert met en évidence une exploration progressive et marquée, avec une part de végétaux intacts passant de 100 % à 45 %. Le couvert a été principalement consommé à l'automne 2022, avec une augmentation progressive du sol nu, passant de 10 % en octobre à 14 % en décembre. La proportion de certaines espèces (chicorée, trèfle violet) diminue nettement au cours du suivi. En conséquence, la part relative des graminées, moins consommées par les animaux, augmente. Dans ce contexte pédoclimatique plus favorable, la croissance du couvert a permis de compenser partiellement sa consommation par les animaux, mais aussi sa dégradation liée au piétinement.

Une exploration du parcours par les poules pondeuses renforcée

En Isère, aucune différence marquée n'a été observée en début de parcours entre les lots. En revanche, les lots « essai » présentaient une exploration plus précoce et globalement plus importante de la zone milieu de parcours que les lots « témoin ». L'exploration du fond de parcours était plus élevée pour les lots « essai » que pour les lots « témoin ». Toutefois, la précocité d'exploration du fond de parcours n'a pas pu être mise en évidence, probablement parce que la fréquence d'observation était insuffisante.

Dans le Finistère, les différences observées entre lots étaient plus limitées. Aucune précocité d'exploration n'a été mise en évidence, et seule la zone milieu de parcours a fait l'objet d'une exploration plus importante dans le lot « témoin ». À noter que les poules fréquentaient à la fois les bandes de couvert enrichi et la prairie adjacente, avec une exploration supérieure sur la prairie avoisinante. La présence des bandes semées apparaît ainsi associée à une exploration accrue du parcours dans son ensemble, et non exclusivement de la zone enrichie.

Des impacts très limités sur les performances techniques

Dans l'élevage situé en Isère, l'analyse des performances techniques a été conduite sur une seule campagne annuelle et doit ainsi être interprétée comme une analyse de tendances. Elle a été conduite en distinguant trois périodes successives : du début du lot jusqu'à la sortie des animaux (28 février – 7



juin 2022), pendant accès des animaux aux parcours (8 juin – 9 novembre 2022) et la phase de reconfinement jusqu'à la fin du lot (10 novembre 2022 – 28 avril 2023). En comparaison du lot témoin, le taux de ponte du lot essai était inférieur avant le démarrage de l'essai (-1,5 %) et s'est avéré supérieur pendant et après l'accès au parcours (+1,1 % et +3,2 %, respectivement). Le taux de mortalité est resté, sur l'ensemble de la bande, légèrement inférieur pour le lot essai (-0,5 % pendant la phase d'accès au parcours). La consommation d'aliment par poule du lot essai était légèrement inférieure avant l'accès au parcours, comparable à celle du bâtiment témoin pendant la période d'accès, puis supérieure après la phase de reconfinement (-2,8 %, -0,3 % et +5,2 %, respectivement).

Pour des raisons organisationnelles liées à la gestion de l'influenza aviaire, cette analyse des performances n'a pas pu être conduite dans l'élevage breton. L'essai y ayant été mené sur un seul lot, avec une période prolongée de claustration au cours de la vie du lot, il n'a pas été possible de tirer des conclusions sur les performances techniques.

4.2. Les essais de parcours enrichis pour les poules pondeuses en bâtiments mobiles

4.2.1. Matériels et méthodes

L'expérimentation a été conduite en 2022 dans un élevage de poules pondeuses biologiques finistérien utilisant des cabanes mobiles, l'éleveur pratiquant déjà l'accès à un parcours enrichi. Le dispositif comprenait quatre cabanes mobiles, accueillant chacune 250 poules pondeuses.

Les parcours étaient constitués d'une prairie mise en place en 2018 et bien implantée au démarrage de l'essai. Les espèces présentes comprenaient notamment la luzerne, la chicorée, le trèfle blanc, le trèfle violet et la fétuque.

L'objectif de l'essai était d'évaluer la possibilité de réduire la dépendance aux ressources protéiques importées, en valorisant les ressources fourragères produites sur l'exploitation. Dans ce cadre, deux aliments spécifiques moins riches en protéines ont été formulés : un aliment destiné à la phase entrée–milieu de ponte et un aliment destiné à la phase persistance–fin de ponte. Ces aliments ont été comparés à des aliments témoins classiques.

Les caractéristiques nutritionnelles des quatre formules alimentaires, essai et témoin pour chaque phase, sont présentées dans le **Tableau 1**. Les différences entre aliments portaient principalement sur la teneur en protéines brutes et en acides aminés digestibles.

Tableau 1 : Caractéristiques nutritionnelles des formules alimentaires utilisées dans l'essai

	TEMOIN	ESSAI	TEMOIN	ESSAI
Phase	Entrée - milieu de ponte	Entrée – milieu de ponte	Persistance – fin de ponte	Persistance – fin de ponte
Caractéristiques des formules alimentaires	Classique	Déconcentrée	Classique	Déconcentrée
EM (kcal/kg)	2720	2738	2743	2749
Protéines brutes	19,25	18,35	18,36	17,28
Lysine digestible	0,80	0,69	0,73	0,65
Méthionine digestible	0,29	0,29	0,28	0,28
AAS digestibles	0,56	0,56	0,54	0,54
Tryptophane digestible	0,17	0,17	0,16	0,15
Thréonine digestible	0,58	0,55	0,55	0,52
Valine digestible	0,76	0,72	0,72	0,68



Arginine digestible	1,19	1,10	1,14	1,04
Chlore	0,19	0,20	0,19	0,20
Calcium	1,39	1,38	1,37	1,37
Sodium	0,15	0,15	0,15	0,15
Phosphore disponible	0,31	0,31	0,30	0,30
Matière grasse brute	5,30	5,68	5,44	5,63

Les périodes d'alimentation s'étendaient de l'entrée en ponte à la fin de la phase de persistance. Au démarrage de l'essai, les âges des lots essai et témoins étaient de 30 et 35, 50 et 65 semaines, respectivement. La réforme des animaux est intervenue pendant l'essai pour l'un des lots témoin. L'essai a débuté début juillet 2022. Il a toutefois été interrompu de manière anticipée à la mi-août 2022, en raison d'un épisode d'influenza aviaire, limitant la durée de suivi et les possibilités d'analyse.

Les données zootechniques recueillies durant l'essai comprenaient la mortalité, l'indice de consommation et le taux de ponte.

4.2.2. Résultats

L'essai ayant été interrompu très rapidement, il est compliqué d'en tirer des conclusions affirmées. De plus, il a été observé des passages de poules d'un bâtiment mobile à l'autre, ce qui incite à la prudence. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2**. Les données collectées ne montrent pas de décrochage du taux de ponte ou de l'indice de consommation dans les deux lots essais comparés aux lots témoins. En effet, les variations concernent également les lots témoins, sans qu'un lien puisse être fait avec l'aliment apporté. Dans ces conditions, et sur la courte durée du suivi, la distribution d'un aliment moins concentré en protéines n'a pas été associée à une dégradation des performances zootechniques mesurées.

Tableau 2 : Comparaison des performances zootechniques entre les lots essais et témoins

	LOT TEMOIN 1	LOT TEMOIN 2	LOT ESSAI 1	LOT ESSAI 2
Age début d'essai, semaines	65	50	30	35
Age fin d'essai, semaines	69*	56	36	41
Mortalité (hors disparition), %	1,0	1,2	8,3**	2,3
Indice de consommation	2,4	2,1	2,1	2,2
Taux de ponte, %	70,6	74,1	81,7	75,5

*Réforme

**Prédation élevée sur ce lot

4.3. Les essais de parcours enrichis pour les porcs

4.3.1. Matériels et méthodes

L'essai a été conduit en 2022 dans un élevage du Maine-et-Loire, où les porcs charcutiers sont habituellement engraisés en bâtiment sur paille avec accès à des courettes extérieures. Le pâturage a été expérimenté sur une des cases du bâtiment, via un accès aménagé vers une prairie.

Deux lots contemporains de 30 porcs chacun ont été suivis du 21 avril au 20 septembre 2022. Les animaux étaient âgés de 14 semaines au démarrage de l'essai. Les porcs étaient identifiés individuellement par des boucles auriculaires et par un tatouage distinct pour chaque lot.

Les deux lots ont reçu le même aliment complet de croissance (9,6 MJ d'énergie nette/kg et 160 g de protéines/kg), selon des plans d'alimentation différenciés. Le lot témoin a été conduit selon la pratique



habituelle de l'élevage, avec une alimentation à volonté plafonnée à 2,8 kg par porc et par jour. Le lot pâturage a bénéficié d'un accès au parcours, avec une restriction alimentaire appliquée à partir de 18 semaines d'âge (plafond à 2,5 kg par porc et par jour). Entre 15 et 18 semaines, l'accès au pâturage constituait un apport complémentaire sans restriction associée.

Le pâturage a été réalisé sur une surface totale de 0,5 ha, correspondant à une prairie temporaire multi-espèces composée de fétuque, chicorée fourragère, plantain, trèfle blanc et luzerne, intégrée dans la rotation culturale de l'exploitation. La parcelle était subdivisée en plusieurs paddocks afin de mettre en œuvre un pâturage tournant dynamique. Chaque paddock, d'une surface de 570 m², accueillait le groupe de 30 porcs, soit un chargement instantané de 19 m² par porc. Les animaux changeaient de paddock chaque semaine. L'objectif était de faire pâturer les porcs sur un couvert jeune et appétent, avant montaison des graminées et avant bourgeonnement des légumineuses, avec, si nécessaire, des interventions mécaniques pour maîtriser la croissance du couvert.

De nombreuses données ont été collectées au fil de l'essai :

- données agronomiques : mesures de hauteur d'herbe, composition botanique sur 3 quadrats avant et après pâturage, estimation visuelle de l'état du parcours ;
- données zootechniques : quantités d'aliment distribuées quotidiennement par lot, poids des animaux à différents moments clés, résultats d'abattage, observations comportementales ;
- données sociales : temps de travail et ressenti de l'éleveur

4.3.2. Résultats

Une forte sélection des espèces végétales consommées par les porcs et une gestion fine requise du pâturage tournant

La première entrée des porcs sur les parcours est intervenue tardivement, fin avril 2022, ce qui n'a pas permis de valoriser la pousse des espèces fourragères du début de printemps.

Le choix hebdomadaire des paddocks reposait sur l'observation de la hauteur et du stade physiologique du couvert, avec pour objectif de faire entrer les porcs sur un couvert bas, plus appétent. La hauteur moyenne du couvert à l'entrée des porcs était de 30,7 cm, avec une variabilité importante. À la sortie des animaux, la hauteur moyenne mesurée était de 16,5 cm, avec des valeurs relativement homogènes sur l'ensemble de l'essai.

La comparaison de la composition botanique des paddocks avant et après le passage des porcs met en évidence une évolution marquée du couvert. Les légumineuses disparaissent presque totalement des relevés, tandis que la proportion de chicorée et de plantain diminue fortement. À l'inverse, les graminées deviennent largement majoritaires après le pâturage. Les adventices sont peu consommées.

Les observations montrent que les porcs consomment préférentiellement le trèfle, la chicorée, le plantain et les jeunes graminées. En revanche, un stade de développement avancé des plantes (fin de montaison – début d'épiaison) lors de l'entrée des porcs dans la parcelle est associé à des refus importants et un gaspillage marqué des graminées au stade d'épiaison. La chicorée et le plantain restent bien consommés, mais leur montaison rapide complique la gestion du pâturage.

Une croissance plus lente et des carcasses moins grasses pour le lot pâturage

L'ensemble des performances zootechniques observées pour les deux lots est présenté dans le **Tableau 3**.

Comparativement au lot témoin, le lot pâturage se caractérise par une vitesse de croissance plus faible et des carcasses moins grasses. Les porcs du lot pâturage consomment en moyenne 40 kg d'aliment concentré en moins par animal, mais sont abattus plus tardivement et à un poids vif inférieur (110 kg vs 115 kg pour le lot témoin).



Le poids vif à l'abattage est plus bas pour le lot pâturage et le gain moyen quotidien technique (GMQ) est inférieur de 118 g, correspondant à une baisse de la vitesse de croissance d'environ 15 %. Cette baisse est probablement liée à une valeur nutritive insuffisante du couvert en période estivale et/ou à une augmentation des besoins énergétiques (activité, déplacements). Les carcasses des porcs du lot pâturage étaient moins grasses (TMP amélioré). Ainsi, chez les porcs charcutiers en croissance, le pâturage apparaît insuffisant pour compenser la réduction des apports d'aliment complet, les performances zootechniques demeurant inférieures à celles du lot témoin.

Tableau 3 : Comparaison des performances zootechniques entre le lot témoin et le lot pâturage

	LOT TEMOIN	LOT PATURAGE	ECART
Nombre d'animaux	28	30	
Poids d'entrée, kg	38,7 ± 6,7	38,4 ± 6,2	-0,3
Poids à 18 semaines, kg	57,0 ± 9,5	57,3 ± 8,8	+0,3
Poids vif d'abattage, kg	115,0 ± 13,5	110,0 ± 11,9	-5,0
GMQ technique, g	792	674	-118
Consommation d'aliment / porc sorti, kg	292	252	-40
TMP, %	56,8	59,2	+2,4
Âge à l'abattage, jours	202,5	207,8	+5,3

Une amélioration de la marge sur coût alimentaire pour le lot pâturage malgré des carcasses plus légères

L'ensemble des résultats économiques est présenté dans le **Tableau 4**. Les porcs du lot pâturage présentent des carcasses plus légères, avec un poids de carcasse froid inférieur de 4 kg en moyenne. En revanche, ces carcasses sont moins grasses, avec un taux de muscle des pièces (TMP) plus élevé, se traduisant par une meilleure valorisation du prix du kilogramme de carcasse.

Le coût alimentaire par porc sorti est inférieur dans le lot pâturage : -19,5 €, principalement lié à une réduction de la consommation d'aliment concentré. Le produit par porc sorti est plus élevé dans le lot pâturage, en lien avec un prix du kilogramme de carcasse supérieur. La marge sur coût alimentaire par porc sorti est améliorée de 27 € dans le lot pâturage par rapport au lot témoin.

Tableau 4 : Comparaison des résultats économiques entre les deux lots

	LOT TEMOIN	LOT PATURAGE	GAIN
Coût alimentaire / porc sorti, €	160,6	141,1	+ 19,5
dont aliment concentré, €	160,6	138,6	
dont frais liés au pâturage (y compris temps de travail), €	0	2,5	
Produit / porc sorti, €	307,9	315,4	+ 7,5
Poids de carcasse froid, kg	88,7	84,7	
Prix du kg carcasse, €	3,47	3,72	
Marge sur coût alimentaire par porc sorti, €	147,3	174,3	+ 27

Des porcs plus calmes et plus propres dans le lot pâturage

Les résultats des notations attribuées aux porcs selon leur comportement et leur état sanitaire sont synthétisés dans le **Tableau 5**. Les porcs charcutiers du lot pâturage apparaissent plus calmes que ceux du lot témoin, y compris dans un contexte de restriction alimentaire plus marquée. Malgré une compétition à l'auge observée, les comportements agressifs restent limités dans le lot pâturage. Les



animaux dominés semblent accéder plus facilement à la ressource alimentaire, et l'homogénéité des poids reste comparable entre les deux lots. Par ailleurs, les porcs du lot pâturage sont moins sales et moins nombreux à présenter des signes de diarrhée que ceux du lot témoin.

Tableau 5 : Répartition des notations comportementales et sanitaires des porcs selon les lots

	LOT TEMOIN	LOT PATURAGE
Porcs nerveux lors des pesées individuelles	59 %	6 %
Porcs de taille inférieure à la moyenne du lot	6 %	6 %
Porcs très sales (≥ 50 % de la surface du corps)	17 %	0 %
Porcs présentant des signes de diarrhée	22 %	8 %

Une organisation du pâturage contrainte par le planning de travail, mais fonctionnelle

Au cours de l'essai, le changement de paddock a été réalisé selon une fréquence hebdomadaire fixe, le vendredi, pour des raisons d'organisation du travail. Ce choix ne reposait pas systématiquement sur l'état du couvert végétal ou sur les conditions de portance des sols. La durée d'exploitation d'un paddock d'une semaine s'est révélée parfois inadaptée : dans certains cas, elle était trop longue, avec des signes de piétinement marqués, notamment en lien avec la pluviométrie ; dans d'autres situations, elle apparaissait trop courte, avec un couvert encore abondant au moment du changement de paddock. Malgré ces limites, l'organisation retenue a été jugée globalement satisfaisante par l'éleveur et présentait l'avantage d'une gestion simplifiée, fondée sur une routine hebdomadaire intégrée au planning de travail.

5. Discussion

5.1. Les parcours vus par les éleveurs : entre obligation réglementaire, bien-être animal et levier pour renforcer la cohérence des systèmes

Les enquêtes menées auprès des éleveurs de porcs et de poules pondeuses en AB mettent en évidence la place centrale occupée par les parcours dans la représentation des systèmes, au-delà de leur seule dimension réglementaire. Qu'ils soient obligatoires, comme en volaille, ou facultatifs, comme en production porcine, les parcours sont très majoritairement associés au bien-être animal, dont un des éléments est la possibilité d'exprimer des comportements naturels (exploration, fouissage, grattage).

Les parcours transmettent également une image positive de l'élevage biologique auprès de la société, notamment pour les systèmes en circuits courts. Cette dimension contribue à faire du parcours un élément structurant de la cohérence des systèmes en AB pour les éleveurs, en lien avec les attentes sociétales et les principes fondateurs de l'AB.

Toutefois, les différences observées entre les deux régions doivent être interprétées avec prudence. Les dispositifs d'enquête mis en œuvre n'étaient pas identiques en Pays de la Loire et en Bretagne, notamment du point de vue des modalités de collecte et de la place accordée aux entretiens qualitatifs. Ces différences de méthode ont pu induire des biais de recrutement et de discours, susceptibles d'expliquer en partie certaines divergences observées.

Les essais conduits dans le cadre de VALORAGE apportent des éléments convergents avec les enquêtes, en montrant que l'accès aux parcours s'accompagne de modifications comportementales chez les animaux, tant chez les porcs que chez les volailles. Une meilleure exploration et une diminution de certains comportements indésirables ont ainsi été observées, y compris dans des contextes alimentaires contraints, confortant le rôle des parcours comme levier de bien-être animal, et



qu'il conviendrait cependant de quantifier de façon plus précise et dans le cadre d'un dispositif expérimental plus robuste intégrant des répétitions expérimentales et des analyses statistiques.

5.2. La contribution alimentaire des parcours : un potentiel réel mais pas automatique

Les enquêtes menées auprès des éleveurs mettent en évidence une attente forte vis-à-vis de la contribution des parcours à l'alimentation des animaux, dans les deux productions étudiées. Toutefois, les discours recueillis traduisent également une incertitude marquée quant à la valeur nutritionnelle réelle des ressources pâturées, 39 % des éleveurs de poules et 57 % des éleveurs de porcs exprimant un besoin de références pour étayer leurs choix et optimiser leurs pratiques à des fins de réduction des coûts de production.

Les essais conduits dans le cadre de VALORAGE confirment que les parcours peuvent contribuer, au moins partiellement, à l'alimentation des monogastriques, mais soulignent également les limites de ces apports. Chez les porcs charcutiers en phase de croissance, l'essai de pâturage tournant dynamique montre que l'accès à une prairie multi-espèces ne permet pas de compenser une restriction d'apport en aliment concentré de 15 %. Il existe à ce jour très peu de références sur le sujet pour confronter les résultats. Néanmoins, Maupertuis *et al.* (2018) ont démontré, via l'analyse du gain d'épaisseur de lard dorsal (ELD), qu'une restriction de 20 % effectuée sur des truies gestantes était compensée par le pâturage de légumineuses. En effet, les niveaux moyens des réserves corporelles constituées étaient comparables entre les deux lots de truies gestantes (gain d'ELD lot témoin : + 6,5 mm ; gain d'ELD lot essai : + 6,6 mm). Les écarts observés entre ces résultats peuvent s'expliquer en partie par une capacité de valorisation des fibres plus faible chez les porcs en croissance que chez les truies gestantes (Goff *et al.*, 2002 ; Li *et al.*, 2021). Par ailleurs, Ferchaud *et al.* (2019) ont obtenus des résultats similaires dans une étude portant sur l'effet de la distribution de luzerne enrubannée chez des porcs en croissance en AB soumis à des restrictions de 10, 15 et 22 % de l'apport en aliment concentré. Les restrictions de 15 % et 22 % ont entraîné un ralentissement significatif de la croissance, avec des diminutions respectives de 162 g/j et 215 g/j par rapport au lot témoin ($p < 0,01$). Ainsi, vraisemblablement, chez les porcs en croissance, une restriction plus modérée de l'apport en aliment concentré - de l'ordre de 10 % - serait nécessaire pour permettre une compensation complète des performances par le fourrage. Cette hypothèse est cohérente avec les résultats de Ferchaud *et al.* (2019), qui montrent des performances de croissance équivalentes à celles du témoin pour des animaux soumis à une restriction de 10 %.

En poules pondeuses, avant de discuter les résultats au regard de la littérature, il convient de rappeler, que, les contraintes sanitaires ayant limité la durée et la quantité de données collectées dans certains essais, ainsi que la forte dépendance des résultats aux conditions pédoclimatiques et le faible nombre de répétitions expérimentales, imposent une interprétation prudente. Les résultats doivent être interprétés comme des tendances, nécessitant d'être confirmées par des essais complémentaires plus robustes et mieux répliqués.

Les résultats du premier essai conduit en bâtiment fixe suggèrent que l'accès à un parcours enrichi en protéines sans restriction nutritionnelle par ailleurs induit une amélioration du taux de ponte, une réduction légère de la mortalité et une consommation d'aliment équivalente au lot témoin. Dans la littérature, d'autres auteurs, tels que Zhao *et al.* (2024) constatent un taux de ponte supérieur chez les poules ayant accès à un parcours (73, 77, 75, 76 % pour les lots témoin et les lots ayant accès à un parcours de *Orychophragmus violaceus*, chicorée, *Orychophragmus violaceus* et chicorée, respectivement) néanmoins ces tendances ne sont pas significatives ($p = 0,11$). Ces résultats sont partagés par Kop-Bozbay *et al.* (2021) qui notent également que l'accès à des parcours (chicorée, trèfle blanc ou mélange d'espèces) n'affecte ni le taux de ponte, ni l'indice de consommation. Par ailleurs, Zhao *et al.* (2024) notent que l'apport de fourrage améliore significativement la masse hebdomadaire d'œufs produite ($p < 0,05$), suggérant un effet positif sur la production globale. Contrairement aux



tendances observées dans les résultats de l'essai, aucune influence de l'accès au parcours sur le taux de mortalité n'est mise en évidence par Zhao *et al.* (2024)

Les résultats issus du second essai conduit chez des poules pondeuses en bâtiment mobile suggèrent que, sur des durées d'observation limitées et en présence de couverts riches et bien implantés, la distribution d'aliments légèrement appauvris en protéines n'entraîne pas de décrochage des performances zootechniques. Les résultats de cet essai s'inscrivent dans un corpus de résultats contrastés mais globalement cohérents avec l'hypothèse d'une compensation partielle par le fourrage. En effet, Horsted *et al.* (2006) rapportent des effets variables selon les conditions expérimentales. Un taux de ponte significativement plus faible est observé dans un premier essai chez des poules pondeuses soumises à une restriction nutritionnelle (75 % vs 91 %, $p < 0,05$), indépendamment du type de fourrage à disposition (graminées/trèfle ou mélange d'espèces herbacées). Puis, dans un second essai conduit avec un parcours de chicorée, aucune différence du taux de ponte n'est mise en évidence entre les poules restreintes et les poules nourries avec l'aliment commercial (83 % vs 82 %, $p > 0,05$). Les auteurs concluent que le fourrage peut contribuer de manière substantielle aux apports en énergie métabolisable et en acides aminés, sans toutefois permettre, à court terme, une compensation complète d'un déficit nutritionnel, notamment protéique.

Dans les deux productions, les résultats convergent : les parcours ne peuvent être envisagés comme une substitution directe et systématique à l'aliment concentré. Leurs apports alimentaires dépendent de multiples facteurs : composition botanique du couvert, stade physiologique, conditions climatiques, modalités de pâturage, niveau de restriction des apports d'aliment concentré, etc. Les parcours constituent avant tout un levier d'optimisation des systèmes, mobilisable dans une logique de complémentarité avec le concentré et les fourrages conservés, plutôt qu'une solution autonome.

Ainsi, si les parcours présentent un potentiel intéressant pour contribuer à l'autonomie alimentaire des monogastriques en AB, leur mobilisation effective nécessite un pilotage technique fin. En aviculture particulièrement, des essais complémentaires, conduits sur des durées plus longues et dans des contextes variés, sont indispensables pour mieux caractériser les conditions dans lesquelles les parcours contribuent de manière significative et sécurisée à l'alimentation des poules pondeuses.

5.3. La gestion des parcours : une nouvelle compétence technique pour les éleveurs

Les enquêtes et les essais conduits dans VALORAGE convergent sur un point : la gestion des parcours constitue un facteur déterminant de leur efficacité, tant du point de vue de leur contribution à l'alimentation des animaux que de leur durabilité et de leur appropriation par les éleveurs. Si les parcours sont largement perçus comme bénéfiques, leur mise en œuvre opérationnelle soulève de nombreuses contraintes techniques, régulièrement citées par les éleveurs comme des freins au développement de ces pratiques.

La pression exercée par les animaux sur les couverts est un enjeu central, en particulier en aviculture biologique et en production porcine plein air. Des difficultés récurrentes liées à la dégradation des parcours, à la consommation rapide des végétaux, au piétinement, au fouissage ou à la formation de zones nues remontent dans les enquêtes, constats confirmés par les essais menés.

Les essais conduits chez le porc en croissance soulignent notamment l'importance d'un pilotage fin du pâturage tournant, comme en production herbivore. Un décalage entre la dynamique de croissance du couvert et la pression exercée par les animaux peut rapidement conduire à des refus, à du gaspillage ou, au contraire, à une dégradation excessive des parcelles. De même, en volaille, les travaux menés montrent que l'implantation de couverts enrichis et la présence d'aménagements améliorent l'utilisation des parcours, sans résoudre la problématique de la dégradation du couvert par grattage.

Au-delà des aspects techniques, la gestion des parcours interroge également l'organisation du travail. Les essais mettent en évidence la nécessité de compromis entre un pilotage optimal du couvert et la



faisabilité au quotidien pour les éleveurs. Des modalités de gestion simplifiées, telles que des rotations hebdomadaires, sont plus facilement intégrables dans le fonctionnement des exploitations, même si elles ne permettent pas toujours une valorisation maximale de la ressource.

À partir des enseignements tirés des essais, des recommandations techniques (disponibles sur [la page web du projet](#)) ont été formulées afin de faciliter la mise en place et le pilotage des parcours chez les exploitants. Elles portent notamment sur le choix des espèces et des mélanges, les modalités d'implantation, les critères d'entrée et de sortie des animaux.

6. Conclusion

Dans un contexte de renforcement réglementaire en agriculture biologique, de dépendance accrue aux importations de protéines et d'attentes sociétales fortes vis-à-vis des conditions d'élevage, les parcours apparaissent comme un levier d'adaptation des systèmes monogastriques biologiques. À partir d'un croisement entre enquêtes de terrain et essais conduits en conditions réelles d'élevage, cet article visait à analyser les atouts et les limites des parcours dans l'alimentation et la conduite de ces élevages.

Les résultats montrent que les parcours sont considérés par les éleveurs comme un support majeur de bien-être animal, voire comme une marque de cohérence des systèmes biologiques. Leur contribution à l'alimentation des animaux est perçue comme un enjeu, mais demeure entourée d'incertitudes. Les essais suggèrent que les parcours peuvent contribuer à réduire la consommation d'aliments concentrés, sans dégradation systématique des performances (en fonction des apports en aliment concentré), et à condition que leur gestion soit finement pilotée. Cette contribution reste toutefois fortement dépendante de la qualité et de la durabilité des couverts, des conditions pédoclimatiques et des modalités de conduite. Des travaux complémentaires, surtout dans les filières avicoles, seraient nécessaires pour mieux orienter les éleveurs.

Toutefois, les parcours ne constituent pas une solution générique ou universelle, mais un levier d'optimisation, mobilisable dans une logique de complémentarité avec l'alimentation concentrée. Leur réussite repose avant tout sur la maîtrise de leur pilotage agronomique et zootechnique, ainsi que sur l'adéquation des pratiques aux contraintes des exploitations. Il convient toutefois de souligner que la crise économique récente des filières biologiques a pu faire évoluer les priorités des éleveurs depuis les enquêtes, en renforçant notamment les arbitrages économiques à court terme au détriment de pratiques perçues comme plus complexes à sécuriser.

Pour finir, ces résultats s'inscrivent dans le cadre spécifique du cahier des charges et du marché de l'agriculture biologique, minoritaire à l'échelle nationale. Néanmoins, les dynamiques observées autour des parcours - en termes de bien-être animal, d'acceptabilité sociale et de cohérence des systèmes - font écho à des questionnements plus larges qui traversent aujourd'hui l'ensemble des filières d'élevage.

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 étayaient 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.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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

L'autrice remercie l'ensemble des partenaires du projet, ainsi que les éleveurs ayant répondu aux enquêtes ou ayant accueilli des essais sur leur exploitation.

Déclaration de soutien financier

Les enquêtes et essais présentés ont été réalisés avec le soutien financier du CASDAR.

Références bibliographiques

- Barbieri P., Dumont B., Benoit M., Nesme T., 2022. Opinion paper: Livestock is at the heart of interacting levers to reduce feed-food competition in agroecological food systems. *Animal*, Volume 16, Issue 2, 100436, ISSN 1751-7311.
- Bébin K., Gardan-Salmon D., Jacquot C., Urdaci M., Arturo-Schaan M., Panhéleux M., 2013. Effet de différentes sources de fibres sur les performances zootechniques, le poids de gésier et la flore digestive de poulets en croissance. *10èmes Journées de la Recherche Avicole*, La Rochelle, pp. 763-766.
- Bignon L., Mika A., Dupin M., Dusart L., Travel A., Narcy A., Bournazel M., Bourin M., Mercierand F., Naciri M., Magnin M., Garet J., Bouvarel I., 2015. Améliorer le bien-être du poulet de chair grâce à l'apport de fibres alimentaires et l'utilisation d'une litière à base de menue paille. *11èmes Journées de la Recherche Avicole*, Tours, pp. 887-892.
- Bikker P., & Jansman A., 2023. Review: Composition and utilisation of feed by monogastric animals in the context of circular food production systems.. *Animal: an international journal of animal bioscience*, 100892
- Brachet M., 2017. Exemple d'enrichissement en protéines des parcours de volailles. Communication *Journées Volailles de Qualité ITAVI*, Paris.
- Cereopa, 2017. *La protéine dans tous ses états, rapport sur l'indépendance en protéines de l'élevage français*, 23 mai 2017.
- Coop de France, 2014. Passage à une alimentation animale 100 % bio : analyse d'impact et conséquences pour les filières biologiques. Commission réglementation – INAO, 1er avril 2014.
- Chiron G., Pertusa M., Lesgourgues M., Méda B., Fortun-Lamothe L., 2022. BOUQUET - Une méthode pour évaluer les services rendus par les ateliers de volailles plein-air. *Innovations Agronomiques*, 85, pp.31-46.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (FAOSTAT). FAO 2023.
- Ferchaud S., Alibert L., Gaudre D., Montagne L., Renaudeau D., Roinsard A., 2019. Impact de la distribution de luzerne enrubannée sur les performances des porcs en croissance. *Journées Recherche Porcine*. 51, 115-116. <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2019/alimentation/a15.pdf>
- FranceAgriMer, 2017. Collecte française de soja biologique. Données statistiques.
- Garcia K., Halmos V., Thongjued K., Dupuis J.R. and Gonthier D.J., 2023. Net effects of pasture-raised poultry on arthropod communities driven by top-down and bottom-up forces in a mixed-cover crop system. *Front. Sustain. Food Syst.* 7:1162753.



- Gatto A., Kuiper M., Van Middelaar C., & Van Meijl H., 2024. Unveiling the economic and environmental impact of policies to promote animal feed for a circular food system. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Germain K., 2014. Poulets de chair : matières premières innovantes et parcours. *Alter Agri*, 127, 15-19.
- Goff G.L., Milgen J., Noblet J., 2002. Influence of dietary fibre on digestive utilization and rate of passage in growing pigs, finishing pigs and adult sows. *Animal Science*. 74(3):503-515. doi:10.1017/S1357729800052668
- Govoni, C., D'Odorico, P., Pinotti, L., & Rulli, M., 2023. Preserving global land and water resources through the replacement of livestock feed crops with agricultural by-products. *Nature Food*, 4, 1047 - 1057.
- Gustafson G.M., Stern S., 2003. Two strategies for meeting energy demands of growing pigs at pasture. *Livestock Production Science*, 80, 167-174.
- Horsted K., Hammershøj M., Hermansen J.E., 2006. Short-term effect on productivity and egg quality in nutrient-restricted versus non-restricted organic layers with access to different forage crops. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A*, 56, 42-54.
- Horsted K., Hermansen J.E., Hansen H., 2007. Botanical composition of herbage intake of free-range laying hens determined by microhistological analysis of faeces. *Archiv für Geflügelkunde*, 71(4), 145-151.
- Juin H., Bordeaux C., Feuillet D., Roinsard A., 2015. Valeur nutritionnelle de sources de protéines pour l'alimentation des volailles en production biologique. *11èmes Journées de la Recherche Avicole*, Tours, pp. 529-533.
- Jurjanz J., Jondreville C., Delagarde R., Travel A., Germain K., Roinsard A., Feidt C., Rychen G., 2013. Evaluation of soil intake in free-ranged domestic animals. *64th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science*, Nantes, France.
- Jurjanz S., Germain K., Juin H., Jondreville C., 2015. Plant and soil intake by organic broilers reared in tree- or grass-covered plots as determined by means of n-alkanes and of acid-insoluble ash. *Animal*, 9(5), 888-898.
- Kongsted A.G., 2014. Foraging growing-finishing pigs. Experiences and strategies for practice. *Report from ICOPP Project*, 16 p.
- Kop-Bozbay C., Akdag A., Bozkurt-Kiraz A., Gore M., Kurt O., Ocak N., 2021. Laying Performance, Egg Quality Characteristics, and Egg Yolk Fatty Acids Profile in Layer Hens Housed with Free Access to Chicory-and/or White Clover-Vegetated or Non-Vegetated Areas. *Animals* 2021, 11, 1708. <https://doi.org/10.3390/ani11061708>
- Laisse S., Baumont R., Dusart L., Gaudré D., Rouillé B., Benoit M., Veyssset P., Rémond D., Peyraud J.-L., 2018. L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. *INRA Productions Animales*, 31(3), 269-288.
- Li H., Yin J., Tan B., Chen J., Zhang H., Li Z., Ma X., 2021. Physiological function and application of dietary fiber in pig nutrition: A review, *Animal Nutrition*, Volume 7, Issue 2, Pages 259-267, ISSN 2405-6545, <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.11.011>.
- Maupertuis F., 2018. Économiser des protéines dans l'aliment des truies gestantes élevées en plein air grâce au pâturage des légumineuses. *Casdar Sécalibio* (2015-2019).
- Mottet A., de Haan C., Falcucci A., Tempio G., Opio C., Gerber P., 2017. Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, 14, 1-8.
- Mowat D., Watson C.A., Mayes R., Kelly H., Browning H., Edwards S.A., 2001. Herbage intake of growing pigs in an outdoor organic production system. *Proceedings of the British Society of Animal Science*, p. 169.
- Nielsen B.L., Thodberg K., Malmkvist J., Steinfeldt S., 2011. Proportion of insoluble fibre in the diet affects behaviour and hunger in broiler breeders growing at similar rates. *Animal*, 5, 1-12.
- Peron L., 2019. Parcours à haute valeur protéique, synthèse des essais conduits sur volailles de chair à l'INRA du Magneraud et au lycée des Sicaudières. *Casdar Sécalibio* (2015-2019).
- Riverra-Ferre M.G., Edwards S.A., Mayes R.W., Riddoch I., Hovell F.D.B., 2001. The effect of season and level of concentrate on the voluntary intake and digestibility of herbage by outdoor sows. *Animal Science*, 72, 501-510.



Sehested J., Sørensen K., Danielsen V., Roepstorff A., Monrad J., 2004. Grazing with heifers and sows alone or mixed: herbage quality, sward structure and animal weight gain. *Livestock Production Science*, 88(3), 223-238.

Sommer S.G., Sundrum A., 2014. Productivity of organic livestock systems.

Weltin J., Carrasco A., Luz S., Berger U., Bellof G., 2014. Luzerne-silage after suitable preparation in organic poultry and pig feeding. *BÖLN*, 189 p.

Zhao W. Y., Zhang Q. Q., Zhao Y. F., Chang C., Wang X., Geng A. L., 2024. *Orychophragmus violaceus* and/or chicory forage affects performance, egg quality, sensory evaluation and antioxidative properties in native laying hens, *Animal Biotechnology*, 35:1, 2286610, DOI: 10.1080/10495398.2023.2286610

Pour citer cet article : Mélanie GOUJON, 2026 - Les parcours en élevage de monogastriques en agriculture biologique : un levier pour l'autonomie alimentaire ? *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art03>



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.



Caractérisation des pratiques culturales en grandes cultures – comparaison entre l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle

Alice HOLVOET¹, Loïc VIGUIER², Enguerrand BUREL¹, Amélie CARRIERE²,
Natacha SAUTEREAU¹

¹ ITAB - Institut Technique de l'agriculture et l'Alimentation Biologiques, 149 Rue de Bercy 75012 Paris, France

² Arvalis, 3 rue Joseph et Marie Hackin, 75116 Paris, France

Alice Holvoet et Loïc Viguié sont considérés comme premiers auteurs.

Correspondance : alice.holvoet@itab.asso.fr / l.viguié@arvalis.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art04>

Résumé

Les itinéraires techniques de culture entre les modes de production bio et conventionnel ont fait l'objet de nombreuses études, mais souvent à partir d'un nombre de cas limité. Nous avons conduit une analyse statistique des résultats de l'enquête « Pratiques Culturales » grandes cultures (SSP, 2021) qui a recueilli, à partir d'un échantillonnage de parcelles représentatives en bio (AB) et conventionnel (AC), les données des itinéraires de culture avec en particulier les pratiques d'interculture, la préparation du sol, le désherbage mécanique, la fertilisation, et la protection des cultures. Notre analyse permet d'observer que les pratiques culturales dépendent des modes de production et des contextes pédoclimatiques : si certaines pratiques sont plus répandues en AB (présence de prairies dans les rotations, désherbage mécanique) ou en AC (apports d'intrants azotés et phytosanitaires), d'autres sont dépendantes davantage de la région que du mode de production (couverture du sol à l'interculture, travail du sol profond sans retournement), voire d'une interaction entre les deux (la part de parcelles labourées AB/AC est similaire dans le sud mais différente dans le nord).

Mots-clés : Grandes cultures, Agriculture Biologique, Itinéraire Technique

Abstract: Characterization of farming practices in field crops – comparison between organic and conventional farming

The crop management in organic and conventional farming have been studied in numerous studies but often based on a limited number of cases. We conducted a statistical analysis of the results of the "Cultural Practices" survey for field crops (SSP, 2021), which collected data from a sample of representative organic and non-organic fields, enabling us to produce data on intercropping practices, soil preparation, mechanical weeding, fertilization, and crop protection. Our analysis shows that farming practices depend on production methods and soil and climate conditions : while some practices are more common in organic farming (presence of grassland in crop rotations, mechanical weeding) or conventional farming (use of nitrogen and pesticide inputs), others depend more on the region than on the production method (soil cover between crops, deep tillage without ploughing), or even on an interaction between both (similar proportion of plowed organic/conventional plots in the south but different in the north).

Keywords: Field crops, Organic farming, Crop management



1. Introduction - contexte

1.1. Objectifs et enjeux

L'objectif est de caractériser les différences de pratiques en grandes cultures entre l'agriculture biologique (AB) et l'agriculture dite conventionnelle (AC) en France avec les données de l'enquête Pratiques Culturelles Grandes Cultures (PKGC) de 2021 du Service de la Statistique et de la Prospective (SSP). Cette enquête, du fait de sa construction, permet de disposer de données représentatives à l'échelle régionale des pratiques en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique, au niveau des parcelles cultivées.

La caractérisation des itinéraires techniques culturels (ITK) AB et AC a été faite sur l'occupation du sol avant la culture, la préparation du sol, le désherbage mécanique, la fertilisation, et la protection des cultures. L'article a pour objectif de i) produire de la connaissance générique sur les pratiques mobilisées en systèmes de grandes cultures bio et conventionnels et ii) de quantifier les écarts entre les pratiques bio/non bio, de façon à définir en quoi la conduite bio se distingue de celle du conventionnel, en tenant compte des contextes pédoclimatiques.

Les données ainsi produites pourront être valorisées pour alimenter d'autres travaux d'analyse comparée des pratiques en bio et en conventionnel, mais pourront également être mobilisées dans des prospectives, des études sur l'impact de changements réglementaires, et de quantification des externalités.

1.2. Etat de l'art

Peu d'études permettent d'objectiver à grande échelle les différences de pratiques entre AB et AC. La méta-analyse de Barbieri *et al.* (2017) en particulier a permis de caractériser les rotations bio/non bio à travers le monde à partir de deux bases de données (état de l'art et occupation des terres de FAOSTAT et du FIBL). L'étude montre en particulier une plus grande diversité des espèces cultivées en AB grâce à l'implantation plus fréquente de fourrages (prairies temporaires et cultures fourragères) et de cultures intermédiaires multi-services (CIMS).

En France, les enquêtes "Pratiques culturelles" du SSP sont rarement analysées dans l'objectif de comparer les pratiques entre AB et AC. Parmi les 67 projets utilisant la source "enquête PKGC" répertoriés sur le site du Centre d'Accès aux données sécurisées (CASD), seuls deux mentionnent explicitement l'AB. Le premier a comparé les rendements AB et AC et leurs déterminants dans les enquêtes PKGC 2006, et a donné lieu à la publication d'un rapport INRA en 2013 (Guyomard *et al.*, 2013), dans lequel les variables qui semblent différencier *a priori* le plus les parcelles en AB des parcelles en AC comparables sont celles portant sur la fertilisation et sur l'utilisation d'herbicides et de fongicides. Le second étudie l'impact des mesures agroenvironnementales sur la conventionnalisation de l'agriculture biologique. En outre, Carrière *et al.* (2022) ont étudié les enquêtes PKGC 2017 sous l'angle de la comparaison AB/AC, et ont en particulier montré que le labour est plus pratiqué en AB, et notamment avant les cultures d'été, que les couverts d'interculture sont moins mis en œuvre en AB qu'en AC (ce qui ne converge pas avec la méta-analyse de Barbieri *et al.* 2017, sur un périmètre d'étude différent), que les densités de semis des céréales à paille et des protéagineux sont respectivement plus élevées et plus faibles en AB. Par ailleurs, les résultats analysés par le SSP et disponibles sur Agreste en ce qui concerne les itinéraires techniques ne proposent pas d'analyse des différences de pratiques AB/AC.



2. Méthodologie

2.1. Présentation des enquêtes PKCG 2021

L'enquête sur les pratiques culturales des agriculteurs en grandes cultures est réalisée par le service statistique du ministère de l'Agriculture dans le cadre du plan Ecophyto. Cette enquête contient une grande variété d'informations sur les pratiques culturales mises en place par les agriculteurs, i.e., précédents culturaux, gestion de l'interculture, travail du sol, fertilisation, traitements phytosanitaires, irrigation. Cette étude analyse les données de la campagne agricole 2021, qui débute après la récolte de 2020 et s'achève avec celle de 2021. La méthodologie des enquêtes PKCG est détaillée dans Agreste, Chiffres & Données, Septembre 2024 NO 13. Ces enquêtes sont conçues pour couvrir l'entièreté des surfaces concernées par les cultures enquêtées et sont donc exhaustives et représentatives.

2.2. Mise en contexte des analyses : bilan de campagne culturale 2020-2021

Dans l'ensemble, les conditions climatiques de la campagne 2020-2021 ont été proches de la moyenne de référence 1981-2010. Les températures ont été supérieures de 0.4°C à la moyenne 1981-2010, avec un automne et un hiver doux et un printemps et un été relativement frais. Les précipitations ont été légèrement supérieures à la moyenne 1981-2010, avec un début d'hiver et une fin de printemps particulièrement pluvieux. Ces conditions de température et de pluviométrie ont été globalement observées sur l'ensemble des régions de France métropolitaine, à l'exception des côtes méditerranéennes et des Pyrénées orientales pour lesquelles le déficit pluviométrique, déjà constaté les années précédentes, s'est accentué. L'ensoleillement a été proche de la normale 1991-2010, voire excédentaire dans le quart nord-ouest (Agreste 2021). Le début de campagne culturale 2020-2021 a été globalement favorable aux céréales d'hiver avec un automne doux et humide, favorisant les semis et le développement de la biomasse. Les semis de céréales de printemps se sont bien déroulés et les pluies d'avril-mai ont été propices au développement des cultures. À l'exception de certaines situations locales, les conditions climatiques de la campagne 2020-2021 n'ont pas nécessité d'adaptations significatives des itinéraires techniques pour les cultures retenues dans cette étude.

2.3. Méthodologie de traitement des données

2.3.1 Utilisation de l'approche parcelle

Cette étude analyse les effectifs, i.e., le nombre de parcelles enquêtées, concernées par une variable d'intérêt donnée et non les surfaces des parcelles concernées (effectif x coefficient d'extrapolation des surfaces) par cette variable. En effet, nous faisons l'hypothèse que les pratiques appliquées sur une parcelle sont indépendantes de la surface de la parcelle, évitant ainsi d'introduire dans la comparaison AB/AC un potentiel biais via l'utilisation du coefficient d'extrapolation des surfaces. Les résultats présentés dans cette étude correspondent, hors mention contraire, au pourcentage de parcelles concernées par la variable d'intérêt donnée, selon la région, le groupe de culture et le mode de conduite, contrairement aux présentations habituelles des données PKGC, qui utilisent le coefficient d'extrapolation pour présenter un pourcentage de surfaces concernées par une pratique.

2.3.2 Constitution des groupes d'analyse

Le traitement des données brutes a été effectué dans le respect des règles du secret statistique du SSP. Ainsi, une modalité d'une variable donnée est considérée comme manquante si elle concerne moins de 3 parcelles, et si le coefficient d'extrapolation d'une parcelle représente plus de 85 % de la somme de la surface totale de la modalité. Pour les données quantitatives (IFT, azote apporté, rendement), les moyennes ne sont présentées que si le nombre d'observations est supérieur à 30. Pour s'assurer d'un nombre suffisant d'observations par modalité, des regroupements ont été effectués



(Tableau 1). Les groupes ont été constitués en regroupant les cultures par familles botaniques et, lorsque possible, par période de semis selon le référentiel PAC (hiver et printemps). Cette classification a permis d'obtenir un nombre suffisant d'observations par groupe tout en conservant une cohérence agronomique pour les comparaisons d'itinéraires techniques. Le blé tendre est traité séparément des autres céréales, car c'est la culture majeure en AB et AC. A noter que certaines cultures importantes en termes de volumes en conventionnel comme la betterave sucrière, le colza et la pomme de terre n'ont pas été retenues dans cet article car les effectifs étaient trop faibles en AB pour être comparés à l'AC. Les parcelles en AB n'incluent pas les parcelles en cours de conversion en 2021 (comptées en AC).

De plus, afin de prendre en compte la variabilité géographique des itinéraires techniques, un découpage de la France en 4 macro-régions, ci-après appelées « zones » a été utilisé pour les analyses : Sud-Ouest (SO - Occitanie, Nouvelle Aquitaine), Sud-Est (SE - PACA, Auvergne-Rhône-Alpes), Nord-Ouest (NO - Bretagne, Centre-Val de Loire, Pays de la Loire, Normandie, et Nord-Est (NE - Hauts-de-France, Ile-de-France, Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est).

Tableau 1 : Types de cultures étudiés et leurs espèces pour la comparaison des modes de production AB et AC. Les effectifs sont donnés par groupe et par macro-région, en nombre de parcelles.

Groupe	Céréales de printemps	Céréales d'hiver	Blé tendre	Oléagineux	Protéagineux
Espèce	Avoine printemps, Maïs (fourrage, grain), Orge printemps, Sorgho	Avoine hiver, Blé dur, Mélange céréales protéagineux, Orge hiver, Triticale	Blé tendre	Lin oléagineux, Tournesol	Féverole, Pois protéagineux, Soja
NE - AB	262	197	84	46	145
NO - AB	324	297	65	46	46
SE - AB	60	206	28	16	18
SO - AB	180	459	95	197	236
NE - AC	3079	1658	796	411	1308
NO - AC	2096	2035	726	383	665
SE - AC	657	925	272	224	163
SO - AC	1499	1956	390	676	888

2.3.3 Analyses statistiques

Variables étudiées : Les variables étudiées recouvrent les grandes étapes des itinéraires techniques en grandes cultures, à savoir, la couverture du sol en interculture, la préparation du sol (labour, travail du sol superficiel, moyennement profond et profond), le désherbage mécanique et les intrants (protection des cultures et fertilisation). A noter que l'irrigation n'a pas été prise en compte ; celle-ci concernant un faible pourcentage de la SAU française et n'étant pas une strate de l'échantillonnage en soi, les biais d'analyse pourraient être importants. Par ailleurs, les successions culturales n'ont pas été étudiées car les enquêtes PKGC ne sont pas la source de données la plus pertinente pour cet aspect, mais la présence de prairies temporaires ou permanentes dans les assolements a été analysée pour apporter de potentiels éléments de quantification différenciée AB/AC.

Analyse statistique des variables qualitatives : Les données brutes des enquêtes PKGC ont été traitées pour extraire l'effectif de parcelles concernées par la variable à expliquer selon les facteurs explicatifs : mode de production (AB, AC), région (NO, NE, SE, SO), et groupes de culture (blé tendre d'hiver, céréales d'hiver, céréales de printemps, oléagineux, protéagineux). Pour évaluer l'effet de ces facteurs explicatifs et leurs interactions sur les variables qualitatives à expliquer, un modèle linéaire généralisé



(GLM) de type binomial a été ajusté à l'aide de la fonction `glm()` de R, puis une analyse de la variance de type III a été réalisée à l'aide de la fonction `Anova()` du package `car`. Des comparaisons a posteriori ont ensuite été effectuées, à l'aide du package `emmeans`, à partir des moyennes marginales estimées (EMMeans, option `type = "response"`) pour chacun des facteurs explicatifs ainsi que pour l'effet du mode de production dans chaque combinaison région × type de culture.

Variables quantitatives : Les données extraites des enquêtes PKCG sont, pour chaque variable, l'effectif pour lequel la variable est non nulle, sa moyenne et sa variance, ainsi que la répartition en quartiles. La comparaison entre les groupes AB et AC a été réalisée à l'aide de contrastes linéaires. Un vecteur de pondération a été défini en attribuant des coefficients opposés aux deux groupes de manière à estimer directement la différence entre leurs valeurs moyennes. L'estimation du contraste a été obtenue par combinaison linéaire des moyennes des groupes, pondérées par les coefficients définis. L'erreur standard associée a été calculée à partir des variances des groupes concernés, permettant la construction d'un intervalle de confiance à 95 % autour de l'estimation. La significativité statistique du contraste a été évaluée en vérifiant si cet intervalle incluait la valeur nulle.

3. Résultats généraux - points communs et spécificités des modes de production

3.1. Répartition des surfaces par mode de production, région et groupe de culture

La répartition des surfaces (Figure 1) par zone et mode de production est par construction (voir Méthodologie 2.3) cohérente avec la réalité des cultures enquêtées avec, pour l'AB, une forte représentation du SO (42 % du total des surfaces en AB de notre échantillon), et pour l'AC, une grande majorité des surfaces située dans la moitié nord (74 % du total des surfaces en AC de notre échantillon pour le NO et NE réunis). À noter que le SE regroupe nettement moins de surface que les autres régions pour l'AB et l'AC.

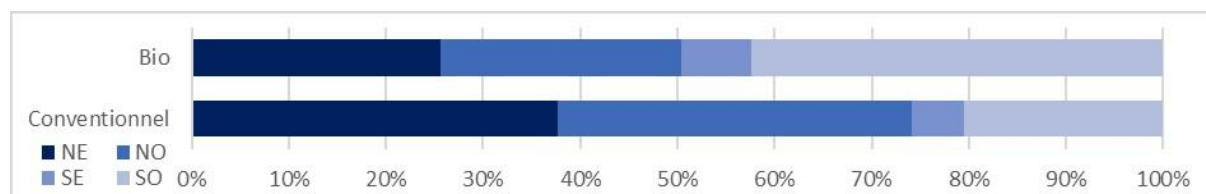


Figure 1 : Part relative de chaque zone dans les modes de production

Description de la figure

Graphique en barre empilées de la répartition géographique des surfaces de grandes cultures en AB et en AC dans les zones divisant la France en quatre, montrant la plus grande part de surfaces dans la moitié sud en AB.

Les céréales dominent la sole cultivée quel que soit le mode de production (75 % et 91 % de la surface totale de notre échantillon pour l'AB et l'AC respectivement) et le blé tendre d'hiver est la culture la plus représentée (35 % et 45 % de la surface totale de notre échantillon pour l'AB et l'AC respectivement). Les protéagineux et les oléagineux ont une part relative dans le total des surfaces plus important en AB (respectivement 13 % et 12 %) qu'en AC (respectivement 6 % et 3 %). On rappelle que le colza, la betterave sucrière et les pommes de terre ne font pas partie des analyses.

3.2. Éléments de l'itinéraire technique

3.2.1 Présence de prairies dans les rotations

La présence de prairies temporaires ou permanentes dans les assolements (seuls les 5 derniers précédents sont disponibles dans les données) est significativement plus élevée en AB qu'en AC (41 % vs 16 % pour l'AB et l'AC respectivement). Les écarts sont également significatifs à l'échelle des zones



mais ceux-ci sont moins marqués dans la moitié sud (33 % et 21 % pour l'AB et l'AC dans le SO respectivement et 44 % et 20 % pour l'AB et l'AC dans le SE respectivement) que dans la moitié nord (39 % et 10 % pour l'AB et l'AC dans le NE respectivement et 48 % et 15 % pour l'AB et l'AC dans le NO respectivement). En outre, au niveau national 19 % des exploitations en AB présentent des prairies de 3 ans ou plus sur les 5 précédents, contre seulement 5 % en AC (données non montrées).

Tableau 2 : Comparaison entre modes de conduite bio (AB) et conventionnel (AC) selon le type de culture et la zone géographique pour les variables d'intérêt. Les pourcentages (%) correspondent à la part de parcelles concernées par la pratique, suivie de l'intervalle de confiance à 95 % associé à la proportion mentionnée. Les comparaisons se font entre mode de culture pour un type de culture dans une zone donnée ; la présence d'un astérisque après l'intervalle de confiance AB indique que la différence AB/AC est significative ($p < 0.05$). La quantité N, IC 95 % correspond à l'intervalle de confiance du contraste AB vs. AC pour la modalité donnée. La valeur " na " est affichée si les conditions de représentativité ne sont pas remplies.

Type de culture	Zone	Mode de conduite	Présence de prairies dans les 5 précédents (% de parcelles)	Couverture du sol en interculture (% de parcelles)	Labour (% de parcelles)	Travail du sol profond (> 15 cm) (% de parcelles)	Travail du sol moyen nement profond (8 – 15 cm) (% de parcelles)	Travail du sol superficiel (< 8 cm) (% de parcelles)	Désherbage mécanique hors herse étrille (% de parcelles)	Désherbage mécanique - Herse étrille (% de parcelles)	Traitement PPP (% de parcelles)	Fertilisation N (% de parcelles)	Quantité N appliquée (kg N ha ⁻¹)	Ecart de quantité N, IC 95
Blé tendre hiver	NE	AB	58 [47, 68] *	56 [46, 67] *	70 [59, 78] *	6 [3, 14]	29 [20, 40]	95 [87, 98] *	27 [18, 37] *	43 [33, 54] *	36 [27, 47] *	60 [49, 70] *	82	[-117 ; -89] *
Blé tendre hiver	NE	AC	11 [9, 14]	44 [40, 47]	46 [43, 50]	12 [10, 14]	35 [31, 38]	81 [78, 83]	2 [1, 3]	5 [4, 7]	98 [97, 99]	97 [95, 98]	185	
Céréales hiver	NE	AB	48 [41, 55] *	60 [53, 67]	64 [57, 70] *	9 [6, 14]	28 [22, 35] *	93 [89, 96] *	15 [10, 20] *	35 [29, 42] *	7 [4, 11] *	47 [40, 54] *	92	[-73 ; -49] *
Céréales hiver	NE	AC	20 [19, 22]	65 [62, 67]	51 [48, 53]	10 [9, 12]	36 [34, 39]	87 [85, 89]	2 [1, 2]	5 [4, 6]	91 [90, 93]	96 [95, 97]	153	
Céréales printemps	NE	AB	44 [39, 50] *	70 [65, 76]	73 [67, 78] *	9 [6, 12]	37 [32, 43]	89 [85, 92]	37 [31, 43] *	39 [33, 45] *	5 [3, 9] *	55 [49, 61] *	107	[-76 ; -49] *
Céréales printemps	NE	AC	11 [10, 12]	70 [68, 72]	66 [65, 68]	12 [11, 13]	37 [36, 39]	87 [86, 88]	8 [7, 9]	4 [3, 5]	96 [95, 96]	96 [96, 97]	169	
Oléagineux	NE	AB	24 [14, 39] *	74 [60, 85]	72 [58, 83] *	18 [9, 32]	37 [25, 52]	94 [82, 98]	53 [38, 67] *	27 [16, 41] *	11 [5, 24] *	46 [32, 61] *	na	na
Oléagineux	NE	AC	7 [5, 10]	78 [74, 82]	46 [41, 51]	15 [12, 19]	36 [31, 40]	87 [83, 90]	10 [8, 14]	2 [1, 4]	95 [93, 97]	91 [88, 94]	83	
Protéagineux	NE	AB	29 [23, 37] *	58 [50, 66] *	67 [59, 75] *	12 [7, 18]	41 [34, 49]	92 [86, 96] *	25 [19, 33] *	42 [34, 50] *	na	14 [9, 20]	na	na
Protéagineux	NE	AC	6 [4, 7]	69 [67, 72]	54 [52, 57]	12 [10, 14]	36 [34, 39]	86 [84, 87]	4 [3, 5]	5 [4, 6]	93 [91, 94]	19 [17, 22]	76	
Blé tendre hiver	NO	AB	64 [51, 74] *	40 [29, 53]	84 [72, 91] *	na	40 [29, 53]	87 [76, 93] *	20 [12, 32] *	48 [36, 60] *	22 [14, 34] *	47 [35, 59] *	122	[-73 ; -21] *
Blé tendre hiver	NO	AC	16 [14, 19]	30 [27, 34]	54 [51, 58]	12 [10, 14]	37 [34, 41]	74 [70, 77]	2 [1, 3]	3 [2, 4]	99 [97, 99]	97 [96, 98]	169	
Céréales	N	AB	56	40	74	12 [9,	28 [23,	91	11 [8,	37	3 [1,	41	104	[-51 ;



hiver	O		[50, 62] *	[35, 46]	[68, 78] *	16]	33] *	[87, 94] *	15] *	[32, 42] *	5] *	[35, 46] *		-22] *
Céréales hiver	N O	AC	23 [21, 25]	44 [42, 46]	62 [60, 64]	13 [12, 15]	35 [33, 37]	85 [84, 87]	1 [1, 2]	4 [3, 5]	92 [90, 93]	94 [93, 95]	141	
Céréales printemps	N O	AB	61 [56, 66] *	50 [45, 56]	84 [80, 88] *	12 [9, 16] *	43 [38, 49]	90 [86, 93]	59 [53, 64] *	60 [55, 65] *	3 [2, 6] *	58 [53, 63] *	129	[-52 ; -28] *
Céréales printemps	N O	AC	25 [24, 27]	56 [54, 58]	66 [64, 68]	21 [19, 23]	43 [41, 45]	88 [86, 89]	12 [11, 13]	6 [5, 7]	93 [92, 94]	95 [94, 96]	169	
Oléagineux	N O	AB	31 [19, 46] *	79 [65, 88]	83 [69, 92] *	18 [9, 32]	37 [25, 52]	92 [80, 97]	74 [60, 85] *	44 [31, 58] *	9 [4, 21] *	46 [32, 61] *	na	na
Oléagineux	N O	AC	14 [11, 17]	69 [65, 74]	46 [41, 51]	21 [17, 25]	34 [29, 39]	93 [90, 95]	19 [15, 23]	3 [2, 5]	97 [94, 98]	90 [86, 93]	85,7	
Protéagineux	N O	AB	33 [21, 48] *	44 [31, 58] *	77 [62, 87] *	14 [6, 27]	27 [16, 41]	85 [72, 93]	18 [9, 32] *	42 [29, 56] *	na	11 [5, 24]	na	na
Protéagineux	N O	AC	7 [6, 10]	79 [76, 82]	52 [48, 56]	17 [14, 20]	36 [32, 39]	83 [80, 86]	3 [2, 4]	4 [2, 5]	95 [93, 97]	10 [8, 13]	63	
Blé tendre hiver	SE	AB	61 [42, 77] *	40 [24, 59]	79 [60, 91] *	na	22 [10, 41]	86 [68, 95]	15 [6, 33]	50 [33, 68] *	18 [8, 37] *	54 [36, 71] *	na	na
Blé tendre hiver	SE	AC	33 [28, 39]	26 [21, 31]	57 [51, 63]	11 [8, 15]	30 [24, 35]	82 [77, 86]	na	3 [2, 6]	95 [91, 97]	96 [93, 98]	148	
Céréales hiver	SE	AB	72 [66, 78] *	33 [27, 40]	62 [55, 69]	12 [8, 17]	26 [20, 32]	90 [85, 94]	7 [4, 11] *	34 [28, 41] *	4 [2, 7] *	63 [56, 69] *	91	[-71 ; -44] *
Céréales hiver	SE	AC	38 [35, 41]	36 [33, 39]	62 [59, 65]	13 [11, 15]	30 [27, 33]	87 [84, 89]	2 [1, 3]	5 [4, 7]	88 [86, 90]	95 [93, 96]	149	
Céréales printemps	SE	AB	60 [48, 72] *	40 [29, 53]	85 [74, 93]	5 [2, 15] *	40 [29, 53]	89 [78, 95]	74 [61, 83] *	42 [30, 55] *	na	74 [61, 83] *	144	[-80 ; -32] *
Céréales printemps	SE	AC	28 [25, 32]	41 [37, 45]	79 [76, 82]	17 [14, 20]	38 [34, 42]	88 [85, 90]	24 [21, 28]	3 [2, 4]	94 [92, 96]	95 [94, 97]	200	
Oléagineux	SE	AB	44 [23, 68] *	51 [28, 73]	51 [28, 73]	na	50 [28, 73]	88 [62, 97]	50 [28, 73]	19 [7, 45] *	na	44 [23, 68] *	na	na
Oléagineux	SE	AC	9 [6, 14]	48 [41, 54]	67 [60, 72]	20 [15, 25]	46 [40, 53]	92 [87, 95]	30 [24, 36]	2 [1, 5]	96 [93, 98]	88 [83, 92]	79	
Protéagineux	SE	AB	6 [1, 31]	56 [34, 77]	89 [65, 98]	na	34 [16, 58]	95 [7000]	84 [60, 95] *	73 [49, 88] *	na	na	na	na
Protéagineux	SE	AC	9 [6, 14]	35 [29, 43]	67 [60, 74]	16 [11, 22]	39 [32, 47]	86 [80, 91]	8 [5, 13]	4 [2, 8]	93 [87, 96]	23 [17, 30]	118	
Blé tendre hiver	S O	AB	36 [27, 46] *	18 [12, 27] *	38 [29, 49]	28 [20, 38] *	30 [22, 40]	92 [85, 96] *	16 [10, 25] *	53 [43, 63] *	23 [15, 32] *	56 [46, 66] *	85	[-94 ; -54] *
Blé tendre hiver	S O	AC	26 [22, 30]	29 [24, 33]	34 [30, 39]	18 [14, 22]	38 [33, 43]	82 [77, 85]	2 [1, 4]	3 [2, 6]	94 [91, 96]	97 [95, 99]	159	
Céréales hiver	S O	AB	46 [42, 51] *	32 [28, 36]	40 [36, 44] *	24 [21, 28] *	34 [30, 38]	89 [85, 91] *	9 [7, 12] *	32 [28, 36] *	6 [4, 8] *	44 [39, 48] *	80	[-68 ; -47] *
Céréales hiver	S O	AC	39 [37, 42]	36 [34, 38]	47 [45, 49]	17 [16, 19]	35 [33, 37]	80 [78, 82]	2 [1, 2]	4 [4, 5]	83 [81, 85]	93 [92, 94]	138	
Céréales printemps	S O	AB	41 [34, 48] *	50 [43, 57] *	69 [62, 76]	17 [12, 23] *	37 [30, 44]	88 [82, 92]	64 [57, 71] *	41 [34, 48] *	6 [3, 10] *	77 [70, 83] *	142	[-68 ; -34] *
Céréales printemps	S O	AC	30 [27, 36]	39 [36, 45]	67 [65, 74]	23 [21, 25]	42 [39, 44]	84 [82, 86]	19 [17, 21]	3 [3, 4]	93 [91, 95]	96 [95, 97]	194	



			32]	41]	69]	26]		86]	21]		94]	97]		
Oléagineux	S	AB	26 [21, 33] *	51 [44, 58]	56 [49, 63]	28 [23, 35]	40 [33, 47]	95 [91, 98] *	59 [52, 66] *	32 [26, 39] *	15 [10, 20] *	35 [29, 42] *	64	[-26 ; 2]
Oléagineux	S	AC	11 [9, 14]	55 [51, 58]	51 [47, 55]	31 [28, 35]	42 [39, 46]	90 [87, 92]	24 [21, 27]	5 [3, 7]	94 [92, 96]	83 [80, 86]	76	
Protéagineux	S	AB	20 [15, 26] *	42 [36, 49] *	46 [40, 53]	39 [33, 45]	42 [36, 48]	95 [91, 97] *	60 [53, 66] *	49 [43, 56] *	3 [2, 7] *	11 [7, 15]	na	na
Protéagineux	S	AC	11 [9, 13]	50 [47, 54]	43 [40, 46]	33 [30, 36]	37 [34, 40]	88 [86, 90]	12 [10, 14]	7 [6, 9]	85 [83, 87]	13 [11, 16]	76	

3.2.2 Couverture du sol à l'interculture

La gestion du sol pendant l'interculture, *i.e.* la période entre deux cultures de vente, intègre une large gamme de possibilités pour l'agriculteur s'il souhaite couvrir son sol et que sa séquence de culture le lui permet. Il peut notamment semer des cultures intermédiaires multi-services (CIMS) non exportées, ou laisser les repousses de la culture précédente et les adventices jouer le rôle de CIMS. En France, les agriculteurs situés en zones vulnérables nitrates appliquent certaines pratiques culturales obligatoires définies par des programmes d'action, dont la couverture végétale hivernale. En 2021, les zones vulnérables occupent l'essentiel de la SAU de la moitié nord, une majorité de celle du SO, et une minorité de celle du SE (MTECT, et MASAF, 2024).

À l'échelle nationale, les résultats montrent que la proportion de parcelles couvertes en interculture par une culture non valorisée (CIMS ou repousse homogène), avant culture de vente, est similaire entre AB et AC pour les espèces étudiées, et que la tendance se confirme à l'échelle des zones considérées. À noter que la proportion de parcelles couvertes est, indépendamment du mode de production, similaire dans la moitié sud (39 % et 40 %, pour le SO et le SE respectivement, données non montrées) et significativement inférieure aux zones de la moitié nord (53 % pour le NO et 65 % pour le NE, données non montrées). Concernant les types de cultures, la proportion de parcelles couvertes en interculture est globalement similaire entre AB et AC dans les 4 régions (Tableau 2), avec quelques exceptions, notamment pour le blé tendre dans le NE où la couverture en AB est supérieure (56 vs. 44 %) et le SO où la couverture en AB est inférieure à celle en AC (18 vs. 29 %). Le seul groupe de culture présentant des différences significatives est celui des protéagineux, avec une proportion significativement plus faible en AB qu'en AC, hors SE (Tableau 2). À noter que les exploitations en AB étant majoritairement situées dans la moitié sud, soit dans une zone moins concernée par les couverts quel que soit le mode de production, la moyenne nationale de couverture du sol à l'interculture en bio se trouve tirée vers le bas, au contraire de celle de l'AC qui bénéficie de la plus grande proportion de couverts dans la moitié Nord.

3.2.3 Travail du sol

Labour :

À l'échelle nationale, la proportion de parcelles labourées au moins une fois dans l'année est significativement plus élevée en AB qu'en AC (69 % vs. 56 % respectivement, Tableau 2). Cette tendance s'observe dans les deux régions du nord, indépendamment du type de culture. À l'inverse, dans les régions SO et SE, la proportion de parcelles labourées est similaire entre AB et AC pour la plupart des espèces, à l'exception des céréales d'hiver dans le SO (40 % et 47 % pour AB et AC respectivement) et du blé tendre d'hiver dans le Sud-Est (79 % et 57 % pour AB et AC respectivement, Tableau 2). La part plus importante de parcelles labourées dans la moitié nord tire fortement vers le haut la proportion nationale de surfaces labourées en AB.

Travail du sol > 15 cm sans retournement :



Les résultats présentés pour cette catégorie aux échelles nationales et des zones géographiques, excluent la région SE et la culture de blé tendre en raison de secrets statistiques en AB sur ces modalités. Ainsi, la proportion de parcelles concernées par au moins un travail du sol supérieur à 15 cm de profondeur et sans retournement (sous-soleuses, décompacteurs, roto-bêcheurs, cultivateurs, pulvérisateurs et charrue à disques) est similaire entre les deux modes de production, (16 % et 17 % pour AB et AC respectivement, Tableau 2). Cette tendance se vérifie également au sein des 3 zones. À noter qu'indépendamment du mode de production, le travail du sol profond sans retournement est significativement plus élevé dans le SO (26 %) que dans le NO (15 %, $p < 0.05$) et dans le NE (11 %, $p < 0.001$). À l'échelle des cultures, les céréales de printemps sont significativement moins concernées par le travail du sol profond en AB qu'en AC dans le NO, SE et SO et similaire dans le NE (Tableau 2). En revanche, dans le SO, les céréales d'hiver et le blé tendre ont une proportion de parcelles concernées par le travail du sol profond significativement plus élevée en AB qu'en AC (Tableau 2).

Travail du sol de (8 – 15 cm) :

À l'échelle nationale, la proportion de parcelles concernées par au moins une intervention de travail du sol entre 8 et 15 cm de profondeur (déchaumage, strip-till et passage de cultivateur) est similaire entre les deux modes de production, 34 % pour l'AB et 37 % pour l'AC. Cette tendance se vérifie de manière similaire au sein des 4 zones géographiques.

Travail du sol superficiel à l'interculture (< 8 cm) :

À l'échelle nationale, la proportion de parcelles concernées par au moins une intervention de travail du sol superficiel à une profondeur inférieure à 8 cm (déchaumeurs, vibroculteurs, sarclours déchaumeur, strip-till, et herse animées) est très importante pour les deux modalités et légèrement supérieure en AB qu'en AC (91 vs. 85 %). La proportion est significativement plus élevée en AB qu'en AC dans le NE et le SO (94 vs. 86 %, pour les 2 zones, $p < 0.001$) et similaires entre les 2 modes de production dans le NO et SE (91 vs. 86 % et 94 vs. 88 %). Concernant les types de cultures, pour le blé tendre d'hiver et les céréales d'hiver, la proportion est significativement plus élevée en AB qu'en AC hors SE (Tableau 2). *A contrario*, les différences ne sont pas significatives entre AB et AC pour les céréales de printemps, les oléagineux hors SO, et les protéagineux hors NE et SO (Tableau 2).

3.2.4 Désherbage mécanique en culture

À l'échelle nationale, la proportion de parcelles concernées par au moins un désherbage mécanique hors herse étrille (bineuse ou sarclouse, désherbineuse, houe rotative, écroûteuse et outil combiné) est nettement supérieure en AB qu'en AC, (33 vs. 5 %), et également quelle que soit la zone ou la culture considérée. La tendance est la même pour l'usage de la herse étrille (41 vs. 3 % pour l'AB et l'AC respectivement à l'échelle nationale). Globalement, tous modes de production confondus et toutes zones confondues, les types de cultures les plus concernés par le désherbage mécanique sont les protéagineux 19 % [17 %, 20 %], les céréales de printemps (principalement le maïs et le sorgho), 32 % [30 %, 34 %] et les oléagineux 39 % [36 %, 41 %].

3.2.5 Protection des cultures

Le nombre de parcelles ayant reçu au moins un traitement phytosanitaire est largement moins élevé en AB qu'en AC (8 % vs. 94 %) Cette tendance s'observe dans toutes les zones et quel que soit le type de culture (Tableau 2). Le blé tendre d'hiver est l'espèce qui reçoit le plus fréquemment un traitement, sur 27 % des surfaces en AB contre 100 % des surfaces en AC. Les céréales d'hiver sont traitées sur 4 % des surfaces en AB contre 97 % des surfaces en AC, et les céréales de printemps sur 3 % des surfaces en AB contre 99 % des surfaces en AC. Les oléagineux sont traités sur 11 % des surfaces en AB et 93 % des surfaces AC, et les protéagineux sur 2 % des surfaces AB, contre 98 % des surfaces AC. Sur ces surfaces traitées, l'IFT est d'environ 1 en bio et 3.2 en conventionnel ; les IFT moyens nationaux



par espèce AB et AC n'ont pas été calculés au regard du grand nombre de valeurs nulles en AB. À noter qu'en AB grandes cultures, l'IFT provient principalement des traitements de semences.

3.2.6 Fertilisation azotée

La part des parcelles concernées par au moins un apport de fertilisation azotée est de 35 % en AB contre 86 % en AC. Les proportions sont de 50 et 93 % si l'on exclut les protéagineux, pour l'AB et l'AC respectivement. Les céréales sont les cultures les plus concernées, quel que soit le mode de production, avec notamment 58 % et 98 % des parcelles de blé tendre recevant au moins un apport d'azote exogène en AB et AC respectivement. Viennent ensuite les oléagineux avec 33 et 88 %, puis les protéagineux avec 9 et 14 %, pour l'AB et l'AC respectivement.

Contrairement aux quantités d'azote minéral renseignées directement dans l'enquête, les quantités d'azote organique sont calculées à partir de quantités de fumure, plus difficiles à estimer par l'agriculteur, et de coefficients multiplicateurs pour la teneur en N ; cela implique une plus grande incertitude sur la quantité de N organique, et 10 valeurs ressortant comme aberrantes ont donc été supprimées pour les analyses. On rappelle que l'azopril, fertilisant organique contenant une part non négligeable d'azote minéral, était encore autorisé en AB sur la campagne 2020-2021 (Grandes cultures bio, 2023).

La quantité d'azote exogène total apporté par hectare, parmi les parcelles avec apport d'azote, est systématiquement inférieure en AB par rapport à l'AC pour le blé tendre et les céréales d'hiver et de printemps ($p < 0.05$). Sur blé tendre, la quantité moyenne de N apporté sur les 58 % de parcelles fertilisées en AB est de 100 kg N ha⁻¹, contre 166 kg N ha⁻¹ sur 98 % des parcelles en AC. Sur céréales de printemps, elle est de 130 kg N ha⁻¹ sur les 67 % de parcelles fertilisées en AB et de 183 kg N ha⁻¹ sur 97 % des parcelles en AC. Les quartiles présentés dans le Tableau 3 permettent de visualiser la dispersion des valeurs au regard de la forte hétérogénéité entre AB et AC : ainsi à l'échelle France, 50 % des parcelles de blé tendre reçoivent moins de 10 kg N ha⁻¹ en AB et moins de 170 kg N ha⁻¹ en AC. Pour les céréales d'hiver, 75 % des parcelles reçoivent moins de 67 kg N ha⁻¹ en AB, contre moins de 175 kg N ha⁻¹ en AC.

Tableau 3 : Quartiles des apports en azote par région, espèce et mode de production (kg N ha⁻¹)

Quartile	FR			SE			SO			NE			NO		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
Blé tendre AB	-	10	88	s			-	8	80	-	34	80	-	-	120
Blé tendre AC	134	170	199				122	161	191	154	181	212	134	168	196
Céréales hiver AB	-	-	67	-	-	-	50	-	-	83	-	-	70	-	70
Céréales hiver AC	94	134	175	92	78	122	177	111	148	177	98	132	166	132	166
Céréales printemps AB	-	52	138	-	10	110	165	-	6	100	-	48	138	48	138
Céréales printemps AC	105	156	223	127	120	179	242	109	150	07	92	143	212	143	212
Oléagineux AB	-	-	30	s			-	-	24	-	-	43	-	-	44
Oléagineux AC	39	60	92				32	56	86	47	64	96	42	68	100
Protéagineux AB	-	-	-	s			-	-	-	-	-	-	-	-	-
Protéagineux AC	-	-	-				-	-	-	-	34	80	-	-	120

Toutes régions et cultures confondues, les différents types de fumure organique appliqués sont présentés sur la Figure 2. En AB, les apports d'azote se font principalement par de la fumure organique : ce sont les fientes de poules pondeuses qui arrivent en tête avec 30 % des surfaces fertilisées par de la fumure organique (auxquelles on peut ajouter 8 % de fumier de volailles), puis le fumier de bovin sur 22 % des surfaces, les composts d'origine animale sur 17 % et ceux d'origine végétale sur 7 % des surfaces. En AC, 23 % des parcelles ont un apport de fumure organique; celle-ci est constituée à 50 % de fumiers de bovins, et de 22 % de lisiers (porcs et bovins).

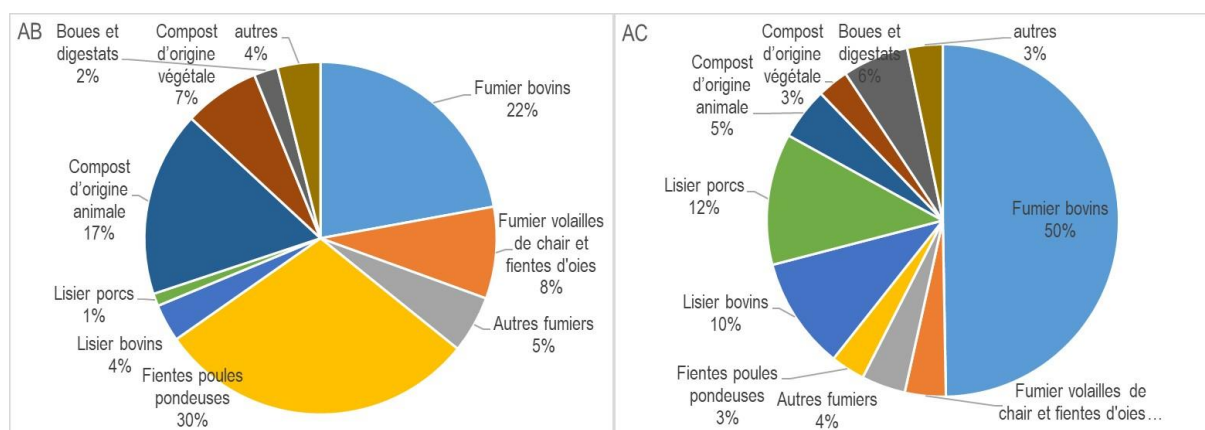


Figure 2 : Répartition des types de fumure organique – AB et AC

Description de la figure

Deux graphiques camembert présentant la répartition en pourcentage de l'origine des fumures organiques apportées en AB et en AC.

3.3. Rendements

Les rendements en AB pour la campagne 2021 sont systématiquement significativement inférieurs à ceux en AC, quels que soient le type de culture et la région considérée ($p < 0.05$). Pour le blé tendre d'hiver, les rendements en AB sont de 26 (SO), 29 (SE) 32 (NO) 34 (NE) q. ha⁻¹ et de 54 (SO), 59 (SE) et 72 (NE et NO) q ha⁻¹ en AC, correspondant à une baisse relative moyenne de rendement de 54 % en AB par rapport à l'AC. Ces ordres de grandeur sont sensiblement les mêmes pour les autres céréales d'hiver. À noter que pour ces deux types de culture, les rendements sont globalement plus élevés dans la moitié nord que dans la moitié sud. Concernant les céréales de printemps, les rendements en AB sont réduits en moyenne de 33 % en AB par rapport à l'AC. Les rendements en oléagineux et protéagineux dépendent moins des régions de production, et les écarts relatifs de rendement entre AB et AC sont en moyenne de 40 % pour les oléagineux et de 25 % pour les protéagineux.

Les quartiles permettent de visualiser dans le **Tableau 4** la forte dispersion des rendements ainsi que les différences entre les régions. La variabilité des rendements au sein d'une même espèce est plus forte en AB. De plus, l'écart entre les rendements AB et AC est plus important pour les petits rendements (Q1 : -61 %) que pour les grands (Q3 : -52 %). Les valeurs des rendements sont présentées uniquement pour le blé tendre, seul « type de culture » non regroupé dans notre étude.

Tableau 4 : Quartiles des rendements du blé tendre par région et mode de production (quintaux ha⁻¹)

Quartile	FR			SE			SO			NE			NO		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
Blé tendre AB	22	28	38	Secret			20	25	30	25	32	41	25	30	38
Blé tendre AC	57	70	80				45	55	65	65	75	85	65	74	81
Ratio AB/AC	39 %	40 %	48 %				44 %	45 %	46 %	38 %	43 %	49 %	38 %	41 %	47 %

4. Discussion

Les écarts de rendements en blé tendre en AB et AC observés en 2021 sont dans l'ordre de grandeur de ceux observés entre 2018 et 2022 (- 55 %) et correspondent aussi aux différences les plus élevées entre AB et AC en grandes cultures (Agreste 2022). Globalement, les écarts de rendements entre AB et AC sont plus élevés en cultures d'hiver qu'en cultures de printemps. Ceci peut s'expliquer par la plus longue exposition des premières aux facteurs abiotiques et biotiques potentiellement limitants et



réducteurs des rendements, sans possibilité de recours aux intrants de synthèse, fertilisants ou produits phytosanitaires, en AB et moins de possibilité de désherbage mécanique. Les protéagineux, notamment le soja, sont les cultures avec l'écart relatif le moins important entre AB et AC (Agreste 2022), ce qui suggère un impact important de la fertilisation dans l'explication des différences de rendement observées. Néanmoins, la connaissance des écarts de rendement entre AB et AC, ne saurait se limiter aux seules données présentées dans cette étude, qui ne sont fournies qu'à titre indicatif. En effet, les niveaux de rendements résultent d'interactions complexes entre génotype, pratiques culturales et conditions pédoclimatiques. Ils doivent donc être systématiquement contextualisés et observés sur plusieurs années pour conclure sur les niveaux des écarts constatés. De plus, une partie des écarts de rendement au niveau national s'explique par la part significativement plus élevée de grandes cultures bio dans le SO où les rendements sont relativement faibles, quel que soit le mode de culture, et inversement par la part importante de grandes cultures en AC dans la moitié nord où les rendements sont les plus élevés (Agreste 2022). Notre étude n'avait pas pour objectif d'analyser plus en détail les écarts de rendements entre AB et AC.

Le recours plus important aux prairies temporaires et/ou permanentes en AB par rapport à l'AC s'explique en grande partie par les services écosystémiques de fertilisation et de gestion des adventices qu'elles fournissent (Munier-Jolain *et al.*, 2012).

La couverture du sol en interculture augmente en tendance depuis 2001, passant d'un niveau anecdotique (3 % des surfaces, Cavan *et al.*, 2016) à près d'une parcelle sur deux de la SAU grandes cultures en France en 2021, d'après les résultats de l'enquête. Cette dynamique s'explique principalement par la directive nitrates qui impose, en zones vulnérables, une couverture du sol systématique lors d'intercultures longues, *i.e.* avant cultures de printemps, hors dérogations définies par les plans d'actions régionaux et dans certains cas lors d'intercultures courtes (Cavan *et al.*, 2016 ; MTECT et MASAF 2024). Ainsi, il est logique de retrouver les cultures comme les céréales de printemps, le tournesol ou le soja parmi les cultures les plus concernées par le recours aux cultures intermédiaires. La plus forte proportion de parcelles concernées par une culture intermédiaire dans la moitié nord par rapport au sud est certainement liée à sa plus grande proportion de zones vulnérables qui imposent réglementairement l'implantation de couverts végétaux.

Les bénéfices attendus des cultures intermédiaires, notamment comme relais azoté, apparaissent comme clés dans les systèmes de culture en AB mais aussi en AC où le prix des matières fertilisantes peut fortement varier. En AB, l'interculture est cependant souvent utilisée comme une fenêtre d'intervention pour gérer les adventices. À noter qu'en AB, la part de prairies plus importante réduit la part de parcelles susceptibles d'avoir un couvert d'interculture, car les cultures de vente suivant une prairie sont souvent implantées rapidement après leur destruction. Malgré ces différences importantes de gestion des systèmes, la proportion de parcelles couvertes à l'interculture en AB est la même qu'en AC. Ce résultat diffère de l'analyse (Carrière *et al.*, 2022) des enquêtes PKGC de 2017 qui trouvait une moindre part de parcelles avec des CI en AB, ce qui peut s'expliquer par de nombreuses raisons : effet de l'année sur la présence de couverts, évolution des pratiques, méthodologie de traitement des données différente, périmètre différent puisque notre article exclut 3 cultures en AC dont deux (pomme de terre et betterave) souvent précédées de CI.

Concernant le travail du sol, nos résultats ont montré que pour la plupart des cas étudiés, la part de parcelles labourées est plus grande en AB qu'en AC. Dans la moitié sud (notamment SO), où l'on observe davantage de parcelles en AB, la proportion de parcelles labourées pour une culture donnée est similaire pour les deux modes de culture, et bien inférieure à la moitié nord, ce qui est probablement dû à la présence de sols à forte teneur en argiles, et à la part plus importante de dévers qui limitent les possibilités de labourer dans de bonnes conditions. Le labour est prépondérant dans les systèmes de culture actuels, surtout en AB dans la moitié nord, malgré le recours relativement fréquent aux prairies temporaires et cultures pluriannuelles de type luzerne qui, en tête de rotation, ont un fort effet de



suppression des adventices qui peut perdurer plusieurs années après leur destruction (Munier-Jolain et al., 2012).

Nous n'avons pas observé de différences entre AB et AC concernant le travail du sol moyennement profond et profond sans retournement. Là encore, c'est le contexte pédoclimatique qui joue plus que le mode de production : dans le SO, la proportion de travail du sol profond est significativement plus élevée que dans les autres zones, compensant peut-être la moindre proportion de parcelles labourées. Nous observons par ailleurs davantage d'utilisation d'outils de désherbage mécanique, notamment herse étrille en AB, quand leur usage est anecdotique en AC à l'échelle nationale. De telles différences s'expliquent par l'importance de la gestion des adventices par des moyens mécaniques en AB quand l'AC repose davantage sur le désherbage chimique.

L'AB est beaucoup plus économe en intrants que l'AC, où l'essentiel des parcelles est concerné par au moins un traitement phytosanitaire et au moins un apport exogène d'azote. En AB les agriculteurs utilisent majoritairement la fertilisation comme un moyen de maintenir la fertilité de leur système, avec une fertilisation organique qui n'est pas directement assimilable par les cultures et dont l'effet se répartit sur plusieurs années ; et leur objectif de rendement est défini par le potentiel de leur sol à répondre aux besoins des cultures, ou par l'atteinte de critères de qualités (par exemple, le blé tendre meunier ou l'orge brassicole). En AC, l'objectif de rendement est fondé sur un objectif de productivité, qui peut être estimé selon des contraintes réglementaires.

Par ailleurs, le jeu de données permet également d'observer la diversité des pratiques et des similitudes de pratiques, voire d'approches de l'ITK, entre les deux modes de production, à travers la forte variabilité des indicateurs étudiés.

Enfin, nous avons vérifié (données non montrées) que les résultats présentés en pourcentage de parcelles concernées par une pratique ont des ordres de grandeur similaires avec une approche en pourcentage de surface pour la plupart des pratiques étudiées, ce qui tend à confirmer l'hypothèse d'indépendance des pratiques par rapport à la surface. Cependant, pour les variables quantitatives et notamment la fertilisation, les parcelles en AB étant en moyenne plus petites que les parcelles en AC, l'utilisation d'une moyenne à la parcelle donne des résultats différents d'une moyenne pondérée par la surface. Ainsi, en moyenne pondérée par la surface, les apports d'azote exogène en bio sont plus faibles (entre - 5 % et - 15 %), et ceux en conventionnel plus élevés (entre + 5 % et + 10 %) : les écarts entre les quantités de N apportées en AB et AC pourraient donc être plus conséquents selon la méthodologie retenue.

Les résultats obtenus, en particulier les données de caractérisation produites et présentées de manière détaillée dans le Tableau 2, pourront par exemple servir de base à des études prospectives nécessitant la création de scénarios de conduites des cultures intégrant le développement de l'AB à l'échelle de territoires.

5. Conclusion et perspectives

L'analyse des pratiques culturales en grandes cultures selon les modes de production AB et AC intégrant une approche géographique selon 4 grandes régions françaises, a permis d'observer comment certaines pratiques culturales peuvent dépendre autant de la région que du mode de production. En France, les différences entre AB et AC se trouvent principalement sur la part de prairies, le labour dans la moitié nord de la France et le désherbage mécanique, significativement plus élevés en AB, et le recours aux intrants azotés et pesticides (IFT), significativement plus élevés en AC. A l'inverse, la couverture du sol est similaire entre AB et AC et les niveaux sont surtout liés à la zone géographique, de même que le travail du sol profond sans retournement. De nombreuses interactions entre mode de production x zone x type de cultures ont été mis en évidence, montrant que l'analyse des pratiques culturales doit prendre en compte ces facteurs pour être pertinente. Néanmoins, dans le cas spécifique des enquêtes SSP, le nombre parfois important de données sous couvert de secret statistique en AB pour certaines variables ne permet pas une analyse exhaustive de toutes ces interactions.



Dans la continuité de ce travail, plusieurs pistes sont ouvertes pour mieux caractériser les systèmes de culture en AB versus AC, avec les enquêtes PKGC ou d'autres sources de données, telles que l'étude des successions culturales, la prise en compte d'autres variables (e.g., variétés, qualité) et de cultures majeures (e.g., colza, betterave, pomme de terre) et aussi réitérer le travail sur d'autres années climatiques. La présentation des résultats sous forme de pourcentage de surface concerné par une pratique plutôt que le pourcentage de parcelle pourrait permettre de comparer les résultats avec d'autres études et donc dégager des tendances évolutives depuis les dernières enquêtes. Enfin, une approche à l'échelle des systèmes de culture serait pertinente pour prendre en compte la complexité de conception des systèmes en AB et AC. L'analyse par pratique ne permet pas d'aboutir à des itinéraires techniques complets et cohérents, ceux-ci étant dépendants d'une logique de conception multicritères à l'échelle des rotations.

Ethique

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. L'accès à certaines données utilisées dans le cadre de ce travail a été réalisé au sein d'environnements sécurisés du Centre d'accès sécurisé aux données – CASD (Réf. 10.34724/CASD) - <https://doi.org/10.34724/CASD.56.5275.V1>

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

Alice Holvoet <https://orcid.org/0009-0009-6934-119X>

Loïc Viguié <https://orcid.org/0000-0001-7863-9478>

Natacha Sautereau <https://orcid.org/0009-0004-4431-7701>

Enguerrand Burel <https://orcid.org/0000-0003-1966-7844>

Amélie Carrière

Contributions des auteurs

Alice Holvoet : conceptualisation, méthodologie, curation des données, analyse formelle, rédaction - version originelle, pilotage

Loïc Viguié : conceptualisation, méthodologie, analyse formelle, rédaction - version originelle pilotage

Amélie Carrière : conceptualisation, obtention du financement, Rédaction - révision et correction

Enguerrand Burel : validation, rédaction - révision et correction

Natacha Sautereau : conceptualisation, méthodologie, obtention du financement, rédaction - révision et correction

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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

François Piraux (Arvalis) pour ses conseils en analyse statistique.

Déclaration de soutien financier

Article produit dans le cadre des projets INCYVIE (financé par l'ADEME et co-financé CASDAR) et ICEPA (financé par ECOPHYTO et co-financé CASDAR).

Références bibliographiques

Agreste, Chiffres & Données, Septembre 2024 NO 13, Enquête Pratiques culturales en grandes cultures 2021, Principaux résultats <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2413/detail/>

Agreste, Primeur, Enquête Terres labourables 2022, Juin 2023, N° 8 <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Pri2308/detail/>

Barbieri, P., Pellerin, S., Nesme, T. (2017). Comparing crop rotations between organic and conventional farming. *Scientific Reports*, 7(1), 13761 <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14271-6>

Carrière et al., 01/2022. Enquête du SSP sur les pratiques culturales – Le paysage de l'AB en 2017. *Perspectives agricoles*, 495, 14-20. <https://www.perspectives-agricoles.com/economie/enquete-du-ssp-sur-les-pratiques-culturales-le-paysage-de-lab-en-2017>

Cavan, N., Labreuche, J., & Wissocq, A., 2016, Cultures intermédiaires : des sols de plus en plus couverts. *Perspectives agricoles*, (433), 10-14. https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/d2/31/7d/ae/433_3533706090215912534.pdf

Guyomard H. (sous la direction de). 2013. Vers des agricultures à hautes performances. Volume 1. Analyse des performances de l'agriculture biologique. Inra. 368 pages. <https://hal.inrae.fr/hal-02804029>

Grandes cultures Bio 2023. Bulletin technique N°12. Janvier 2023. <https://www.biopaysdelaloire.fr/wp-content/uploads/Bulletin-technique-Grandes-Cultures-janvier2023.pdf>

Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (2024). Bilan de la mise en œuvre de la directive « nitrates » en France – période 2020-2023. Rapport quadriennal au titre de l'article 10 de la directive 91/676/CEE. Disponible sur : https://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/nid_france_rapport_2024.pdf

Nicolas Munier-Jolain, Safia Mediene, Helmut Meiss, F. Boissinot, W. Rainer, et al.. Rôle des prairies temporaires pour la gestion de la flore adventice dans les systèmes céréaliers. *Innovations Agronomiques*, 2012, 22, pp.71-84. <https://hal.science/hal-01019446>

Therond O. (coord.), Tichit M. (coord.), Tibi A. (coord.) et al., (2017). Volet "écosystèmes agricoles" de l'Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques. Rapport d'étude, Inra (France), 966 pages. <https://hal.inrae.fr/hal-02791232>

Pour citer cet article : Alice HOLVOET, Loïc VIGUIER, Enguerrand BUREL, Amélie CARRIÈRE, Natacha SAUTEREAU &, 2026 - Caractérisation des pratiques culturales en grandes cultures – comparaison entre l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol112-art04>



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.



Assurer la viabilité de la traite conventionnelle (non robotisée) par une approche multidimensionnelle

Jean-Louis POULET¹, Sébastien GUIOCHEAU², Florian DASSE³, Anne-Lise JACQUOT⁴

¹ Institut de l'Élevage, 8 rue de Monvoisin, 35650 Le Rheu

² Chambres d'agriculture de Bretagne, Aéroport - CS 57946, 29679 Morlaix-Cédex

³ CCMSA, 19 rue de Paris, 93000 Bobigny

⁴ Institut Agro Rennes-Angers, 65 Rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes

Correspondance : jean-louis.poulet@idele.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art05>

Résumé

La traite, centrale en élevage laitier, influence productivité, conditions de travail et bien-être animal. Dans un contexte d'agrandissement des troupeaux, les choix techniques deviennent déterminants. Malgré la progression de la robotisation, la traite conventionnelle reste majoritaire mais souffre d'une certaine pénibilité, nuisant à son attractivité. Les études menées montrent une grande diversité d'installations et un décalage croissant entre la morphologie des vaches et l'ergonomie des salles de traite, entraînant des postures contraignantes. Les principales difficultés concernent la circulation des vaches, la préparation des mamelles, le nettoyage des surfaces et certains agencements. Une approche globale intégrant ergonomie, organisation et accompagnement technique est nécessaire pour garantir une traite viable et de qualité.

Mots-clés : Traite, Ergonomie, Bovin, Mamelles, Travail

Abstract: Ensuring the sustainability of conventional (non-robotic) milking through a multidimensional approach

Milking, central task in dairy farming, affects productivity, working conditions and animal welfare. As herd sizes increase, technical choices become crucial. Despite the rise of robotisation, conventional milking remains predominant but suffers from a degree of strain, reducing its attractiveness. Studies show a wide diversity of installations and a growing mismatch between cow morphology and milking parlour ergonomics, leading to strenuous postures. The main difficulties involve cow flow, teat preparation, surface cleaning, and certain spatial layouts. A comprehensive approach integrating ergonomics, organisation, and technical support is needed to ensure sustainable and high-quality milking.

Keywords: Milking, Ergonomics, Bovine, Udder, Labour

1. Contexte

La traite, principale tâche d'astreinte en élevage laitier (4h30 en moyenne et 50 % de l'astreinte en période hivernale - Tirard *et al.*, 2020), influence fortement les résultats économiques (quantité et qualité du lait produit, niveau d'investissement et coût de fonctionnement de l'atelier laitier), les conditions de travail des trayeurs (pénibilité physique et charge mentale) et la santé des animaux, principalement mammaire (qualité de l'interface trayons/faisceaux trayeurs), ces 3 éléments étant en interaction.



Les structures laitières évoluent continuellement pour s'adapter à des contextes mouvants. Le nombre d'exploitations et de points de collecte diminuent depuis longtemps (-35 % de livreurs entre 2014 et 2024 - source idele-CNE [confédération nationale de l'élevage], 2025). Parallèlement, la quantité de lait produite (+5 %/VL entre 2005 et 2016), les nombres de VL (vaches laitières) et de postes de traite par trayeur ne font qu'augmenter (+40 % et +15 % respectivement entre 2013 et 2016 - source Idele-COFIT [Comité Français Interprofessionnel pour les Techniques de production du lait], non publié). Se posent donc bien souvent des questions autour du choix et des évolutions des équipements de traite en réponse à ce défi du maintien de la production dans ce contexte tendu (Losq *et al.*, 2009). En parallèle, la traite robotisée connaît un succès notoire depuis les années 2000 en France (57 % des Certi'Traite®, contrôles de conformité des nouvelles installations de traite, sont effectués sur des robots de traite, selon le CROCIT Bretagne [comité régional pour l'organisation des contrôles des installations de traite de Bretagne] en 2018, non publié), notamment en raison de la promesse évoquée de la suppression de l'astreinte et de la pénibilité physique liées à la traite (Hostiou *et al.*, 2014). Elle conduit cependant à une modification en profondeur des systèmes de production, avec la réduction de la part du pâturage et pour corollaire un accroissement des coûts de production. Parfois, ce mode de traite impacte également indirectement les filières (modification des habitudes de ramassage du lait, temps contraint pour intervenir sur les robots...). Elle présente également des limites et contraintes dans le travail des éleveurs et éleveuses, souvent minorées : astreinte des alarmes, charge mentale liées à la surcharge des stalles...

La traite conventionnelle (par opposition à la traite robotisée) reste encore majoritairement présente sur le terrain (environ 75 % des installations de traite en service à ce jour, selon le COFIT, non publié), notamment parce qu'elle présente un certain nombre d'avantages, tels que sa plus grande compatibilité avec le pâturage, sa réalisation en temps contenu, sa plus grande adaptabilité aux variations des effectifs à traire, sans effets de seuil (obligation d'investir dans une stalle supplémentaire par tranche d'environ 70, 60 ou 50 VL, suivant le type de robot ou le système d'élevage). Elle présente néanmoins certaines limites (pénibilité, répétitivité, ...) qui peuvent décourager ou démotiver les futurs trayeurs, ainsi que ceux déjà en activité. Compte tenu des évolutions sociétales, l'activité de traite pourrait donc être le point sensible de la filière laitière, via la complexité que représente à ce jour le renouvellement des travailleurs : il est donc important d'améliorer son attractivité globale (Madelrieux *et al.*, 2018). La traite conventionnelle doit toujours pouvoir représenter une possibilité réaliste et attractive en complément au développement, plutôt logique, de la traite robotisée.

Pour finaliser une approche globale, après avoir travaillé sur le matériel de traite et le trayeur, l'optimisation de la traite ne peut être complète qu'en envisageant un maintien, voire une amélioration dans certaines situations, du BEA (bien-être animal) à la traite. Cela a pour effet de permettre l'installation d'un cercle vertueux. Ainsi, une installation de traite optimisée (opérationnelle, adaptée, confortable, communicante éventuellement) permettra plus facilement des traites de qualité (complètes, rapides et asymptomatiques), pour les trayeurs et les animaux. Ceci leur sera bénéfique (confort de travail et attractivité du métier, turn-over limité du salariat) et garantira la qualité des laits produits, mieux rémunérés alors, facilitant ainsi les investissements évolutifs et les entretiens périodiques, profitables à la pérennité de la démarche. C'est l'un des fondements du principe « One Welfare », bien être de l'éleveur et de ses animaux étant en interaction.



2. Matériels et méthodes

2.1. Repérage et analyse des éléments constituant les freins et motivations autour du poste de trayeur

2.1.1. Objectivation du contexte actuel Animal-Machine-Trayeur

Les données existantes ont été valorisées statistiquement. Elles sont issues de :

- Logimat 4, outil de saisie et de suivi des contrôles effectués sur les installations de traite (Certi'Traite, contrôle de conformité après la mise en route d'une installation de traite, neuve, d'occasion ou rénovée, ou Opti'Traite, contrôle régulier des installations de traite en fonctionnement principalement). Les 33 413 Opti'Traite et 2 056 Certi'Traite de 2020 ont été valorisés par Jean-Louis POULET, sur autorisation spéciale du COFIT ;
- Pointages de différents postes pour des VL nées entre 2000 et 2017, uniquement en première lactation et non tarées au moment du pointage, pour 3 races :
 - Normande (NORM) : hauteur au sacrum, équilibre de la mamelle, écart et orientation des trayons et distance plancher-jarret,
 - Prim'Holstein (PH) : hauteur au sacrum, équilibre de la mamelle, écart des trayons avant, implantation des trayons arrière, longueur des trayons et distance plancher-jarret,
 - Montbéliarde (MB) : hauteur au sacrum, équilibre de la mamelle, écart des trayons avant, implantation des trayons arrière, longueur des trayons et distance plancher-jarret.

Les analyses ont été faites par Maëlle ROCLAND, sur autorisation spéciale de FGE (France génétique élevage, accès données SNIG [système national d'information génétique]). Les évolutions des tables de pointage ont été prises en compte et les notes ont été corrigées en conséquence.

2.1.2. Caractérisation des perceptions de la traite et des attentes des trayeurs

Une enquête a été menée en 2021 par Aude ROUE, stagiaire de l'Institut Agro Rennes-Angers, auprès de trayeurs de profils différents, afin de recueillir leurs ressentis et aspirations autour de la traite conventionnelle. Le recrutement des élevages a été réalisé en partenariat avec la Chambre Régionale de Bretagne. 30 trayeurs ont ainsi été retenus (20 % en Normandie, 77 % en Bretagne et 3 % en Pays de la Loire). Deux types d'enquêtes se sont succédé : via Lime Survey (outil de sondage en ligne) pour recueillir des informations globales sur l'enquêté, son exploitation et son installation de traite, et en présentiel sur le terrain à l'aide de questions ouvertes sur la perception de la traite, de la pénibilité des tâches et des attentes des trayeurs.

2.2. Mesure et analyse des impacts multidimensionnels de système de traite bovins de référence

2.2.1. Caractérisation des espaces de travail des trayeurs

Différentes côtes ont été relevées par Juliette FAZILLEAU, stagiaire de l'ESA d'Angers, pour 726 VL et 7 élevages diversifiés (races Prim'Holstein et Normande et installations de traite en épi 30°, épi 60°, TPA [traite par l'arrière] et rotative extérieure [avec trayeur à l'extérieur], principalement). Les mesures réalisées avec un télémètre laser ou reconstituées par calculs géométriques sont les suivantes :

- installation de traite : HQ (hauteur du quai), de la rive de quai, de l'élément de contention arrière le plus bas.

- trayeur : taille, hauteur et longueur des membres et articulations principales pour l'analyse ergonomique de la traite (épaule, coude, bras),
- animaux : HPM (hauteur du plancher mammaire, pour l'attache du trayon la plus haut), permettant d'obtenir la DAV (distance d'atteinte verticale = HPM + HQ), DAH (distance d'atteinte horizontale, pour le trayon le plus loin, calculé à partir de la mesure de la diagonale au bord de rive).

Des statistiques descriptives ont été réalisées, ainsi que des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et Wilcoxon afin d'établir les liens entre variables.

Les mesures et résultats obtenus ont été confrontés aux recommandations pour une zone de travail optimale :

- hauteur de travail : confortable entre la hauteur du coude et celle de l'épaule ; critique entre l'épaule et 10 cm au-dessus et extrême au-dessus de la hauteur des épaules + 10 cm,
- distance horizontale : confortable si inférieure ou égale à 2/3 de la longueur du bras tendu ; critique entre 2/3 de la longueur et la longueur du bras et extrême au-delà de la longueur du bras.

2.2.2. Réalisation d'études ergonomiques des grands types d'installations de traite

15 fermes ont été suivies sur l'ergonomie du poste de traite, dont les fermes expérimentales de Trévarez (Chambre d'Agriculture de Bretagne) et de La Blanche Maison (Chambres d'Agriculture de Normandie), avec 2 approches complémentaires :

- « classique », avec recours à une ergonome prestataire, Mathilde DEHAME de Perspective ergo ;
- par Motion Capture, approche encore exploratoire sur l'activité de traite, avec recours à une combinaison équipée de capteurs, connectée à un dispositif spécifique d'acquisition TMS Studio (photo 1). Les calculs des notes de pénibilité par articulation se basent sur la méthode RULA (rapid upper limb assessment – évaluation rapide des membres supérieurs). L'analyse s'est portée dans ce cas sur 8 installations de traite bretonnes pour lesquelles les données étaient valorisables (3 épis 30°, 2 TPA et 3 rotos). Elle s'est faite en respectant les latéralités (analyses séparées) pour les coudes et épaules et au niveau de la nuque. Un score de 1 à 8, réparti en 4 niveaux d'intervention, a été attribué pour chaque activité suivie, du plus favorable au moins favorable (**Niveau 1**, scores 1 et 2, posture acceptable ; **Niveau 2**, scores 3 et 4, risque faible et intervention nécessaire si autre problème ; **Niveau 3**, scores 5 et 6, risque élevé et intervention nécessaire ; **Niveau 4**, scores 7 et 8, risque très élevé, intervention immédiate requise). Les tâches analysées ont été les suivantes : traite globale, application de l'hygiène mammaire avant traite, pose des gobelets trayeurs et nettoyage des surfaces.



Photo 1 : Equipement de Motion Capture et exemple de captation pendant la traite (© TMS Studio)



Description de la figure

La photo 1 montre la sous-combinaison et la mallette permettant la Motion Capture, ainsi que des captures d'écrans de l'interface utilisateur TMS Studio. La sous combinaison est noire, ajustée au corps et équipée de capteur de positionnement au niveau de chaque articulation. Ces capteurs communiquent avec le dispositif d'acquisition présenté dans une mallette regroupant un PC d'interface, une plateforme de rechargement des capteurs et une tablette pour la captation de la vidéo qui accompagne la Motion Capture. Sur la capture d'écran, on voit l'avatar généré à partir de la captation en train de réaliser une pose de gobelet trayeur, en parallèle d'une incrustation de la vidéo réalisée avec la tablette.

2.2.3. Mise au point d'indicateurs d'organisation de la traite

Des suivis de traite ont été réalisés sur 9 fermes, diversifiées, avec chronométrage des différentes activités de la traite. Les organisations et cadences de traite ont été analysées.

2.2.4. Repérage et analyse des liens entre qualité de traite et BEA

Des suivis de traite spécifiques ont été conduits sur les fermes expérimentales de Trévarez, avec Prim'Holstein traites en TPA, et de La Blanche Maison, avec Normande traites également en TPA. Différents éléments ont été enregistrés, globalement et sur 2 postes de traite équipés à poste fixe, puis analysés :

- variation du vide, à divers endroits de l'installation de traite et plus particulièrement au niveau des faisceaux trayeurs (V_m – Vide machine, V_{TCL} -Vide au Tuyau Court à Lait, V_{CEM} – Vide à l'Embouchure, VCV – Variation Cyclique du Vide, FI - Fluctuations Irrégulières, pendant la traite complète, les périodes de D_{max} - Débit maximum de lait et de surtraite), grâce à des VaDia (BioControl). Les données ont été analysées avec VaDia Suite version 1.15.0.932 (BioControl) ;
- cinétiques d'émission du lait, grâce à des LactoCorder TT(WMB). Les Données ont été analysées avec LactoPro version 6.0.95 (WMB) ;
- mouvements des VL, notamment des pattes arrière, avec des accéléromètres AX3 (Axivity). Les données ont été analysées avec OmGui version 1.0.0.43 (Open Movement) ;
- comportement des VL et des trayeurs, avec des caméras « action » M80 Pro (ApexCam) ;
- relevés et chronodatages des événements de traite.

3. Résultats et discussion

3.1. Des installations de traite conventionnelle encore majoritaires et diversifiées

En 2020, les installations de traite étaient encore diversifiées au niveau national, avec : des installations en étables pour 11 % (pots trayeurs et surtout lactoduc d'étable pour 9 %) ; des salles de traite en ligne, avec pose par le côté pour 57 % ou par l'arrière pour 20 % ; des salles de traite rotatives pour 2 % ; des robots de traite pour 10 %.

Les lactoducs étaient en grande majorité en ligne basse (79 %) et bouclés (82 %). Les installations de traite comptaient 8 postes de traite (valeur médiane), répartis sur 2 quai, en double équipement pour des troupeaux de 50 VL. La gestion de la fin de traite était largement automatisée, avec 80 % des exploitations équipées de systèmes de dépose automatique des faisceaux trayeurs.

Il existait des différences notables pour certaines régions : plus d'installation de traite en étable en régions Provence Alpes Côte d'Azur, Auvergne Rhône-Alpes et Bourgogne Franche-Comté, plus de rotos en région Ile de France et plus de robots en régions Grand Est, Centre-Val de Loire et Pays de la Loire.

Les nouvelles installations de traite, neuves (78 %), d'occasion (19 %) ou rinnovées (13 %) montraient un recul des épi 30° (11 %) et un très fort développement de la robotisation (68 %).



Les nouvelles installations sont plus grandes, avec 16 postes de traite (valeur médiane), et encore plus automatisées (96 % de dépose automatique).

3.2. Des trayons trop souvent placés haut et loin

La valorisation des données de pointage pour les 3 principales races laitières montre que nos VL françaises sont plutôt grandes, avec des mamelles placées haut, notamment sur les primipares (tableau 1). Elles avaient encore tendance à grandir en 2017, mais les travaux conduits par les OS (Organismes de Sélection) devraient conduire à une limitation de la taille des animaux.

Tableau 1 : Valorisation des pointages moyens 2000 à 2017 des VL Normande, Prim'Holstein et Montbéliarde

Postes de pointage	Normande		Prim'Holstein		Montbéliarde	
	2000	2017	2000	2017	2000	2017
<i>Hauteur sacrum (en cm)</i>	144,4	146,2	146,1	150,3	143,7	145,2
<i>Equilibre antéro-postérieur</i> (notation de 1, déséquilibrée, à 9 renversée)	4,6 (légèrement déséquilibré)	5,0 (équilibré)	5,2 (quasiment équilibré)	5,8 (légèrement renversé)	4,7	5,3 (bascule vers l'avant)
<i>Développement</i> (notation de 1, peu de volume à 9, beaucoup de volume)	/	/	/	/	5,0 (équilibre)	4,4 (plus haute et/ou moins de volume)
<i>Distance plancher-jarret</i> (en cm)	8,5	14,0	/	/	/	/
<i>Distance plancher-jarret</i> (notation de 1 au-dessous, à 9, très au-dessus)	/	/	5,4	6,3 (remonté)	/	/
<i>Orientation trayons avant</i> (notation de 1, très externe, à 9, très interne)	5,1 (quasiment verticaux)	5,7 (légèrement interne)	/	/	5,0	5,6 (légèrement interne)
<i>Ecart trayons avant</i> (en cm)	15,5	14,3	/	/	13,6	14,6
<i>Ecart trayons avant</i> (notation de 1, faible, à 9, fort)	/	/	4,9 (quasi-équilibre)	4,1 (se rapprochant)	/	/
<i>Implantation trayons arrière</i> (notation de 1, trayons collés, à 9 trayons très externes)	/	/	3,2	3,2 (légèrement rapprochés)	/	/
<i>Longueur trayons (en cm)</i>	/	/	3,6	3,6	5,5	5,5

Les mesures réalisées en élevage par Juliette FAZILLEAU ont été faite sur des troupeaux de 107 VL en moyenne, avec des hauteurs de quais de 97 cm (en moyenne, de 87 à 107 cm pour les extrêmes) et des trayeurs plutôt grands, avec une moyenne de 180 cm (170 à 185 cm).

La HPM moyenne était de 64 cm, pour des DAV de 160 cm (129 à 186 cm pour les extrêmes). La HPM dépendait assez logiquement du rang de lactation [1, 2 ou 3+] et de la race des VL (figure 1).

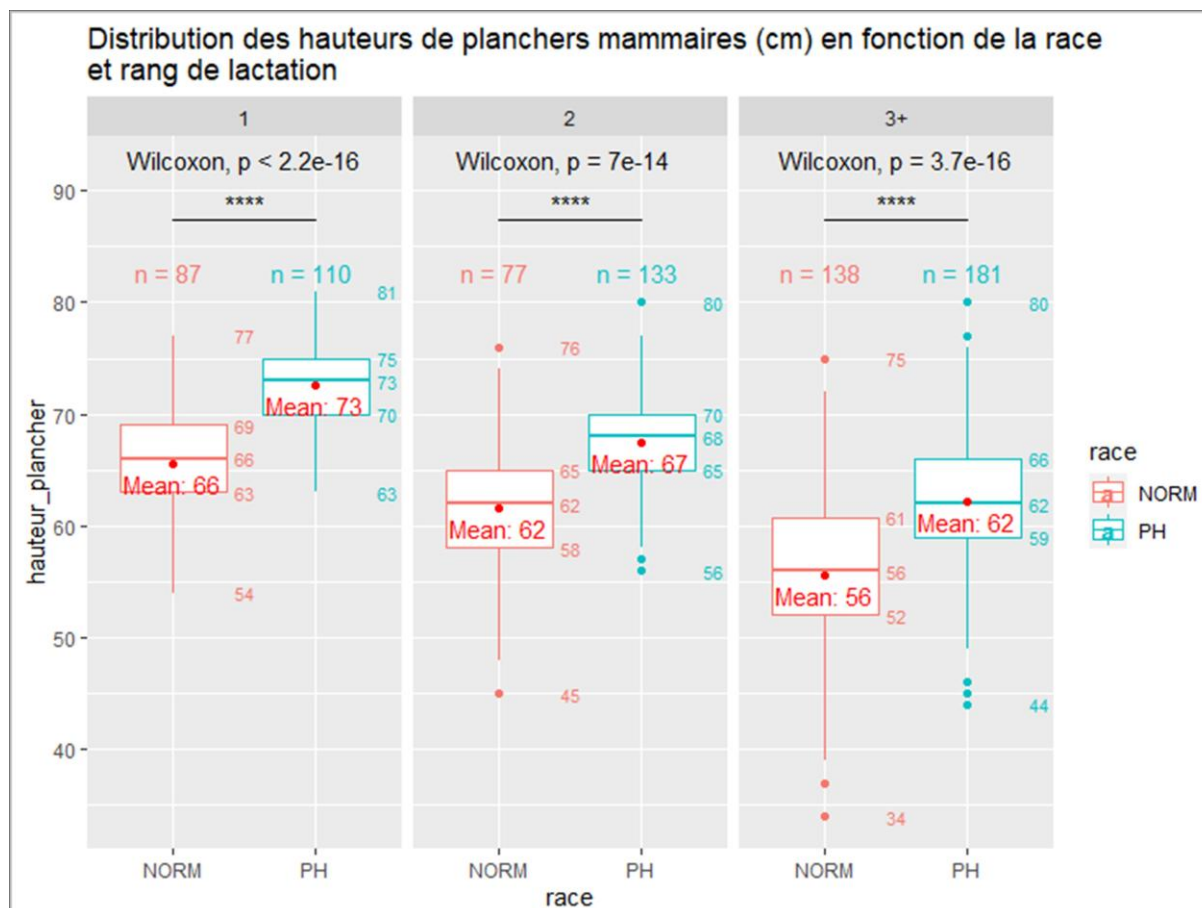


Figure 1 : Distribution des HPM (en cm) en fonction des rangs de lactation et des races

Description de la figure

La figure 1 permet de constater que les HPM sont statistiquement différentes entre Prim'Holstein (PH) et Normande (NDE) et qu'elles diminuent avec l'avancement en âge des vaches. Elle s'appuie sur ce tableau :

Races		NORM	PH	NORM	PH	NORM	PH
Numéro de lactation		1		2		3+	
n		87	110	77	133	138	181
HPM (en cm)	Minimum	54	63	45	56	34	44
	Q1	63	70	58	65	52	59
	Médiane	66	73	62	68	56	62
	Q3	69	75	65	70	61	66
	Maximum	77	81	78	80	75	80
Test Wilcoxon		p<2,2e-16		P=7e-14		P=3,7e-16	

La HPM était également très corrélée à la hauteur au sacrum et à la distance plancher-jarret des pointages étudiés précédemment, mais très peu significativement à la hauteur de l'attache arrière.

La DAH moyenne était de 42 cm. Elle variait en fonction du type d'installation de traite (figure 2).

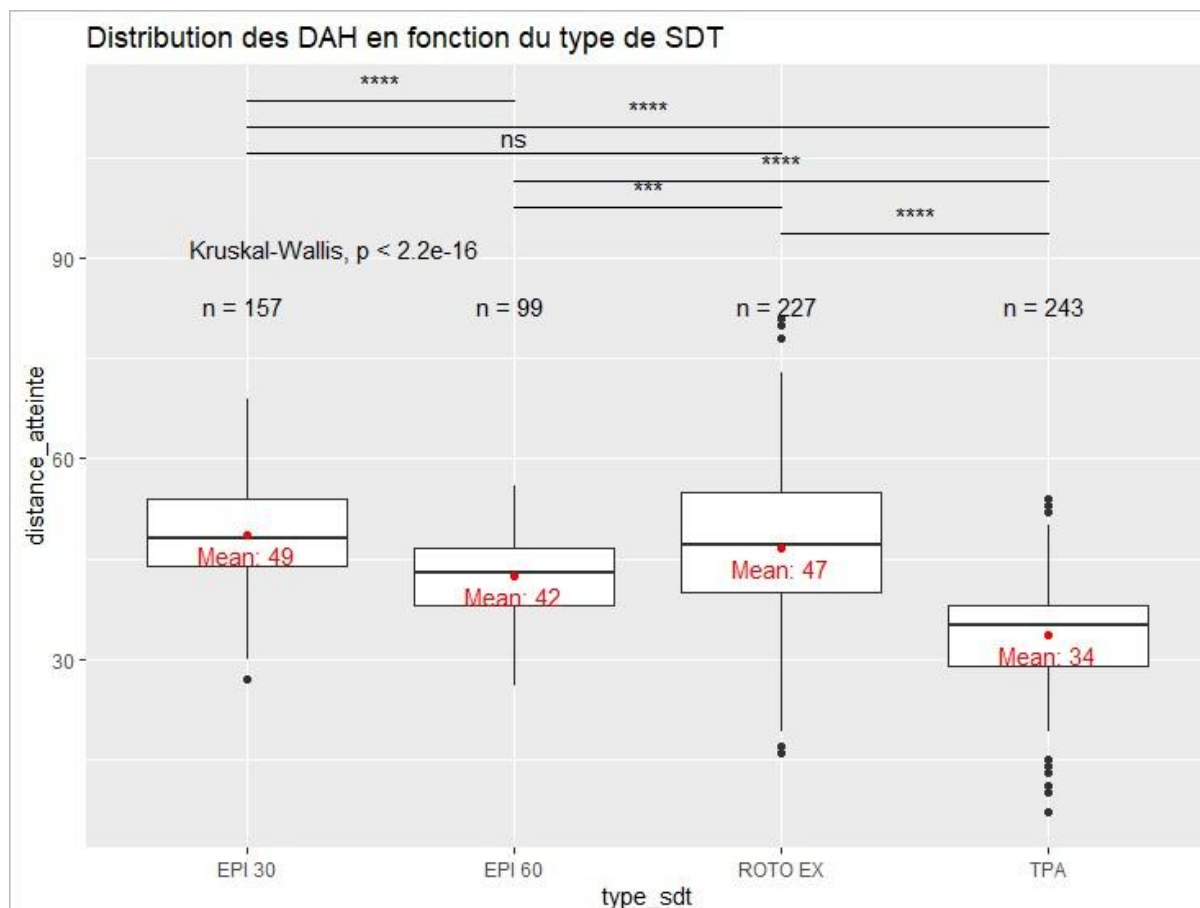


Figure 2 : Distribution des DAH (en cm) en fonction du type d'installation de traite

Description de la figure

La figure 2 permet de constater que les HPM sont différentes entre les différents types d'installations de traite. Elle s'appuie sur ce tableau :

Type d'installation de traite		Epi 30°	Epi 60°	Roto ex	TPA
n		157	99	227	243
DAH (en cm)	Minimum				
	Q1				
	Médiane	49	42	47	34
	Q3				
	Maximum				
Test Kruskal-Wallis, $p < 2,2e-16$		****			

		ns		****	

Les interventions sur les trayons les plus hauts étaient donc logiquement plus souvent pénibles pour les Prim'Holstein que pour les Normande (figure 3) et sur les animaux jeunes (figure 4).

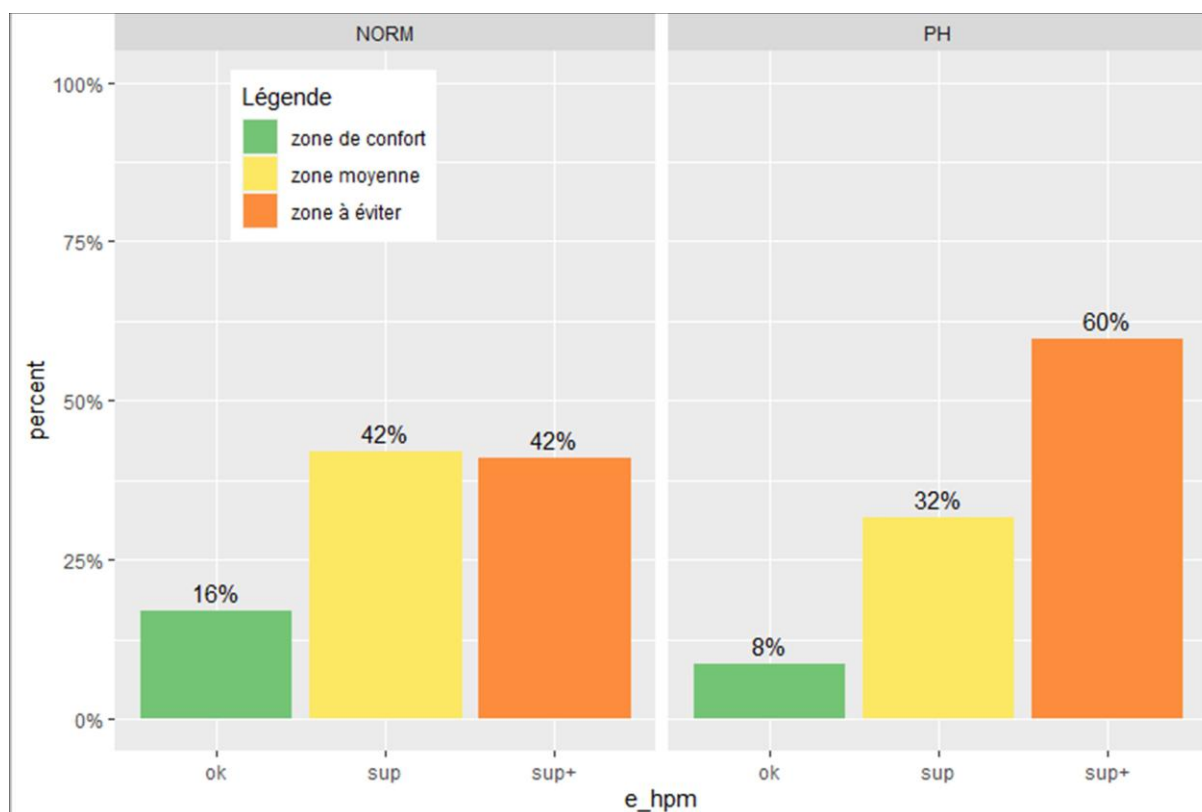


Figure 3 : Répartition des hauteurs de travail constatées en fonction de leur éloignement à la zone idéale en fonction de la race

Description de la figure

La figure 3 permet de constater que les hauteurs de travail, liées à la HPM, sont majoritairement moyennes et même à éviter, et ce d'autant plus pour les PH. Elle s'appuie sur ce tableau :

Races		NORM	PH
Fréquence (en % des situations)	Zone de confort	16	8
	Zone moyenne	42	32
	Zone à éviter	42	60

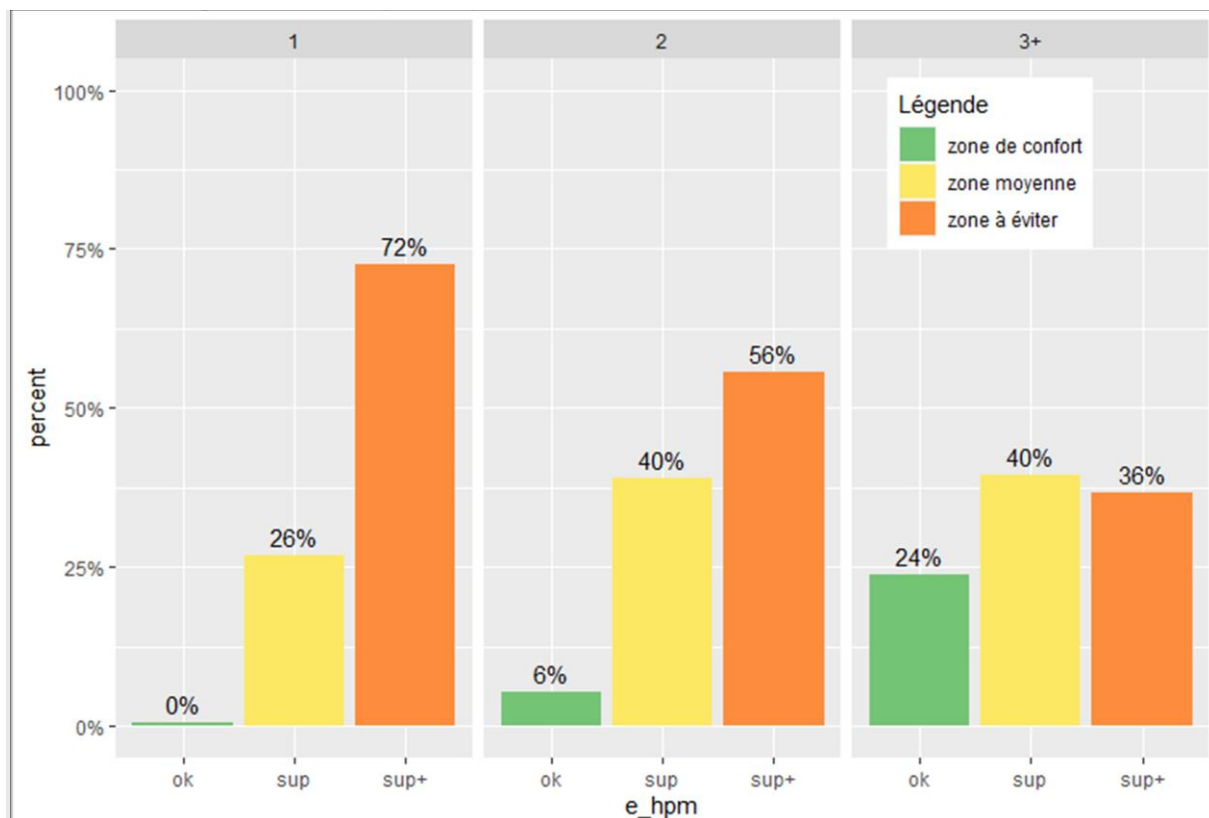


Figure 4 : Répartition des hauteurs de travail constatées en fonction de leur éloignement à la zone idéale en fonction du rang de lactation

Description de la figure

La figure 4 permet de constater que les hauteurs de travail, liées à la HPM, sont majoritairement moyennes et même à éviter, mais ont tendance à s'améliorer avec l'avancement en âge des vaches. Elle s'appuie sur ce tableau :

Rangs de lactation			1	2	3+
Fréquence (en % des situations)		Zone de confort	0	6	24
		Zone moyenne	26	40	40
		Zone à éviter	72	56	36

Les interventions sur les trayons les plus éloignés étaient plus souvent pénibles pour les épis 30° que pour les TPA (figure 5).

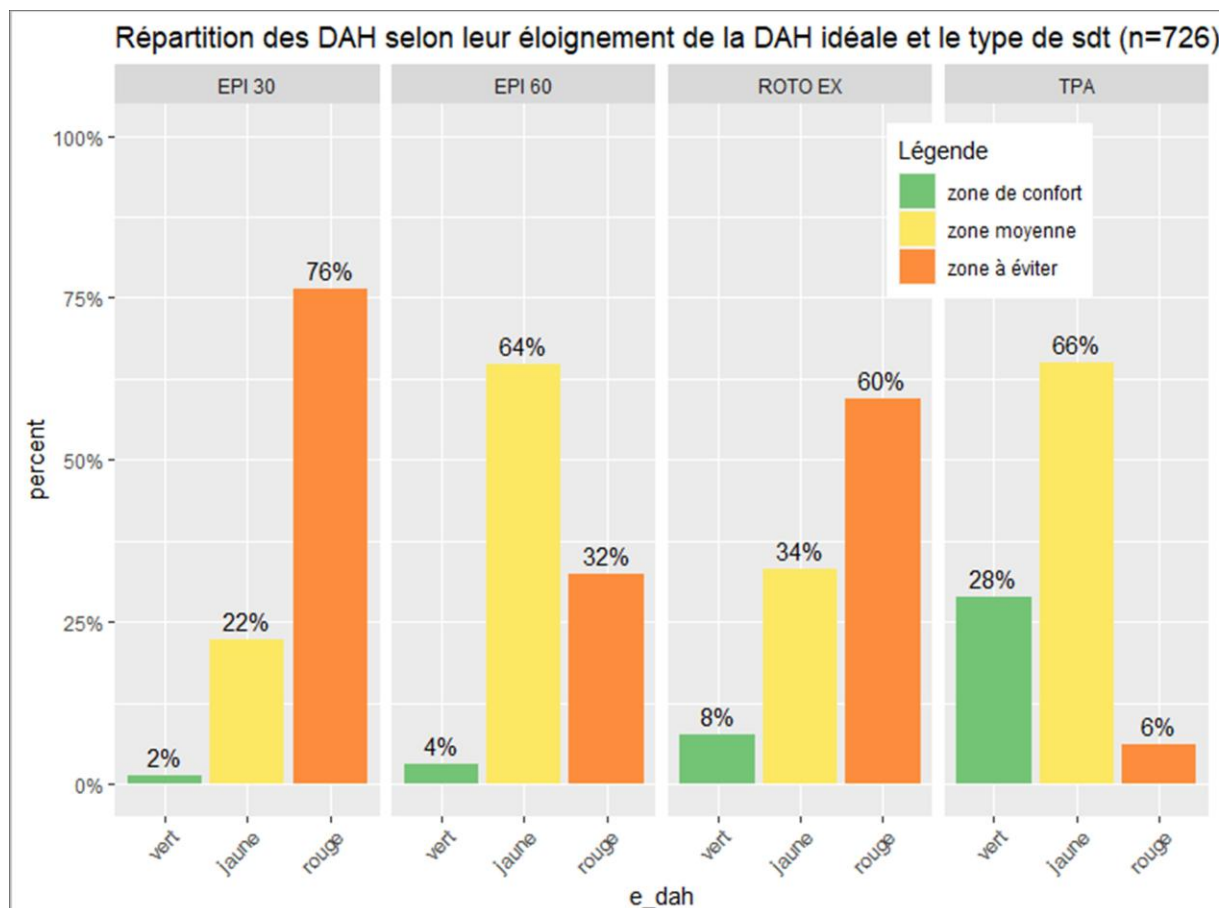


Figure 5 : Répartition des hauteurs de travail constatées en fonction de leur éloignement à la zone idéale en fonction du type d'installation de traite

Description de la figure

La figure 5 permet de constater que les hauteurs de travail, liées à la HPM, sont majoritairement moyennes et même à éviter, mais ont tendance à s'améliorer avec l'avancement en âge des vaches. Elle s'appuie sur ce tableau :

Type d'installation de traite		Epi 30°	Epi 50°	Roto ex	TPA
Fréquence (en % des situations)	Zone de confort	2	4	8	28
	Zone moyenne	22	40	34	66
	Zone à éviter	76	56	60	6

3.3. Des trayeurs satisfaits, mais conscients de la pénibilité de la tâche

Les trayeurs enquêtés étaient des hommes à 60 %, d'âges assez régulièrement répartis (13 % de 18-25 ans, 17 % de 26-35 ans, 17 % de 36-45 ans, 26 % de 46-55 ans et 27 % de 56-65 ans), majoritairement chefs d'exploitation, associés ou salariés (37, 27 et 27 % respectivement). 67 % des salariés étaient employés sur des fermes expérimentales (Trévarex et La Blanche Maison). 80 % des enquêtés étaient en couple et 73 % avaient des enfants.

En moyenne, les exploitations avaient des surfaces de 132 ha (± 61 ha), avec 3,2 UMO (unité de main d'œuvre), dont 2,2 UMO pour l'atelier lait. 67 % des exploitations regroupaient un ou plusieurs autres ateliers, 12 % étaient en agriculture biologique (dont une en vente directe) et 6 % produisaient en AOP (appellation d'origine protégée).

Les cheptels laitiers étaient à 76 % en Prim'Holstein et 24 % en Normande. L'effectif moyen était de 93 VL (± 30). La production annuelle était en moyenne à 735 000 L (± 300 000 L), pour 7 900 L/VL (± 1



600). Les troupeaux étaient donc plus grands que la moyenne nationale, avec des niveaux de production cependant comparables.

Les installations de traite étaient des épis 30° (19 %), des épis 50-60° (33 %), des TPA (33 %), des rotos extérieur (5 %) et des rotos intérieurs (10 %). Les épis 50-60° et TPA étaient donc sur-représentés par rapport au parc français, au détriment des épis 30°. Il y avait seulement 5 % de simple équipement, 86 % de lactoduc en ligne basse, 100 % de dépose automatique et 15 % de lactoduc secondaire. La hauteur moyenne des quais était de 94 cm ($\pm 9,5$).

Le nombre moyen de VL par trayeur était de 67 (± 16). 15 % des trayeurs ne travaient pas le dimanche soir. Les pratiques d'hygiène de traite étaient diversifiées : 52 % de pré-trempe ou pré-moussage, 38 % de lavettes individuelles, 90 % de post trempe, avec des combinaisons variées. 14 % des trayeurs tiraient les premiers jets systématiquement et 17 % désinfectaient systématiquement les manchons trayeurs entre chaque VL.

La traite est une tâche globalement appréciée (69 % des enquêtés la jugent agréable et même 10 % très agréable). Ils évoquaient pour justifier cette appréciation le contact aux animaux, la possibilité de surveiller les animaux et leurs performances, de voir les résultats du travail zootechnique et même un moment calme.

Ils étaient conscients néanmoins de la pénibilité sous-jacente. 41 % estimaient que la phase de nettoyage des surfaces est trop longue, tout comme la préparation des trayons pour 14 %. La pénibilité semblait ressortir pour les durées de traite supérieures à 1h30 (sans nettoyage). Les éléments de pénibilité évoqués tournaient principalement autour de la gestion des traites atypiques (longues, au pot, pour les veaux), de la répétitivité des gestes, des cadences, de l'ergonomie (terme utilisé par les enquêtés) et des bouses pendant la traite.

Les actions les plus pénibles étaient en relation avec la circulation des animaux (entrée et sortie de la salle de traite). 45 % des trayeurs estimaient leurs aires d'attente inappropriées, avec notamment des entrées des VL plus complexes lorsque qu'elle n'est pas alignée avec la salle de traite. 56 % déclaraient sortir régulièrement de la fosse de traite, dont 43 % pour pousser les animaux vers les quais (56 % pour nourrir les veaux). 35 % étaient équipés de « moyens » spécifiques (dont 57 % de barrières poussantes et 29 % de chiens de troupeaux). La sortie des animaux était également considérée comme plus compliquée en cas de couloirs de retour (contrairement à des sorties directes). Les entrées et sorties des VL étaient évoquées comme plus compliquées en cas de présence d'un pont entre les 2 quais et la communication pour le trayeur vers l'aire d'attente pénible si elle se faisait grâce à un escalier (90 % des cas).

Le nettoyage des surfaces était considéré plus pénible en cas d'aire d'attente spécifique ou séparée et pour les installations de types épi 30° ou 50-60°. 100 % des enquêtés utilisaient pour cela un surpresseur.

Enfin, 50 % des enquêtés pensaient que la robotisation prendrait le pas sur la traite conventionnelle, 40 % souhaitaient l'automatisation de certaines tâches de la traite. 77 % étaient prêts à passer à la robotisation de la traite. 30 % des trayeurs imaginaient une augmentation de la taille de leur cheptel et de leur installation de traite et 30 % redoutaient un surcroît du manque de main d'œuvre à venir.

3.4. Des constats ergonomiques complémentaires

À la suite de l'analyse des acquisitions par Motion Capture (tableau 2), il ressort les tendances suivantes :

- au global, toutes tâches et articulations confondues, les installations en épi 30° seraient plus favorables au confort du trayeur, avec moins de contraintes articulaires, inversement aux TPA ;



- il n'y avait pas d'application d'hygiène avant traite en rotos, d'où les résultats extrêmement bons, tant au niveau des coudes que des épaules. A l'inverse, les TPA offraient les situations les moins favorables. La note donnée à cette tâche influence fortement le résultat global ;
- pour la pose des gobelets, la tendance est la même, avec des bons résultats pour les rotos et avec des soucis pour les épis 30° au niveau des épaules, quasiment de la même ampleur que pour les TPA ;
- pour le nettoyage des surfaces, les tendances s'inversent, avec une pénibilité plus importante pour les rotos. La nuque est également plus sollicitée pour ce type d'installation de traite.

Il est à noter que les installations de traite rotatives et TPA n'étaient pas équipées de planchers mobiles de fond de fosse. La taille et le positionnement des VL peuvent influencer largement les résultats.

Tableau 2 : Pourcentages moyens pondérés de temps passés par tâches, types d'installations de traite (MAT), côtés, articulations et niveaux de confort

Tâches	MAT	Côtés	Droit				Gauche				/	
		Articulations	Coude		Epaule		Coude		Epaule		Nuque	
		Niveaux de confort	1-2	3-4	1-2	3-4	1-2	3-4	1-2	3-4	1-2	3-4
Hygiène	Epi 30°		90	8	41	59	63	37	92	8	/	
	TPA		75	25	31	69	75	25	73	16		
	Roto		100	0	82	18	100	0	98	2		
Pose	Epi 30°		93	7	31	69	91	9	63	38		
	TPA		72	28	28	72	82	19	75	25		
	Roto		100	0	79	20	100	0	89	10		
Nettoyage des surfaces	Epi 30°		100	0	87	13	100	0	80	20	52	48
	TPA		88	12	21	79	84	16	81	19	64	36
	Roto		72	28	21	80	84	16	94	6	74	25
Global	MAT	Niveaux	1-2	3-4		1-2		3-4		/		
	Epi 30°		66	33		69		31				
	TPA		25	75		37		64				
	Roto		31	69		57		43				

3.5. Des cadences de traite variables

Les trayeurs suivis passaient en moyenne :

- 30 % du temps à faire circuler les VL ;
- 14 % du temps à poser les gobelets trayeurs ;
- 26 % du temps à assurer l'hygiène, pré- et post-traite ;
- 4 % du temps à gérer les pots trayeurs ;
- 24 % du temps à nettoyer les surfaces et les équipements de traite.

Les cadences de traite (nettoyage des surfaces compris) étaient très variables (35,6 à 88,3 VL/h), avec des impacts notables du nombre de bandes de traite, et donc du nombre de circulations des VL, et des temps dédiés au nettoyage des surfaces et à l'hygiène de traite.



Tableau 3 : Relevés des caractéristiques de traite des 9 exploitations suivies, classement en fonction des cadences de traite (nettoyage des surfaces compris)

Numéro d'élevage	Nombre postes de traite	Nombre VL	VL/poste	Cadence (VL/h, nettoyage compris)	Bandes de VL	Particularités
9		67	6,7	35,6	13,4	
4	10	50	5,0	38,0	10,0	/
1				47,6		
6	16	54	3,4	54,0	6,8	
5	20	56	2,8	67,2	5,6	Simple équipement
2	26	136	5,2	71,0	1,0	Roto et barrière poussante
7	14	90	6,4	72,0	12,9	Aire d'attente non lavée le soir
8	20	86	4,3	83,2	8,6	/
3	34	156	4,6	88,3	1,0	Roto et barrière poussante

3.6. Un lien entre qualité de traite et BEA

Les installations de traite étaient finalement assez similaires sur les 2 sites expérimentaux : TPA, circuits de lait en ligne basse et même niveau d'automatisation, avec systèmes de dépose automatique des faisceaux trayeurs et compteurs à lait volumétriques. Elles étaient toutes les deux suivies et entretenues régulièrement (Opti'Traite® à jour). Les différences se font principalement sur l'âge du matériel, bien plus récent à LBM (La Blanche Maison), et sur le type de faisceaux trayeurs utilisés, avec des IQ (GEA Farm Technologies) non conventionnels (avec valves automatiques, évitant les entrées d'air à la pose des gobelets trayeurs) à TVZ (Trévarez).

Au global, en analysant les données individuelles des animaux, sans significativité statistique compte-tenu de la variabilité des données, la production laitière était un peu plus importante à TVZ, avec des débits de lait, assez logiquement pour des Prim'Holsteins, plus élevés, et également plus variables, pour finalement des durées de traite quasi similaires. La période « efficace » de traite qu'est la phase plateau était en revanche souvent plus longue à LBM, avec vraisemblablement une bonne action de l'ocytocine, permettant une éjection plus efficace du lait, malgré des sphincters s'ouvrant apparemment moins grands compte tenu des débits évoqués précédemment. Cela se confirmait avec des phases de croissance du débit en tendance plus courtes et une absence de bimodalité. Le lait alvéolaire prenait efficacement la suite du lait citernal en termes d'éjection.

Les V_{TCL} (Vide au Tuyau Court à Lait) étaient plus variables et à des niveaux souvent plus bas à TVZ, compte tenu logiquement des caractéristiques de production laitières. Les pertes de charges liées à la circulation des animaux expliquaient en effet ces niveaux de vide sous trayons plus bas. L'analyse fine des cinétiques individuelles de fluctuation du V_{TCL} (pour chaque VL) montrait néanmoins des variations assez importantes et sur des cycles plus longs qu'à l'accoutumée (hors liaison habituelle à la fréquence et aux rapports de pulsation). Ces évolutions sont vraisemblablement liées aux caractéristiques de fonctionnement des compteurs à lait GM MR2000 (BouMatic), assez anciens maintenant, qui stockaient temporairement des quantités fixes de lait, évacuées par la suite vers le lactoduc. Ce changement de volume engendrait une variation des pertes de charge.

Enfin, il a été relevé plus d'incidents de traite (repérés par les FI, Fluctuations Irrégulières) sur TVZ, avec également un peu plus de mouvements de pattes, notamment sur les mouvements brusques ^{et/ou} dirigés, avec a priori une volonté des VL de mettre fin à la traite, a minima temporairement, moins « supportable » et de moins bonne qualité.

Il n'est pas évident cependant de bien formaliser les liens de causes à effets : le comportement des vaches, et notamment les coups de pattes dirigés, est-il la résultante de conditions de traite dégradées



ou l'origine ? En fait, tout peut dépendre du contexte. La présence de mouches peut par exemple expliquer des réactions des animaux engendrant des mouvements des faisceaux trayeurs et des glissements ou des entrées d'air à l'embouchure du manchon trayeur, en cas d'interface de moins bonne qualité. Sur l'autre approche, des stimulations insuffisantes peuvent se traduire par de moins bonnes émissions d'ocytocine et donc d'éjection du lait, pour des traites qui seront, quasiment quels que soient les réglages, plus agressives pour les trayons.

Tableau 4 : Valorisation des mesures effectuées lors des suivis de traite à Trévarez et La Blanche Maison

Indicateurs		Trévarez (TVZ)			La Blanche Maison (LBM)		
		Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.
Quantités de lait (en kg)		9,16	6,79	15,04	8,74	6,67	14,04
Débits de lait (en kg/min.)		2,15	0,53	4,1	1,79	1,74	2,44
Durées	Globale (en mm:ss)	05:00	02:28	10:02	04:56	03:20	06:30
	Plateau (en min.)	0,92	0,05	2,1	1,44	0,42	1,59
	Surtraite (en mm:ss)	01:29	00:00	08:12	01:37	00:29	02:57
Bimodalités (en nbre)		0,38	0	1	0,75	0	1
Variations de vide (en kPa)	V _m	42	/	/	42	/	/
	V _{TCL} Dmax	34,8	21,5	39,2	36,2	34,1	37,8
	V _{TCL} surtraite	37,1	20,5	40,6	38,9	38	39,7
	V _{CEM}	14,5	1,8	28	16,6	5,5	32,7
	V _{CV+}	2,5	0,1	3,9	2,3	1	2,9
	V _{CV-}	3,3	0,2	5,9	3,2	2,4	4
FI (en nbre)		6,3	0	30	1	0	1,6
Mouvements pattes (en nbre)	Global	19,5	4	34	18	8	41
	Modérés	13	2	26	13,5	8	20
	Brusques	6,5	2	10	4,5	0	21

4. Conclusion

La traite, plutôt appréciée des trayeurs, reste impactante sur une exploitation laitière, notamment en termes de confort ou inversement de pénibilité du travail. L'ergonomie du poste de travail est alors fondamentale, et tout n'est pas alors que mécanique. Le gabarit et la position des VL sur les quais peuvent peser lourdement sur le positionnement de la zone d'intervention qu'est la mamelle pour le trayeur, comme le relevait également Cockburn *et al.*, 2015. Les installations de traite ne se sont malheureusement pas toujours adaptées aux évolutions, des animaux mais aussi des trayeurs. Les nouvelles approches ergonomiques semblent confirmer les observations plus empiriques en ce sens. La charge mentale, liée à l'organisation du chantier, à ses particularités et à la diversité des tâches à accomplir et à adapter aux animaux, peut également peser lourdement sur le ressenti des trayeurs. Il ne faut pas oublier que la traite est optimisée si l'animal est coopératif, ce qui s'obtient principalement par l'adéquation des actions du trayeur – réalisées dans de bonnes conditions pour lui-même – avec le confort de ses vaches. Pour améliorer réellement et durablement les conditions de traite, il est important d'avoir une approche globale, multidimensionnelle, pour avoir des améliorations complémentaires et non un ensemble disparate d'actions parfois contradictoires. Il peut donc être intéressant, si ce n'est important, que les trayeurs soient accompagnés en ce sens par des intervenants extérieurs à l'élevage. Il est également nécessaire, en amont d'un projet de rénovation, de renouvellement ou de création d'installation de traite, de prendre le temps de penser à ses besoins et à la réalisation de l'activité future, pour bien concevoir la salle de traite qui sera utilisée durant plusieurs années.



Éthique

Les auteurs/trices 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 déclarent avoir utilisé l'outil ChatGPT (OpenAI) pour assurer la concision du résumé et sa traduction en abstract. Les résultats ont été intégralement vérifiés et validés par les auteurs/trices.

ORCIDs des auteurs

Anne-Lise JACQUOT : <https://orcid.org/0000-0002-1652-1527> ;

Jean-Louis POULET : <https://orcid.org/0000-0002-2729-1421>

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont contribué à une ou plusieurs tâches du projet, qui était supervisé par JLP.

JLP : première version du manuscrit, tous : compléments et améliorations.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir pas 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

Un grand merci aux éleveurs ayant contribué à ces travaux à tous les partenaires et à tous les contributeurs à cette étude.

Merci également à notre collègue Maëlle ROCLAND, généticienne à Idele, pour sa valorisation éclairée des pointages des vaches laitières françaises.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été réalisée avec le financement du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Références bibliographiques

COCKBURN, M., SAVARY, P., SCHICK, M., 2015. Amélioration de la posture de travail lors de la pose du faisceau trayeur. Technique Agroscope Transfer, n°102 / 2015. https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/publikationen/suchen/agroscope-science/jcr_content/par/externalcontent.bitexternalcontent.exturl.html/aHR0cHM6Ly9pcmEuYWdyb3Njb3BILmNoL2ZyLUNIL3B1YmxpY2/F0aW9uLzZM1NDE0.html

HOSTIOU, N., ALLAIN, C., CHAUVAT, S., TURLOT, A., PINEAU, C., & FAGON, J. (2014). L'élevage de précision : quelles conséquences pour le travail des éleveurs ?. *INRAE Productions Animales*, 27(2), 113–122. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.2.3059>



IDELE, CNE, 2025. Bovins 2025, productions lait et viande. Les chiffres clés du GEB, 2025. https://idele.fr/en/?eID=cmis_download&olD=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F63bc1ac2-ae28-4a6c-93c5-1802a65a4156&cHash=1e67b043cdcb4685051d1459c3848fa8

MADELRIEUX, S., BEGUIN, E., PERROT, C., 2018. Cessation de production laitière dans les grandes structures : dynamiques en jeu. Renc. Rech. Ruminants, 2018, 24. https://journées3r.fr/wp-content/uploads/2019/06/texte_4_economie_s-madelrieux-2-f7f.pdf

TIRARD, S., ABGRALL, N., BODIN, T., FOLLET, D., 2020. Travail d'astreinte en hiver et au printemps en élevage laitier, Collection Références Inosys, février 2020. https://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/RMT_Travail/Travail_d_astreinte_en_elevage_laitier.pdf

Pour citer l'article : Jean-Louis POULET, Sébastien GUIOCHEAU, Florian DASSE & Anne-Lise JACQUOT, 2026 - Assurer la viabilité de la traite conventionnelle (non robotisée) par une approche multidimensionnelle. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art05>



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.



Produire de la viande bovine bio avec les veaux mâles du troupeau allaitant pour approvisionner la restauration collective locale : les modèles Bouvibio

Marion KENTZEL¹, Isabelle LEGRAND¹, Hélène CHAMBAUT¹

avec la collaboration de Antoine BUTEAU (Arvalis), Cécile BORD (Vétagro'Sup), Yannick ARDONCEAU-CABESTAING (Idele), Emmanuel DESILLES (CA 03), Alexis GANGNERON (CA 81), Anne GLANDIERES (Chambre Régionale Occitanie), Antoine MANTEAUX (EPLEFPA Naves), Caroline MONNIOT (Idele), Faustine NOËL (Idele), Bernard SEPCHAT (INRAE Herbipole), Paul TRIBOT-LASPIERE (Idele), Myriam VALLAS (Pôle Bio Massif Central)

¹ IDELE, Institut de l'Élevage, 75012 Paris

Correspondance : marion.kentzel@idele.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art06>

Résumé

58 % des veaux mâles nés dans un cheptel allaitant conduit en Agriculture Biologique (AB) sont vendus maigres (broutards) à un élevage conventionnel et sont perdus pour la filière de la viande bio. Différents itinéraires AB ont été expérimentés, en particulier la production des veaux lourds de 8 à 14 mois (nommés Bouvibio). 12 modèles, dont 6 Bouvibio, ont été décrits et évalués selon la multi performance technique, économique, environnementale et sociale. Les carcasses des animaux produits sont maigres, de couleur rouge clair, pèsent moins de 300 kg. Les viandes de ces animaux (steak haché, collier en sauté et faux-filet) ont été qualifiées de tendres et fondantes par les consommateurs, qui sont par ailleurs sensibles à l'origine locale de la viande, au bien-être animal et à la l'éthique de consommation. A l'échelle territoriale, ces itinéraires permettent d'ancrer des pratiques AB à l'impact positif sur l'environnement et le climat (- 35 % des émissions de GES).

Mots-clés : agriculture biologique, agrobiologie, durabilité de l'élevage, technique d'élevage, efficience alimentaire, diagnostic environnemental, qualité sensorielle, souveraineté alimentaire

Abstract: Relocating organic beef production from suckler herds: models and benefits for local areas

58 % of male cattle born in a suckler herd managed according to organic farming standards (AB) are sold as conventional weanlings and are lost to organic farming. Various organic zootechnical models have been tested, in particular the production of heavy calves aged 8 to 14 months (known as Bouvibio). Twelve models have been described and evaluated according to technical, economic, environmental, and social performance. The carcasses of the animals produced are lean, light red in color, and weigh less than 300 kg. The meat from these animals (ground beef, sautéed neck, and ribeye) has been described as tender and melt-in-the-mouth by consumers, who are also sensitive to the local origin of the meat, animal welfare, and ethical consumption. At the regional level, these itineraries help to establish organic farming practices that have a positive impact on the environment and climate (-35 % GHG emissions).

Keywords: organic agriculture, agrobiological, sustainability indicator, agroecological farming system, feed efficiency, environmental assessment, sensory quality, food sovereignty



1. Introduction

En France, l'élevage bovin allaitant en Agriculture Biologique (AB) produit une viande bio qui peine à trouver sa place commerciale. Elle est concurrencée par les produits labels et autres signes officiels de qualité en boucherie traditionnelle et GMS, et par la viande issue du troupeau laitier AB sur les segments de la Restauration Collective (RC) et de la transformation. Ainsi, la majorité des bovins mâles nés dans un élevage AB échappe aux circuits de valorisation de viande bio faute de débouchés attractifs et de modèles performants de production de viande finie respectant le cahier des charges. Les mâles sont vendus maigres (broutards), exportés vifs hors de leur région de naissance pour se faire engraisser en conventionnel. D'après les bases nationales¹, 2/3 des éleveurs allaitants AB vendent plus de 90 % de leurs mâles en vifs et renoncent à les valoriser en viande bio. Les mâles qui restent sont valorisés pour moitié en viande de veau (Monniot *et al.*, 2025) avec une part importante de vente directe (34 %).

Il existe pourtant des opportunités pour développer une production territoriale de viande bovine bio à partir de l'élevage présent dans les bassins allaitants. En effet, pour répondre aux attentes sociétales, les pouvoirs publics déploient des dispositifs visant à soutenir les productions durables et locales qui peuvent accompagner le développement de solutions alternatives pour améliorer notre système alimentaire. Le plan de filière viande bovine des Etats Généraux de l'ALIMENTATION (EGALIM) ambitionne de doubler en 5 ans la production de viande bovine bio. Ainsi les lois EGALIM et Climat & Résilience fixent des objectifs pour atteindre 20 % de produits alimentaires issus de l'AB dans les assiettes de la RC et particulièrement les cantines scolaires ou d'état.

Face à cette opportunité, l'objectif général du projet PROVERBIAL (2021-2024) a été d'analyser s'il était possible de réorienter les broutards AB exportés vers la production d'animaux bio finis jeunes vendus pour la restauration collective (RC) locale. Pour cela le projet s'est posé les questions suivantes :

- Quels sont aujourd'hui les devenir des animaux issus des troupeaux allaitants AB ?
- Quels sont les itinéraires techniques AB alternatifs à la production de broutards exportés ? Sont-ils durables à l'échelle des exploitations et économiquement tenables pour les filières ?
- Comment les viandes bovines bio issues de ces modèles alternatifs sont-elles appréciées et perçues par les consommateurs et les professionnels de la RC ?
- Quels seraient les impacts environnementaux à l'échelle régionale d'une valorisation locale en viande de tous les mâles AB pour répondre à la demande de la RC ?

2. Matériel et méthodes

Pour répondre à ces questions, le projet a combiné une analyse de données issues de bases nationales, le suivi des performances zootechniques et environnementales d'élevages expérimentaux et commerciaux mettant en œuvre les modèles alternatifs aux broutards à l'export, des tests de dégustation associés à des enquêtes auprès des consommateurs et des intermédiaires et enfin des simulations à l'échelle régionale.

2.1. Etat des lieux de la production de viande bovine AB en France

Les bases de données SPIE-BDNI (identification et déclaration de mouvement de tous les bovins), Normabev (données d'abattage) et Agence Bio (suivis des fermes certifiées AB et en conversion) ont été utilisées et jointées pour pouvoir identifier les cheptels certifiés AB et en conversion, ainsi que les mouvements de bovins liés à ces exploitations. Environ 5 % des exploitations AB n'ont pas été

¹ Source BDNI-Normabev-Agence Bio – Traitement IDELE



retrouvées. Les analyses des données 2006 à 2021 ont porté sur i) localisation des vaches ii) la production des différentes catégories de bovins issues des élevages AB, iii) devenir des mâles nés dans un cheptel AB à destination d'autres élevages (export ou élevages français conventionnels) ou d'un abattoir français pour approfondir la question de la finition des mâles issus des cheptels allaitants AB. Les analyses ont porté sur les données à l'échelle nationale et plus précisément sur les 2 territoires pilotes retenus dans le projet (régions AURA et Occitanie)

2.2. Acquisition de références expérimentales

Des itinéraires alternatifs de production de bovins mâles destinés à la boucherie et respectant le cahier des charges AB ont été testés et/ou observés dans douze élevages supports : 3 stations expérimentales (Ferme Expérimentale des Bordes, Herbipole Laqueuille INRAe, Ferme de Thorigné d'Anjou), une exploitation de lycée agricole (Tulle Naves) et 8 fermes commerciales qui sont toutes en Agriculture Biologique et finissent tout ou partie de leurs veaux mâles en viande. Les fermes ont été choisies géographiquement en complément des stations, pour illustrer les 4 principaux contextes d'élevage allaitant : les zones de Montagne et Parcours (MP), Herbe de Piémonts et Moyenne Montagne (HPMM), Herbe et Fourrage (HF) et Polyculture Zones Séchantes (PZS). La diversité des races est également représentée : races Conformées (C), Croisées (CR) et Rustiques (R).

Selon la durée du cycle de production, nous distinguons 3 catégories commerciales : le veau abattu avant 8 mois (dit « rosé » ou « lourd »), le jeune bovin âgé de 8 à 14 mois que nous appelons Bouvibio et le bœuf précoce abattu autour de 2 ans.

2.2.1 Suivis des performances techniques.

Les suivis techniques de ces élevages ont été répétés sur 2 campagnes (entre 2021 et 2023) et ont concerné 178 animaux au total dont 58 en station. Les animaux suivis ont été pesés régulièrement, avec 3 pesées minimum. Les ingestions des animaux ont été collectées par lot de la naissance jusqu'à leur abattage via l'enregistrement de l'alimentation du couple mère-veau avant sevrage puis du jeune bovin seul durant la période de finition. La production innovante de 2 catégories commerciales mâles a été expérimentée en station et observée en fermes : les Bouvibio de 8 à 14 mois et les bœufs précoces de moins de 27 mois. Les bilans alimentaires ont été calculés via les analyses des fourrages et concentrés utilisés. Les surfaces pâturées ont été enregistrées et celles utilisées pour la production de fourrages pour le couple mère-veau ont été calculées.

2.2.2 Caractérisation des qualités carcasses et viande

Au total, les caractéristiques de 72 carcasses ont été collectées par les partenaires de terrain, dont 48 sur les nouveaux produits peu connus que représentent la catégorie des bovins mâles allaitants conduits en AB de 8 à 14 mois (Bouvibio). Pour chaque animal suivi, la collecte des données porte sur les données d'abattage : poids carcasse et calcul du rendement d'abattage, note de conformation (grille EUROP) et d'état d'engraissement (de 1 à 5). Le positionnement de nos données d'abattage a été comparé à 33 493 données d'abattoirs (données NORMABEV-Agence Bio) recueillies sur des bovins mâles de races allaitante et croisé de 8 à 14 mois abattus Bio entre 2012 et 2022. Lorsque c'était possible, des mesures complémentaires de caractérisation des viandes ont été réalisées pour noter la couleur, le marbré, le persillé et la taille du faux-filet en utilisant les grilles d'évaluation qualitative des carcasses et des viandes d'IDELE.

2.2.3. Indicateurs de multi performance

Pour caractériser la production de Bouvibio, des indicateurs de multi performance ont été sélectionnés. Ils sont issus des projets EFFIVIANDE (Dimon *et al.*, 2023) ERADAL (Rouillé B *et al.*, 2023) et des travaux sur la durabilité en élevage des équipes INOSYS-Réseau d'élevage (Belz, J. *et al.*, 2024). Ils ont été calculés à partir des données économiques des fermes (exercice 2021), du diagnostic



CAP2ER® de chaque élevage (campagne 2023) et des données zootechniques des itinéraires observés et décrits (campagnes 2021, 2022 et 2023).

Au total, 12 indicateurs de durabilité économique ont été calculés dans 7 fermes commerciales suivies. 11 diagnostics CAP2ER ont été réalisés dans les fermes et stations où ont été calculés : 28 indicateurs Environnementaux (3 indicateurs énergie, 8 indicateurs GES, émissions de GES et 17 indicateurs de préservation des écosystèmes -biodiversité, ressources et paysages), 5 indicateurs de bien-être animal (part d'herbe, pâturage, vie à l'extérieur, relation veau-vache) et 6 indicateurs de réponses aux attentes sociétales (autonomie alimentaire, efficacité protéique, compétition avec l'alimentation humaine, potentiel nourricier...). Les résultats ont été comparés à des références pour positionner les résultats de notre échantillon dans des bases plus larges.

2.2.4. Acceptabilité économique

Une méthode de calcul d'un prix de vente de cette nouvelle production de Bouvibio a été élaborée sur le raisonnement de prix d'opportunité indexé au cours du broutard. En effet, pour être acceptable, l'éleveur doit trouver un intérêt économique à faire de la viande bio plutôt que de vendre son broutard.

Le prix est indexé aux cours des broutards² avec lesquels les itinéraires AB de production de viande sont en concurrence, auxquels est appliquée une décote de 12 % (qui correspond à l'écart de prix de marché observé dans les bases de données INOSYS-Réseaux d'Élevage et Bioréférences entre les broutards conventionnels et bio). On ajoute, pour chaque kilo de viande supplémentaire produit, le prix de revient (Sarzeaud, P. *et al.*, 2011) de la référence EGALIM mise à jour annuellement selon la méthode Couprod® validée par la profession³. Pour un Bouvibio rustique vendu à 11 mois, à un Poids Carcasse (PC) de 280 kgc, un Rendement Carcasse (RC) de 56 % et un Gain de Poids Vif (GPV) de 150 kgv durant sa phase de finition, dont le Cours du Broutard Maigre (CBM) est en 2023 de 3,3 €/kgv pour un Poids Vif Broutard de 350 kgv, et le Prix de Revient de la viande AB (PXRVT) à 11,3 €/kgc, la **formule de calcul du prix d'opportunité** est la suivante :

Prix d'opportunité en €/tête = $((CBM_{en\ €}) \times (1 - 12\ \%)) \times (PVB_{en\ kgv}) + [(GPV_{en\ kgv}) \times ((PXRVT_{en\ €}) \times (RC_{en\ \%}))]$

Soit $(3.3 \times 0.88 \times 350) + (150 \times 11.3 \times 0.56) = 1\ 966\ \text{€/tête}$

Prix d'opportunité en €/kgc = $[((CBM_{en\ €}) \times (1 - 12\ \%)) + [(GPV_{en\ kgv}) \times ((PXRVT_{en\ €}) \times (RC_{en\ \%}))]] / PC_{en\ kgc}$

Soit $[1\ 040 \times 0.88 + 150 \times 11.3 \times 0.56] / 0.56 = 7,0\ \text{€/kgc}$

2.3. Appréciation des viandes

2.3.1 Test de dégustation

Quatre tests d'appréciation qualitative des viandes de Bouvibio produites ont été réalisés en situations réelles de consommation de la RC, auprès de 818 convives au total. Ils ont concerné différents publics variant par l'âge (scolaires, jeunes adultes et adultes) et l'origine géographique (rural, urbain, métropole) (Tableau 1). Trois types de viande (haché, steak et faux-filet) ont été testés en cuisson rapide (grillée), de même que des morceaux de colliers basses côtes (sauté) en cuisson mijotée. Les viandes étaient préparées selon les pratiques habituelles des cuisiniers et des viandes témoins ont été introduites lors des tests en cuissons rapides. Chaque convive a dégusté un type de viande évalué à l'aveugle : soit la viande AB expérimentale, soit un témoin. L'évaluation sensorielle a porté sur l'aspect général avant dégustation et la satisfaction après dégustation (note de 1 à 10). Le degré de satisfaction sensorielle (échelle JAR) a été questionné pour l'odeur, le gras, le goût, la jutosité, la tendreté ou le fondant en bouche, et parfois la taille des morceaux, le niveau de cuisson, la température de service, la

² Cotation FAM – visionet.franceagrimer.fr

³ Idele.fr - Le prix de revient tient compte de l'ensemble des coûts de production supportés par l'éleveur



facilité de coupe, la présence de nerfs. Une liste de 13 descripteurs a permis de caractériser la viande testée (sautés et viandes piécées) ou les éventuels écarts à la viande habituellement proposée (tests steaks hachés). Les résultats sensoriels étaient objectivés par la pesée des restes de viande. Du fait des contraintes liées aux sites de restauration, 3 méthodes ont été utilisées : viande expérimentale et témoin reçus au hasard le même jour (steaks hachés) ou jours différents (viandes grillées), viande expérimentale sans témoin (sauté).

2.3.2 Qualités extrinsèques ou appréciation autres que sensoriels

Le questionnaire (questions fermées) à remplir combinait 2 approches : l'évaluation sensorielle des qualités intrinsèques des viandes et des questions sur d'autres facteurs de sensibilité liés aux modes de production (extrinsèques).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des 4 tests réalisés auprès de consommateurs de Restauration Collective

Lieu et date du test	Naves, 29/03/22	Lempdes, 11/10/22	Dijon, 05/05/23	Lyon, 03 au 05/10/23
Nb de convives	293	198	144	183
Type de restaurant	Scolaire, lycée agricole.	Supérieur, école ingénieurs.	Scolaire, lycée professionnel.	Inter administratif
Zone géographie	Rurale	Périphérie urbaine	Urbaine moyenne	Urbaine métropole
Profil convives maj	Ado.15-20 ans	Jeunes 18-25 ans	Ado.15-20 ans	Adultes > 25 ans
% femmes	62 %	69 %	21 %	35 %
Type viandes	Haché 6 %MG		Sauté	Steak
Cuisson	Grillée		Mijotée	Grillée
Origine	Mêlée ½ Collier et ½ caparaçon, 10 Bouvibio		Collier basse côte, 13 Bouvibio	Faux-Filet, 11 Bouvibio

Les questions sur d'autres facteurs de sensibilité à la consommation portaient sur la raison du choix de ce plat, les critères de qualité autres que sensoriels souhaités pour les viandes servies au restaurant avec 3 choix possibles parmi une dizaine de propositions, la sensibilité aux produits bio, la nature des produits bio souhaités au restaurant parmi 7 à 8 propositions.

2.5.3 Enquêtes auprès des opérateurs de l'aval

Les résultats de ces dégustations sont venus compléter la caractérisation socio-économique et environnementale des nouveaux produits afin d'évaluation de leur positionnement marché par les opérateurs de l'aval de la filière. 14 enquêtes sous forme d'entretien semi-dirigé ont été réalisées sur les 2 régions en ciblant les abatteurs transformateurs, les acheteurs de RC, les groupements d'achats et collectivités et les RC autogérés. L'analyse des réponses a été réalisée de manière qualitative sur 2 axes – intérêt pour le produit Bouvibio / besoins des acteurs du marché pour faire ressortir les items fréquents dans les échanges.

2.4. Evaluation de l'impact environnemental à l'échelle des territoires

L'évaluation à l'échelle territoriale des impacts que pourrait générer la finition des jeunes bovins mâles AB dans leur élevage de naissance est quantifiée par simulation en utilisant l'outil Climagri® (version 2023), auquel s'ajoute une estimation du gain d'énergie de transport entre zones actuelles de naissance et d'engraissement. La méthodologie utilise i) les données de naissances, mouvements d'animaux et d'abattage de la Base de Données Nationale d'Identification (BDNI) et Normabev recensées par cheptel et par maille géographique, ii) un découpage territorial en 4 zones d'élevage établi à partir d'une



typologie pédoclimatique et de ressources fourragères issues du Recensement Agricole à l'échelle des Petites Régions Agricoles, iii) les indicateurs zootechniques (alimentation et croissance) des 12 modèles de finition des mâles établis lors des tests en stations et observations en fermes, déclinés pour les 4 zones d'élevage, iv) des scénarios d'orientation de production établis collectivement par les acteurs filière (amont, aval) et territoire de 2 régions pilotes (AuRA et Occitanie) et recueillis lors de 3 focus group. Les calculs se sont focalisés sur les effectifs 2020 de broutards mâles nés en élevage AB et vendus maigres à des ateliers d'engraissement pour produire des jeunes bovins (JB) de 15-18 mois en France, Italie ou Espagne dans les proportions données par la BDNI. Dans la situation actuelle (S0), ils sont perdus par la filière AB. Le scénario projeté à horizon 2030 (S1) correspond à une situation où tout bovin mâle né AB de vache allaitante est élevé en AB jusqu'à l'assiette du consommateur. Compte-tenu de la stabilité des effectifs d'animaux en AB observés ces dernières années sur les 2 régions d'étude, nous avons considéré que l'effectif de vaches allaitantes restait identique à celui de 2020. Les calculs ont été réalisés en utilisant les indicateurs de production référencés dans le projet et adaptés à la zone d'élevage du cheptel naisseur et au type racial de la mère (type viande, rustique ou croisé). L'impact de la relocalisation a été analysé via les données d'évolution de flux matière et utilisation des ressources, impacts climatique et environnementaux, et autres facteurs de réponses aux attentes sociétales.

3. Résultats et discussions

3.1. La place du troupeau allaitant dans la filière de viande AB

Le nombre de bovins issus des élevages AB abattus en France a triplé entre 2011 et 2021. Cette croissance impressionnante est tirée par le rythme des conversions sur la période, et la progression du cheptel de vaches qui en découle. En janvier 2021, le cheptel allaitant AB représentait environ 4 % du cheptel allaitant français. Les mâles nés dans ces élevages tiennent une faible place dans la production d'animaux bio, représentant seulement 28 % des animaux abattus pour la viande. En effet 58 % des mâles fuient vers la filière maigre conventionnelle en étant vendus à des ateliers d'engraissement à l'export (Italie, Espagne) ou vers d'autres bassins français. 54 000 veaux allaitants sortent ainsi tous les ans de la filière de production de viande bio. 1/3 de ceux qui restent produisent de la viande de bœuf, 2/3 de la viande jeune, essentiellement des veaux lourds et très jeunes bovins pour lesquels il n'y a pas de filière de commercialisation hors de la vente directe. Ces productions existent bien sur le terrain pour la vente directe puisqu'on les retrouve dans les bases de données : 44 % des éleveurs bovins allaitants AB n'engraissent presque aucun mâle et à l'opposé 16 % finissent déjà la quasi-totalité (>90 %) de leurs mâles. Les gammes de poids carcasses des mâles abattus sont les suivantes : veaux de moins de 8 mois (19 %) – 130 à 200 kg ; JB de 8 à 12 mois (2 %) – 150 à 300 kg ; les bouvillons et bœufs rajeunis de 12 mois à 28 mois (3 %) – 300 à 400 kg. Ces résultats confortent l'hypothèse de départ : il est possible de finir des animaux mâles jeunes en AB.

3.2. Les modèles de production de viande AB

Le Tableau 2 récapitule les itinéraires de production pour produire des bovins mâles AB finis, qui ont été référencés à partir des suivis réalisés en stations et en ferme. 12 modèles ont été référencés. Ils couvrent la diversité des races allaitantes et des principaux contextes d'élevage, et 3 catégories commerciales selon la durée du cycle de production : le veau lourd abattu avant 8 mois, le jeune bovin âgé de 8 à 13 mois que nous appelons Bouvibio et le bœuf précoce abattu autour de 2 ans.

La production de Bouvibio est innovante, complémentaire au veau et au bœuf. Son cycle de production autour de 1 an n'engendre pas de modification de la conduite du troupeau de mères. Elle n'introduit pas de contraintes supplémentaires pour un éleveur de mâles maigres : le Bouvibio est facile à produire à partir du broutard, en utilisant les ressources fourragères locales et de l'exploitation. 6 itinéraires de



production de Bouvibio ont été référencés pour différents types raciaux (rustiques et croisés, conformés) et contextes d'élevage. Ils produisent en moins d'1 an des carcasses légères, variant de 180 kgc en montagne à 285 kgc en zone herbagère, d'assez bonne conformation (R/U), plutôt maigres (2), avec une viande de couleur claire peu persillée. Du vêlage jusqu'au sevrage, les veaux n'ont pas été complémentés. Ils sont uniquement nourris avec le lait de leur mère, et l'herbe disponible au pâturage. Les jeunes sont sevrés entre 7 et 9 mois, puis finis durant 2 à 3 mois avec une ration à base d'herbe (foin, enrubannage ou pâturage) et d'un concentré fermier (méteil) ou du commerce (16 % MAT) à hauteur de 30-40 % de la Matière Sèche (MS) de la ration, soit 2 à 3 kg/l/tête. L'ingestion journalière en finition varie de 7 kg de MS pour les races conformées à 9 kg de MS pour les croisés ou rustiques. L'autonomie alimentaire (AA) de la ration est assurée par l'autonomie fourragère qui est totale et d'une part de concentrés qui peuvent être achetés pour la finition en zone "toute herbe". Cette quantité varie de 200 à 400 kg par Bouvibio. L'herbe, sous forme pâturée ou stockée, constitue l'essentiel de l'alimentation du couple mère-veau. La ressource herbagère n'étant pas en concurrence avec l'alimentation humaine, ces modèles de production ont une part minime de protéines végétales consommables par l'homme de 1 à 4 % et l'efficacité protéique nette du modèle de production est positive, de 106 à 390 % (méthode ERADAL : part de protéines consommables par l'homme produite / part de protéines consommables par l'homme utilisée). Pour leur bien-être, les animaux passent au moins 2/3 de leur vie au pâturage. Avec la prairie, les indicateurs environnementaux des élevages sont bien positionnés : entretien de la biodiversité et couverture 100 % des sols. La ressource en eau est préservée : il n'y a pas d'irrigation, pas d'utilisation d'engrais chimique ni de pesticide, conformément au cahier des charges AB.

Tableau 2 : Caractérisation des modèles zootechniques de production de bovins mâles en AB

Dénomination	Types		Caractéristique							Alimentation				
	Zones	Type racial	Période de naiss.	Age (mois)	GM Q (g/j)	Poids carcasse (kgc)	CON F	Not e Gra s	Rdt Car c	Conc ⁴ /anim al (kg brut)	Part ⁵ d'herb e dans ration	% ⁶ concurren ce protéique ration	Efficien ce protéi que ⁷ nette	AA (%)
Bouvibio d'Estives	MP	CR & R	Fin d'hiver	9,5	1050	185	0+/R =	2-	54 %	300	94 %	1 %	390 %	94
Bouvibio à l'Herbe	HPM M, HF	CR & R	Printps	11,0	1300	255	R+/U -	2+/- 3-	55 %	310	95 %	3 %	160 %	100
Bouvibio Céréales	HPM M, HF, PZS	CR & R	Printps	10,0	1200	225	R+/U -	2+	56 %	400	93 %	4 %	106 %	90
Bouvibio Lourd Conforé	HPM M, HF, PZS	C	Hiver	11,7	1160	265	R=/R +	2=	58 %	280	95 %	3 %	155 %	100
Bouvibio Lourd Rustique	HPM M, HF	CR & R	Hiver	11,5	1275	290	R=	2+	58 %	220	97 %	2 %	228 %	97
Bouvibio Castré	HPM M, HF	CR & R	Hiver	11,5	1200	265	R-/R+	3-	57 %	220	97 %	2 %	200 %	97

⁴ Quantité de concentrés totale pour produire le bovin, y compris pour la mère avant sevrage

⁵ Y compris la ration de la mère avant sevrage

⁶ Part de protéines dans l'alimentation du bovin (y compris couple mère-veau avant sevrage) qui est consommable par l'homme

⁷ Competition feed-food méthode ERADAL



Veau Lourd conforme	HPM M, HF, PZS	C	Hiver	6,5	140 0	185	R+/U -	2+	57 %	130	92 %	2 %	163 %	98
Veau Rosé d'Estive	MP	CR & R	Hiver	7,2	100 0	150	O- /R+	2-	58 %	0	98 %	4 %	200 %	98
Veau Rosé Economie	HPM M, HF, PZS	C	Printps	7,7	120 0	200	R+/U -	2=	61 %	120	92 %	2 %	125 %	10 0
Veau Rosé à l'Herbe	HPM M, HF, PZS	CR & R	Automn e	7,6	136 0	220	R- /R+	2-	60 %	300	80 %	4 %	90 %	10 0
Bœufs Précoces	HPM M, HF	CR & R	Automn e	24,0	800	350	R=/R +	3	55 %	420	88 %	4 %	160 %	10 0
Bœufs Economie	HPM M, HF	CR & R	Hiver	27,0	745	340	R- /R=	3	53 %	160	92 %	1 %	460 %	10 0

Le prix de vente de la viande de Bouvibio

Les prix à la production calculés sont méthodologiquement fortement corrélés au cours des broutards. Ils varient dans une fourchette d'1€/kgc entre un Bouvibio rustique léger de montagne (autour de 7€/kgc en 2023) et un Bouvibio lourd conforme (autour de 8€/kgc en 2023). Ces prix sont supérieurs d'environ 15 % aux cours du veau importé et assez proches de ceux du veau lourd conventionnel français, ce qui serait trop élevé pour les opérateurs de la RC d'après les enquêtes aval qui ont été réalisées.

Multi performance des élevages AB : zoom sur les indicateurs environnementaux et Bien-Etre Animal (BEA)

Dans les élevages en suivi, la conduite en AB a un impact très positif sur la préservation des écosystèmes et l'entretien des sols, de l'eau et de la biodiversité : pas de labour, sol couvert, rotations longues, pas de lessivage d'azote, pas d'irrigation, pas de traitement phytosanitaire, forte présence de prairies et de haies. Dans ces systèmes pâturant basés sur l'herbe, la consommation d'énergie directe (carburant) est faible, et il y a peu de consommation d'intrants. La présence de prairies permanentes et d'infrastructures agroécologiques préservent en moyenne 2,5 ha de biodiversité par ha, avec de gros écarts selon la zone d'élevage⁸. En moyenne, la performance nourricière des exploitations est plus faible qu'en systèmes conventionnels (capacité de nourrir près de 2 personnes par ha de SAU). Pour autant, l'empreinte carbone nette est basse (12 kg eq CO2/kgvv en moyenne), elle est nulle dans les systèmes de montagne qui utilisent des surfaces pastorales : le stockage compense en moyenne 60 % des émissions brutes, entre 30 % en zone de plaine et 170 % en montagne. Le méthane entérique constitue 74 % des émissions brutes de GES en moyenne. Dans ces systèmes pâturants, la consommation d'énergie est moitié moindre qu'en conventionnel. D'autres indicateurs positifs de bien-être animal et de traçabilité répondant aux attentes citoyennes peuvent être mis en avant : les vaches sont au pâturage 255 jours par an en moyenne (3/4 de l'année) et l'herbe représente 86 % de l'alimentation du troupeau, qui provient en totalité sur l'exploitation dans la majorité des cas. Seul 7 % des grains distribués aux animaux sont achetés à l'extérieur : ils doivent toutefois être certifiés AB.

⁸ Méthode CAP2ER®



Tableau 3 : Indicateurs environnementaux des fermes AB suivies comparés aux références nationales (CAP2ER®)

		Typologie des élevages projet				Référence Nationale	
		Montagne (MP), races rustiques, veaux et Bouvibio n=2	Massif Central (HPMM), toutes races, veaux et Bouvibio (n=2)	Plaine (HF), toutes races, veaux, Bouvibio, bœufs (n=3)	Plaine et Coteaux (PZS), toutes races, veaux, Bouvibio, bœufs (n=4)	Naisseur-Engraisseur de veaux (n=210)	Naisseur-Engraisseur de bœufs (n=92)
Emission GES par ha	Kg eq.CO2/ha SAU	2 751	3 275	3 579	4 164	5 447	4 496
dont CH4	%	76	75	76	71	64	67
dont NO2	%	18	15	17	19	21	21
dont CO2	%	6	10	7	10	15	12
Empreinte Nette	kg eq CO2/Kg VV	0,0	20,9	14,6	13,2	13,2	11,1
Empreinte Brute	eqCO2/Kg PBVV	18,8	36,4	19,9	18,8	21,7	18,1
Stockage Carbone	eqCO2/ha SAU	4 565	1 638	1 001	1 313	1 428	1 450
	% compensation	167 %	49 %	29 %	31 %	39 %	39 %
Conso. énergie Expl.	MJ/HA SAU	2 536	5 092	3 256	6 716	10 557	7 325
Excédent N Biodiversité	kg N/ha SAU	19	60	31	37	68	53
	eq/ha SAU viande	3,0	6,5	1,4	1,9	2,7	2,3
Potentiel nourricier	Nb Pers/ha SAU	1,4	2,0	1,5	2,4	4,4	4,2

3.3. Appréciation par les consommateurs et les acteurs de l'aval

Les notes d'appréciation des viandes obtenues lors des tests illustrent des retours positifs sur les différentes viandes testées par les consommateurs en RC, indiquant une bonne acceptabilité de ces nouveaux produits bio (Tableau 4). Les notes d'évaluation sensorielle des qualités intrinsèques des différentes viandes sont comprises entre 6,8 et 7,8 sur 10 pour l'aspect général avant dégustation et entre 7,3 et 8,3 sur 10 pour la satisfaction en bouche. Les déchets pesés se situent entre 1,3 et 8,4 g/convive selon les tests. Ces résultats ne diffèrent pas significativement de ceux des témoins choisis par les cuisiniers, lesquels étaient plutôt positionnés sur du haut de gamme pour la perception en bouche : steak haché façon bouchère à 10 ou 15 % de matières grasses (MG) ou steaks de faux-filet Label Rouge. La texture des différentes viandes a régulièrement été qualifiée de tendre, fondante et moelleuse. Cependant, les steaks hachés ont parfois été perçus secs, durs et compacts dans l'un des deux tests (LEMPDES), peut-être du fait du mode de cuisson retenu mais aussi en lien avec une teneur en MG de seulement 6 %. La couleur claire de la viande a été évoquée par 20 % des convives. Plusieurs atouts sensoriels ont été nommés par le consommateur : la viande est claire, tendre, fondante et moelleuse, aromatique avec un goût modéré à intense. Elle est facile à découper dans l'assiette car peu nerveuse, ce qui est un atout pour la restauration scolaire en particulier. La viande de ces jeunes animaux est maigre, sans trop de gras visible ; les morceaux à mijoter sont peu gélatineux du fait d'un réseau de collagène musculaire peu développé et surtout peu réticulé. Ces 2 caractéristiques sont appréciables, car elles entraînent moins de déchets d'assiette. La couleur claire de la viande est



rarement détectée par les convives puisque le produit est cuit. Elle n'entraîne pas d'impact majeur sur l'acceptabilité du produit.

Les 3 critères de qualité extrinsèque les plus fréquemment cités par les consommateurs concernent la production locale (majoritaire en urbain), la rémunération des éleveurs et le respect du bien-être animal (majoritaire en rural) avec respectivement 52 %, 46 % et 43 % des personnes intéressées. L'origine connue du produit et la recherche d'aspect bénéfique pour la santé suivent à hauteur de 36 % et 34 %. Le respect de l'environnement, le recours au pâturage et l'absence d'OGM, de pesticides, de produits chimiques de synthèse mobilisent chacun à peine plus de 20 % des consommateurs. Seulement 35 % des 818 consommateurs interrogés se sont déclarés sensibles à la consommation de produits bio, confortant par là-même la médiocre place des SIQO dans la hiérarchie des qualités extrinsèques recherchées. La viande se situe dans le top 3 des produits bio que les convives souhaiteraient trouver dans leur cantine, après les fruits et les légumes (cités respectivement par 44 %, 64 %, et 51 % des convives). Les produits laitiers, le pain et les céréales intéressent moins de 20 % des personnes interrogées.

Tableau 4 : Notes d'appréciation des viandes et caractéristiques extrinsèques mises en avant par les consommateurs

Lieu et date du test	Naves, 29/03/22		Lempdes, 11/10/22		Dijon, 05/05/23	Lyon, 03 au 05/10/23		
Type viandes	Haché 6 %MG - Grillé				Sauté - Mijoté	Steak et FF- Grillé		
Cuisson								
Groupe	Témoin	Test	Témoin	Test	Test	Témoin	Test Steak	Test FF
Nb de convives	82	211	78	120	144	57	64	63
Note Visuelle / 10	7.4	6.8	6.2	4.8 (s)	7.0	7.7	7.6	7.8
Note Sensorielle / 10	7.0	7.3	6.6	4.9 (s)	7.3	7.7	8.0	7.3
Critères de sensibilité autres que sensoriels (Rang et % des participants)	1 - Bien-être animal (54 %)		1 - Aspect local (63 %)		1 - Aspect local (54 %)	1 - Aspect local (56 %)		
	2 - Rémunération prod (48 %)		2 - Rémunération prod (49 %)		2 - Bon pour santé (51 %)	2 - Rémunérat prod (45 %)		
	3 - Origine connue (44 %)		3 - Bien-être animal (43 %)		3 - Rémunérat prod (38 %)	3 - Bon pour santé (37 %)		
	4 - Aspect local (42 %)		4 - Origine connue (36 %)		4 - Bien-être animal (33 %)	4 - Bien-être animal (34 %)		
	5 - Bon pour santé (32 %)		5 - Respect environnt (22 %)		5 - Respect environnt (31 %)	5 - Origine connue (30 %)		
	6 - Respect environnt (25 %)		6 - SIQO (22 %)		6 - Origine connue (29 %)	6 - Absen. OGM/pesti. (27 %)		
	9 - SIQO (13 %)				9 - SIQO (21 %)	9 - SIQO (13 %)		
					11 - Aucun (5 %)			

Pour les cuisiniers et les acheteurs de RC interrogés sur les résultats des tests, les viandes testées présentent divers avantages :

- elles permettent de participer au respect des lois EGALIM / Climat et Résilience sur les produits durables ou de qualité, récemment renforcées pour les viandes et poissons ;
- les caractéristiques de carcasse, poids et conformation, donnent des faux-filet ayant une noix de forme correcte. Ils sont plus petits que ceux des gros bovins et susceptibles de fournir des tranches d'environ 200 g (1,8 cm d'épaisseur), ce qui se rapproche de l'objectif de portions de 180 g en RHD ;
- bien que plus proche de la viande de bœuf que du veau pour les cuisiniers, c'est une viande jugée très tendre et qui supporte facilement diverses associations de saveurs. Ceci s'explique par la jeunesse des animaux : le réseau de collagène musculaire est peu développé et peu



réticulé tandis que le gras des muscles s'engraissant facilement avec l'âge est moins présent que chez le gros bovin. Cette tendreté potentielle permet de limiter la durée de maturation des morceaux nobles, avec la possibilité de travailler en frais, sans anticiper les achats. C'est également un avantage pour les plats mijotés, adaptés à la restauration scolaire par leur prix, qui requièrent moins de temps de préparation. Avec une cuisson inférieure à 2h30, ces viandes ne nécessitent pas d'être cuisinées la veille, contrairement au bœuf, et ne présentent pas plus de pertes à la cuisson sur celui-ci.

- proposée en restauration scolaire, ce type de viande permet d'ailleurs de s'affranchir du côté problématique, pour un nombre croissant d'adolescents, de l'appellation veau (=« bébé »), alors que la « viande bovine » est au contraire bien acceptée de ce public.

Les principaux inconvénients identifiés à ce stade sont la variabilité de la taille des tranches de faux-filet, en lien avec celle des carcasses, et l'aspect maigre de l'ensemble des morceaux. Il convient d'utiliser un peu de matière grasse pour les grillades (faux-filet, steak) et d'éviter de cuire les rôtis au four à sec. Pour ces derniers, privilégier une cuisson mijotée comme pour le veau, avec produit consommé bien cuit et non saignant. Ne pas hésiter à ajouter crème et sauces pour éviter le dessèchement des pièces à mijoter. Enfin, le recours aux cuissons longues à basse température, qui peut être mis en place dans certains établissements respecte au mieux la qualité des produits.

3.4. L'impact territorial de la relocalisation de production de viande AB

Dans l'exemple de la région Occitanie, la relocalisation de la finition des 9 000 mâles nés AB (actuellement exportés en brouillards) produit 2 200 TEC, permettant d'augmenter de 50 % la production de viande bovine AB régionale avec un besoin de mobilisation foncière de 2 675 ha, à 95 % d'herbe (le reste en culture de luzerne et méteil). À l'échelle Europe, ce scénario entraîne une baisse de volume de 30 % de la production de viande par rapport au schéma actuel de finition en JB intensifs de 15-18 mois. Élever un mâle AB en Occitanie fait baisser de 35 % les émissions annuelles de GES. Dans les exploitations, les consommations d'énergie directe se réduisent de 18 % (moins d'utilisation de carburant) et les consommations d'énergie indirecte liées aux engrais et autres achats d'intrants baissent de 80 %. Environ 460 000 km camion de transport d'animaux sont évités et 162 000 l de carburant sont économisés. Pour l'environnement, le scénario de relocalisation entraîne donc moins de nuisances sonores liées au transport, moins de particules fines et COV (-42 %/an), une baisse de 56 %/ha de l'ammoniaque émis et une réduction de 300g /UGB de matières actives phyto utilisées. Pour la préservation des ressources naturelles, la relocalisation de la finition et les pratiques AB entraînent une augmentation de 7 % de la Matière Organique (MO) des sols, une baisse d'érosion grâce à l'herbe qui permet d'augmenter de 20 % de la couverture des sols, une augmentation de la biodiversité par l'utilisation de prairies et la baisse des risques de pollution de l'eau liée à l'arrêt d'utilisation d'intrants chimiques. Les besoins en soja baissent de 97 %, ce qui impacte favorablement la déforestation importée. Il est à noter que le périmètre de cette évaluation prospective est à l'échelle du couple mère-veau allaitant pour produire de la viande bio locale. Elle ne tient pas compte des conséquences induites de ce scénario sur les pratiques commerciales des autres pays d'Europe. En effet, on peut supposer qu'une relocalisation de nos animaux sur leur bassin de naissance contribuerait à une baisse importations actuelles de viande de veau, voir à leur réorientation vers les pays actuellement pourvus par l'exportation françaises de brouillards issus des filières AB.

4. Conclusion

Entre le veau et le bœuf, le nouveau produit Bouvibio a des itinéraires de production qui ont l'avantage d'être simples pour « remplacer les brouillards ». Les cycles sont courts et ne modifient pas la période d'élevage sous la mère, ni la conduite du troupeau. Cette voie de valorisation engendre une plus-value supplémentaire à faible investissement de coût de production et sans modifier fondamentalement le



travail de l'éleveur producteur de brouillards. Elle est particulièrement intéressante pour les veaux nés en hiver ou début de printemps qui valorisent bien le pâturage pendant l'allaitement des mères, ce qui est souvent le cas en AB. Les veaux sont alors sevrés l'été à une période commerciale creuse. La finition en Bouvibio offre l'avantage de pouvoir étaler les ventes sur l'automne et l'hiver, ce qui correspond bien aux besoins de la RC. Selon le contexte commercial, ce sont les meilleurs ou les moins bons veaux qui peuvent être choisis par les éleveurs pour être finis en Bouvibio. L'utilisation d'herbe et de fourrages dans les rations de finition distinguent les Bouvibio d'autres essais d'engraissement de jeunes bovins mâles Baron Bio réalisés il y a 10 ans (Bastien *et al.*, 2012). L'herbe permet aussi une production de viande bovine ayant une efficacité protéique nette toujours positive. La réglementation de l'AB garantit un meilleur respect du bien-être animal et de l'environnement. Ces caractéristiques extrinsèques répondent à la demande sociétale et intéressent la filière. A l'inverse, l'hétérogénéité des poids carcasses découlant des diversités de races et de situations de production et de la qualité des fourrages utilisés, constitue un point d'attention pour la filière qui doit gérer cette variabilité. En effet, selon le produit, le mode de cuisson retenu et la présentation qui en est faite au sein du restaurant, la viande de Bouvibio est associée soit à du bœuf, soit à du veau. Mais contrairement aux idées reçues et à priori de la filière, la viande de Bouvibio est bien accueillie par les consommateurs dans ses différentes formes de préparation et de cuisson. Le principal inconvénient apparaît lié à la faible teneur en gras, dont il faut tenir compte dans la fabrication des steaks hachés pour atteindre si possible 10-12 %. La viande maigre se cuisine de préférence avec un peu de matière grasse, voire des accompagnements de crème et sauces, ou en milieu humide (rôtis) pour éviter le dessèchement. Outre la participation au respect des lois sur les produits durables ou de qualité, de nombreux avantages pratiques identifiés par les cuisiniers ayant participé aux tests pourront être mis en avant pour la RC : tailles de faux-filet (portions de 180 g en gardant de l'épaisseur de tranche pour une cuisson maîtrisée), viandes jeunes et très tendres faciles à associer avec diverses saveurs, cuisson de moins de 3h en plats mijotés. Enfin, elle ne nécessite pas d'importantes durées de maturation des morceaux nobles, d'où la possibilité de travailler en frais, sans anticiper les achats.

Côté territoire, la finition des bovins mâles issus du troupeau allaitant donne la possibilité d'un ancrage de pratiques AB dont les conséquences sont positives sur le climat, l'environnement et les ressources naturelles en économisant les ressources énergétiques non renouvelables. L'exemple de la région Occitanie (1^{ère} région française détenant 18 % des effectifs de vaches allaitantes AB) montre que la finition de tous ses bovins mâles nés AB mobiliserait seulement 0,4 % de la SAU régionale pour augmenter de 50 % les abattages AB et la production de viande bovine bio, ce qui correspond selon nos calculs à 91 % des besoins en viande bovine de toute la restauration scolaire régionale. Les surfaces nécessaires sont principalement en herbe et n'entrent pas en concurrence avec d'autres productions alimentaires. Ce scénario permettrait de donc de remplir largement les objectifs de la loi EGALIM et de répondre aux attentes des consommateurs en consolidant la filière viande locale. Dans ce scénario toujours, les besoins en importation de viande de veau pour la RHD seraient donc réduits. On peut imaginer qu'une partie de ce flux de viande importé soit réorienté vers les zones actuelles d'export des bovins français qui viendraient à manquer. Ce volet de l'étude environnementale en appellerait donc une autre, à plus large échelle géographique. Notons également que la mise en place d'un scénario de relocalisation nécessiterait, pour chaque région française, la réorientation annuelle de 1 à 5 fermes conventionnelles vers l'AB pendant 10 ans afin de garantir les surfaces nécessaires à nourrir en autonomie les jeunes mâles nés AB. Ces surfaces pourraient provenir pour partie de la décapitalisation de cheptel ruminant conventionnel de ruminants. Il reste donc à convaincre les opérateurs, les collectivités locales et les différents acteurs territoriaux de s'emparer de ce travail de R&D pour commencer à structurer une ou plusieurs filières locales. Le Bouvibio en particulier a beaucoup d'atouts mais la variabilité des carcasses, la saisonnalité de la production et la concurrence de la filière brouillards sont des freins identifiés qu'il faudra travailler à l'échelle des filières territoriales. Dans une période de tension sur le marché de la viande bovine, la contractualisation entre parties prenantes peut être un bon levier de développement qui ne pourra pas éviter la question du prix. Il



faudra trouver comment rémunérer cette production, entre valorisation de la carcasse, soutiens publics et consentement à payer des collectivités et des consommateurs...

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.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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 du projet PROVERBIAL (CASDAR Innovation Partenariat 2020), les éleveurs et acteurs filière des régions AuRA et OCCITANIE ayant participé aux travaux des focus groups.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a bénéficié des financements CASDAR et autofinancements des organismes partenaires : IDELE, ARVALIS et ferme expérimentale des Bordes, INRAE Herbipôle, Ferme expérimentale de Thorigné, Ferme du lycée de Naves, CRAO, CA03, CA81, BC66, InterBio NA, La Coopération Agricole ARA, Pôle Bio MC, Vétagro'Sup

Références bibliographiques

- Bastien, D., 2012. Le Baron Bio - Qualité de sa carcasse et de sa viande.
- Belz, J., Berruyer M., et al., 2024. Collection Théma INOSYS Réseau d'Elevage, Évaluer la durabilité économique des élevages de ruminants : Méthode et actualisation des repères (campagnes 2018-2022)
- Dimon, P., Brouard, S., Malaval, N., Boulesteix, P., Sepchat. B., 2023 *Innovations Agronomiques*, 2023, 88, pp.119-131.
- Englin, T. et al., 2016. Climagri® : un outil et une démarche
- Gerardin, A., Monniot, C., 2022. Où va le jeune bovin ? Quel produit pour quel marché ? *Renc. Rech. Ruminants*, 2022, 347-350
- Kentzel, M., et al., 2024. Produire de la viande bovine bio avec le troupeau allaitant : les atouts d'une relocalisation de la production. *Renc. Rech. Ruminants*, 2024, 281-284
- Laisse, S., Rouillé, B., Baumont, R., Peyraud, J.L., 2016. Evaluation de la contribution nette des systèmes bovins laitiers français à l'approvisionnement alimentaire protéique pour l'être humain. *Journées Renc. Rech. Rum.* 23, 263-266. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01455953/>



Legrand, I., *et al.*, 2010. Production et caractérisation des veaux de boucherie de 6 mois, de 8 mois et d'animaux plus âgés produits en France. *Renc. Rech. Ruminants*, 2010, 369-372

Monniot, C., *et al.*, 2025. Où va le bœuf ? *Dossiers Economie de l'Elevage* n°555

Normand, J., *et al.*, 2020. Enquête nationale sur les qualités organoleptiques de la viande bovine proposée aux consommateurs français, quelles évolutions 10 ans après ? *Renc. Rech. Ruminants*, 2020, 4464-468

Rouillé, B., Jost, J., *et al.*, 2023. *Innovations Agronomiques*, 2023, 88, pp.132-146.

SARZEAUD, P., *et al.*, 2011. Le coût de production, un indicateur de la rentabilité des ateliers en production de viande bovine - *Renc. Rech. Ruminants*, 2011, 18.

Pour citer cet article : Marion KENTZEL, Isabelle LEGRAND & Hélène CHAMBAUT, 2026 - Produire de la viande bovine bio avec les veaux mâles du troupeau allaitant pour approvisionner la restauration collective locale : les modèles Bouvibio. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art06>



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.



Stratégies d'amélioration du bien-être des poulets élevés en système standard

Laura WARIN¹, Auriane FOREAU¹, Laurine MESSAGER¹, Isabelle BOUVAREL¹, Elsa DELANOUE¹, Solenn FASSION², Maryse GUINEBRETIERE³, Frédérique MOCZ³, Clémence LESIMPLE⁴, Félicie AULANIER⁵, Ludovic CALANDREAU⁶, Elisabeth DUVAL⁷, Bertrand MEDA⁷

¹ ITAVI, 7, rue du Faubourg Poissonnière, 75009 Paris, France

² Chambre d'agriculture Pays de la Loire, 9 rue André Brouard, 49105 Angers, France

³ ANSES, Zoopôle, 22440, Ploufragan, France

⁴ Groupe ESA, 55, rue Rabelais, 49007, Angers, France

⁵ Chambre d'agriculture de Bretagne, 4, avenue du Chalutier sans pitié, 22190, Plérin, France

⁶ CNRS, IFCE, INRAE, Université de Tours, PRC, 37380 Nouzilly, France

⁷ INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 Nouzilly, France

Correspondance : warin@itavi.asso.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art07>

Résumé

La filière poulet de chair française évolue sous l'effet des avancées scientifiques et des attentes sociétales en matière de bien-être animal. Le projet COCORICO (2021–2024) a accompagné cette transition en identifiant les besoins comportementaux des poulets et en coconstruisant des solutions lors d'ateliers de codesign réunissant chercheurs, professionnels et ONG. Diverses pratiques (exemple : réduction de densité) et enrichissements (exemple : plateformes, jardins d'hiver) ont été testés en élevages et stations expérimentales. Ces solutions permettent de stimuler l'activité, de limiter certains troubles de santé et de favoriser l'expression de comportements naturels. En revanche, la structuration du milieu de vie reste prometteuse mais difficile à déployer en élevage commercial. Une évaluation multicritère a comparé deux scénarios d'évolution au système standard : Standard+ (ajout d'enrichissements) et ECC (European Chicken Commitment : enrichissements, baisse de densité, changement de souche). L'ECC améliore davantage le bien-être mais engendre des surcoûts et une baisse de productivité, tandis que Standard+ constitue un compromis à coût modéré. Leur déploiement dépendra du soutien de la filière, des choix stratégiques et du consentement à payer des consommateurs.

Mots-clés : COCORICO, comportement, souche, densité, enrichissement, évaluation multicritère

Abstract: Strategies to improve welfare in conventional broiler farms

The French broiler industry is evolving in line with scientific advances and growing societal expectations regarding animal welfare. The COCORICO project (2021–2024) supported this transition by identifying the behavioural needs of broilers and developing solutions through co-design workshops involving researchers, industry stakeholders and NGOs. Various practices (e.g. reduced stocking density) and enrichments (e.g. platforms, outdoor winter gardens) were tested on commercial farms and experimental stations. These measures can stimulate activity, reduce certain health issues and promote the expression of natural behaviours. However, increasing the complexity of the housing environment appears promising but remains difficult to implement in commercial production systems. A multi-criteria assessment was then used to compare two scenarios designed to improve upon the standard system: Standard+ (addition of environmental enrichments) and ECC (European Chicken Commitment), which combines environmental enrichments, reduced stocking density and the use of a slower-growing genetic



strain. The ECC scenario leads to a greater improvement in animal welfare but also results in higher costs and lower productivity. In contrast, the Standard+ scenario offers a balanced compromise at moderate cost. The implementation of these scenarios will depend on industry support, strategic decisions and consumer willingness to pay.

Keywords: COCORICO, behaviour, strain, stocking density, enrichment, multicriteria assessment

1. Introduction : un système standard qui évolue

La société remet en cause certaines pratiques d'élevage, questionne leur légitimité, le statut de l'animal dans notre société, et plus globalement notre rapport à la nature. Ceci impose la prise en compte de nouveaux défis par les acteurs des filières, conduisant à une diversification des systèmes d'élevage. Dans ce contexte, la conciliation entre les avancées scientifiques en matière de bien-être animal, les contraintes économiques et pratiques des éleveurs, et la viabilité des filières constitue un enjeu majeur pour les filières animales. Les acteurs de la filière poulet de chair française font ainsi évoluer leurs cahiers des charges pour mieux répondre aux besoins des animaux (exemple : ajout de fenêtres pour permettre un apport de lumière naturelle ou d'enrichissements variés). En effet, les connaissances sur le bien-être animal s'affinent au fil des avancées scientifiques, reflétant ainsi une compréhension plus holistique des besoins des animaux. Actuellement, la définition du bien-être animal qui fait consensus scientifiquement est celle proposée par l'ANSES en 2018 (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation), comme étant « l'état mental et physique positif lié à la satisfaction des besoins physiologiques et comportementaux ainsi que de ses attentes. Cet état varie en fonction de la perception de la situation par l'animal ». Cette définition met en lumière la dimension mentale associée au bien-être, qui implique qu'une bonne santé ne suffit pas, et qu'il faut favoriser des situations d'élevage qui génèrent un état émotionnel positif (ex : comportements de jeux, bains de poussière). Il s'agit donc désormais de décrypter les besoins comportementaux des poulets afin de valoriser des pratiques et équipements pertinents déjà déployés sur le terrain, et d'imaginer de nouvelles améliorations pour les élevages de demain. Afin d'envisager un déploiement de ces bonnes pratiques / équipements, il paraît indispensable d'objectiver les effets pour les éleveurs au quotidien (quel temps de travail supplémentaire ? quels bénéfices ? ...) et d'estimer les surcoûts et autres effets induits pour la filière française.

Le projet COCORICO visait donc à accompagner l'évolution des systèmes de production de poulets de chair conventionnel, tout en évaluant les effets induits par ces changements. Cet article vise à présenter les principaux résultats issus des travaux menés dans le cadre du projet COCORICO (2021-2024).

2. Méthodologie mise en œuvre

2.1. Quels sont les besoins comportementaux des poulets ?

Pour que les évolutions des systèmes d'élevage de poulets de chair aient un sens pour les filières (pourquoi est-ce que le poulet se perche ?) et pour les poulets (quels types de perchoirs sont réellement utilisés par les poulets ?) un travail a permis de recenser les besoins comportementaux et cognitifs de l'espèce *Gallus gallus domesticus*. Pour cela, un groupe de 11 scientifiques travaillant sur les questions de bien-être et/ou comportements des poulets a été créé. Les besoins comportementaux ont été identifiés au regard des connaissances acquises sur la poule domestique (en élevage ou retournée à l'état sauvage) et sur la poule de jungle (en zoo) quels que soient l'âge, le sexe ou la souche génétique des animaux. Cette liste de besoins a été utilisée pour nourrir les réflexions d'un groupe de *codesign* rassemblant des scientifiques, des acteurs des filières (de l'amont à l'aval) et des membres d'associations de protection animale.



2.2. Le codesign pour coconstruire des solutions

Le *codesign* est une méthode de travail collaboratif, qui vise à encourager la co-conception en faisant appel à différentes compétences. Un premier atelier multiacteur organisé fin 2021 a réuni une vingtaine de participants (professionnels de la filière, associations de protection animale, chercheurs, etc.) afin de réfléchir à des pistes d'amélioration pour l'élevage de demain, en vue de mieux satisfaire les comportements des poulets. Par la méthode du *codesign*, un travail de groupe a abouti à la production de 4 maquettes illustrant des systèmes d'élevage répondant aux objectifs du projet. Un deuxième atelier, organisé un an plus tard avec le même groupe, a permis de croiser les grands enjeux de l'élevage (bien-être animal, économie, environnement) par la réalisation d'un exercice de prospective à long terme, sous diverses contraintes. Ces ateliers ont permis au groupe, dans un processus itératif, non seulement de faire le point sur l'avancée des travaux de recherche, et par-là de se les approprier tout au long du projet, mais aussi de servir de force de proposition pour les (ré)orienter. Des propositions d'innovation concrètes ont ainsi été formulées et une partie d'entre elles a été testée en élevages commerciaux et / ou en stations expérimentales, puis les plus pertinentes ont été combinées en scénarios pour être évaluées sous l'angle multicritère pour guider au mieux les choix stratégiques des filières.

2.3. Des essais et des enquêtes terrain pour objectiver l'intérêt de solutions, et leur perception

2.3.1. Enquêtes filière

Les solutions imaginées lors des ateliers de *codesign* ont été discutées plus largement et hiérarchisées suite à des entretiens avec des acteurs de la filière (éleveurs, équipementiers, etc.), des scientifiques et des consommateurs (Warin et al., 2023). Différentes méthodes de recueil des discours ont été mises en œuvre : entretiens individuels semi-directifs, ateliers participatifs et focus-groups. Ces entretiens avaient pour but de collecter les perceptions de l'élevage de poulet standard ainsi que les regards sur les solutions issues du *codesign*, en prenant en compte la plus grande diversité de points de vue au sein de la filière.

2.3.2. Suivis en élevages commerciaux

Plusieurs suivis ont été menés en élevages commerciaux afin d'évaluer l'intérêt de pratiques / équipements déjà mis(es) en place, et d'équipements prospectifs non déployés à ce jour. Ces suivis ont été menés dans des élevages de poulets de chair Ross308 majoritairement (et quelques JA987) et ont permis :

- d'évaluer les forces et faiblesses d'enrichissements qui visaient à répondre à différents besoins comportementaux tels qu'explorer (blocs à picorer, ficelles, chaînettes, ballots de paille, ballons, sacs de granulés), se percher et se reposer (perchoirs plateformes, linéaires, ballots de paille, panneaux verticaux) et réaliser des bains de poussière (bac) ;
- de comparer 5 modalités d'élevages commerciaux qui se distinguent par la présence de différents équipements (lumière naturelle, enrichissements, jardin d'hiver), et la mise en place de diverses pratiques (baisse de densité, changement de souche génétique) ;
- de comparer l'intérêt d'enrichir le bâtiment d'élevage davantage que ce qui est fait actuellement, en structurant le bâtiment de façon à créer des zones plus propices à l'activité et d'autres plus propices au repos.

Pour atteindre les objectifs, des observations comportementales des animaux ont été menées (méthode de *scan sampling* qui consiste à observer un groupe d'animaux à intervalles de temps réguliers (par exemple toutes les 5 minutes) et à noter les comportements observés à un instant donné, permettant ainsi d'estimer le budget d'activité. La méthode par *continuous sampling* repose sur une observation



continue d'un individu ou d'un groupe pendant une période définie, avec enregistrement de tous les comportements ainsi que leur durée, offrant une description précise des activités. Enfin, la méthode EBENE® consiste à observer un nombre restreint d'individus et à relever toutes les occurrences de comportements préalablement définis sur une durée spécifique, adaptée au type de production.

2.3.3. Suivis en stations expérimentales

Quatre essais ont été réalisés dans la station expérimentale de l'Anses à Ploufragan afin d'évaluer en conditions contrôlées l'impact de pratiques et équipements d'élevage.

Les effets de changements génétiques ou d'une baisse de la densité sur le comportement et l'état physique des poulets ont été évalués lors du premier essai. Six génotypes de poulets présentant différentes vitesses de croissance (du JA757 à 42 g/j au Ross 308 à 61 g/j) ont été comparés, à densité « classique » (39 kg/m²) ou réduite (30 kg/m²). La densité et la vitesse de croissance étant considérés comme les deux pistes les plus prometteuses pour améliorer le bien-être, mais aussi les plus impactant économiquement.

Le second essai visait à étudier l'impact d'un milieu de vie complexe et structuré sur le bien-être des poulets de souche Redbro (GMQ~50g/j à 2kg de poids vif). L'enrichissement environnemental, en stimulant des comportements naturels comme la recherche de nourriture, le perchage et l'exploration, pourrait s'avérer bénéfique à la fois sur le plan physique et mental, deux composantes clés du bien-être animal.

Le troisième essai avait pour objectif d'étudier l'utilisation d'un jardin d'hiver (poulets Redbro) et l'impact sur divers critères de bien-être. La présence d'un jardin d'hiver avait pour objectif de donner le choix aux animaux d'accéder lorsqu'ils le souhaitent à un espace extérieur abrité et protégé.

Enfin, le dernier essai, compilant les résultats des 3 précédents, visait à comparer 3 modèles d'élevage du poulet de chair comme alternatifs au système actuel : i. avec une souche Redbro en claustration et lumière naturelle, ii. avec une souche à croissance rapide élevée en claustration avec des enrichissements du milieu de vie (+ lumière naturelle), iii. avec une souche à croissance rapide et accès à un jardin d'hiver (+ lumière naturelle dans le bâtiment).

Un essai complémentaire et plus exploratoire a été mené à INRAE pour étudier l'impact de l'exposition précoce à des événements positifs sur le développement comportemental et cognitif chez le poulet. Deux groupes de poulets ont été exposés à deux types de conditionnement où les animaux pouvaient anticiper, grâce à un stimulus sonore, la survenue immédiate ou différée (de quelques secondes) de nourriture. Un troisième groupe a été exposé aux sons et à la nourriture mais le son ne prédisait pas la survenue de nourriture.

2.4. Un cadre défini pour mener des évaluations multicritères

Afin d'éclairer les acteurs de la filière française de production de poulet « standard », une méthode d'évaluation multicritère a été développée par Le Goff *et al.* (2024a). Cette méthode a servi à l'évaluation des effets positifs et négatifs liés à l'intégration de divers leviers d'amélioration du bien-être, pour un système de production de poulets de chair standard. Cette méthode permet d'évaluer une combinaison de leviers (i.e. scénario « test ») par rapport à une situation initiale (i.e. scénario « référence »). Les effets positifs et négatifs induits sur 4 piliers (Bien-être animal, Economie, Environnement et Eleveur) sont ainsi mesurés à l'aide d'indicateurs, puis convertis en scores compris entre -3 et 3. Un score positif (respectivement négatif) reflète une amélioration (respectivement une dégradation) par rapport au scénario de « référence ».

Pour l'évaluation, un scénario « Standard » a été défini comme référence, correspondant à un élevage de poulets de souche Ross 308 à une densité maximale de 39 kg/m², sans enrichissement du milieu de vie, dans un bâtiment disposant de lumière naturelle. Ce scénario de référence correspond à un

élevage de poulet standard typique en France. Deux scénarios d'amélioration ont été définis avec des acteurs de la filière et évalués : *Standard+* et *ECC*. Ces deux scénarios ont été choisis car ils se développent progressivement sur le terrain : l'objectif est de fournir des connaissances sur ces systèmes afin d'éclairer la filière dans les choix d'orientation de la production. Par rapport au scénario de référence, seuls des enrichissements sont ajoutés dans le scénario *Standard+*, à savoir : des plateformes (1 m² pour 1000 poulets) et des blocs à picorer (8 kg pour 1000 poulets). Dans le scénario *ECC*, en plus de l'ajout des mêmes enrichissements que dans le scénario *Standard+*, la souche Ross 308 est remplacée par une souche avec une vitesse de croissance réduite (Redbro) et la densité maximale est abaissée à 30 kg/m². Ce scénario correspond aux pratiques recommandées dans l'*ECC* (*European Chicken Commitment*).

3. Vers une meilleure prise en compte des besoins des poulets en élevages commerciaux

3.1. Quels sont les besoins comportementaux des poulets ?

Le répertoire comportemental de la poule domestique (*Gallus g. domesticus*) est similaire à celui de la poule de jungle et leur motivation à exprimer leurs comportements serait semblable. Onze besoins comportementaux ont ainsi été identifiés et décrits en listant les prérequis nécessaires à leur expression, et sont illustrés dans la Figure 1 (Warin et al., 2022). Ces besoins ont été vulgarisés auprès des filières, et ont servi de base de réflexions au groupe de co-design pour imaginer des leviers d'amélioration pertinents du point de vue du poulet.

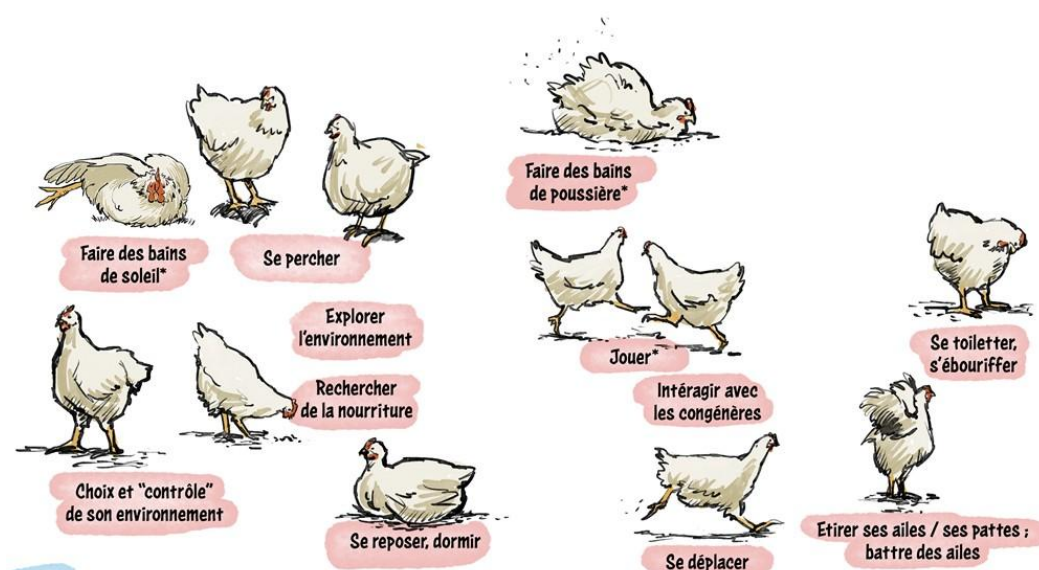


Figure 1 : Les besoins comportementaux des poulets (* = comportement associé à des émotions positives)

Texte descriptif de la figure 1

Cette illustration représente des activités essentielles réparties en grandes catégories fonctionnelles (Figure 1) : comportements de maintenance (se toiletter, se reposer, bains de poussière et de soleil), comportements locomoteurs (se déplacer, étirer les ailes), comportements exploratoires et alimentaires (explorer l'environnement, rechercher la nourriture), ainsi que comportements sociaux (interagir, jouer) et d'utilisation de l'espace (se percher, contrôler son environnement).

3.2. Les idées clés du codesign et leur perception

Les participants aux ateliers de *co-design* ont proposé différentes idées, soumises pour discussion à un panel plus large d'acteurs, puis testées sur le terrain et / ou en station expérimentales. Les principales idées proposées sont décrites dans la Figure 2.

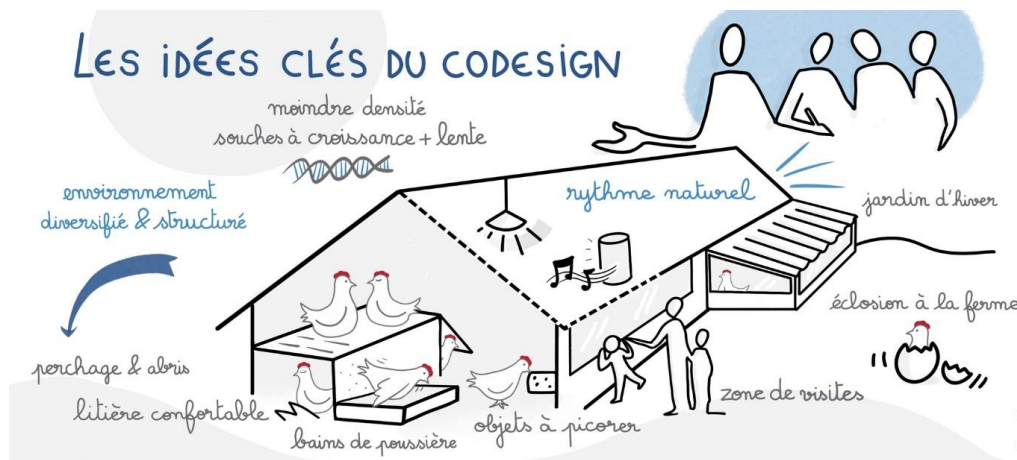


Figure 2 : Schéma d'un élevage de poulet mettant en avant les idées du co-design

Description de la figure 2

Ce schéma représente les idées clés issues du processus de co-design visant à imaginer le bâtiment d'élevage de poulets de chair de demain (Figure 2). Ces propositions répondent à plusieurs objectifs : améliorer le bien-être des éleveurs et des animaux, assurer la viabilité économique et réduire l'impact environnemental. Le bâtiment envisagé intègre un environnement diversifié comprenant des perchoirs, des abris, une litière confortable, des zones adaptées aux bains de poussière ainsi que des objets à picorer. Une grande vitre latérale est également prévue pour permettre des visites par les citoyens-consommateurs, complétée par un jardin d'hiver. D'autres aménagements visent à renforcer la naturalité des conditions d'élevage, tels que l'éclosion à la ferme, une densité réduite et l'utilisation de souches à croissance plus lente. Enfin, l'ajout de stimulations sonores, comme la diffusion de sons ou de musique, est proposé afin d'enrichir l'environnement des animaux.



Figure 3 : Schéma illustrant la représentation des idées issues du processus de codesign.

Description de la figure 3

Les retours des différents acteurs ont permis de regrouper les solutions en 3 grands groupes, tel qu'illustré en Figure 3. Quatre propositions ressortent comme des solutions pertinentes et accessibles (1) dans les choix d'évolution de la filière (les plateformes ou perchoirs, les éléments à picorer, les abris et les bacs à bain de poussière), grâce à leur intérêt pour améliorer les conditions de vie des poulets, leur perception positive par les consommateurs et des freins technico-économiques jugés comme étant modérés. Quatre autres solutions (2), propices au bien-être animal (la réduction de la



densité, des souches génétiques à croissance plus lente, la lumière naturelle, l'éclosion à la ferme), se heurtent à des difficultés technico-économiques à des niveaux variés. Enfin, trois solutions (3) interrogent encore fortement les acteurs de la filière (la structuration / diversification de l'espace de vie, le jardin d'hiver, les ambiances lumineuses et musicales) et suscitent des dissensus en ce qui concerne leur intérêt pour le BEA des poulets.

3.3. Les solutions pertinentes et accessibles déjà mises en place en élevages commerciaux

3.3.1. Des systèmes d'élevage standard qui évoluent

Ces dernières années, des cahiers des charges d'opérateurs privés ont été mis en place dans la filière pour mieux répondre aux besoins des poulets. Ceux-ci impliquent l'ajout d'enrichissements (perchoirs et objets à picorer), la baisse de densité ou encore l'utilisation de souche à croissance moins rapide que la souche de « référence » (Ross 308). Par ailleurs, en adéquation avec le Plan Ambition 2025 initié par l'Interprofession ANVOL, 56 % des bâtiments standards offrent désormais un accès à la lumière naturelle (ANVOL, 2024). En outre, d'autres évolutions portées par des ONG, comme l'*European Chicken Commitment*, sont en cours d'adoption par certains acteurs de la filière, notamment les distributeurs et acteurs de la RHD. Ces évolutions concernent une réduction de la densité à 30 kg/m² ainsi que l'utilisation de génétique à croissance moins rapide que celles classiquement utilisées. De plus, elles exigent que les bâtiments soient équipés d'enrichissements tels que des perchoirs et/ou des objets à picorer. Ces progrès en matière de bien-être animal témoignent d'une évolution forte du modèle standard des années 50 qui intègre désormais les intérêts citoyens et les avancées scientifiques au cœur de sa production.

3.3.2. Objectiver l'intérêt des évolutions mises en place actuellement

L'intérêt des enrichissements mis en place en élevages a été évalué au cours de plusieurs vagues de suivis terrain (Guérin *et al.*, 2022 ; Glet *et al.*, 2024 _ rapport de stage non publié). Les résultats indiquent que davantage de poulets explorent en présence d'un enrichissement à piquer que sans (10 % d'oiseaux/scan contre 2 %), ce qui confirme leur intérêt. Les enrichissements dégradables semblent par ailleurs être les plus attractifs pour stimuler l'exploration : ballots de paille, blocs à picorer et ficelles. Notons en outre que les objets brillants (CDs ou objets semblables) ont également été testés et qu'ils sont davantage picorés que les blocs et les ficelles (Chardon *et al.*, 2024). A l'inverse, les chainettes sont les enrichissements les moins picorés.

Les panneaux verticaux, plateformes, perchoirs en A et ballots de paille sont particulièrement plébiscités par les poulets pour se reposer. Toutefois, moins de toilettage sont constatés sur les perchoirs fins (-20 % d'oiseaux/scan se toilettent sur les perchoirs linéaires comparativement aux perchoirs plateformes). Notons par ailleurs que les bottes de paille servent à la fois de support de perchage et de picorage, ce qui leur confère un double intérêt.

Au-delà de l'évaluation de l'intérêt de ces enrichissements spécifiques, 5 systèmes de production déployés sur le terrain ont également été comparés les uns aux autres grâce aux données EBENE® collectées par des utilisateurs formés : standard réglementaire, standard avec lumière naturelle, standard avec lumière naturelle et enrichissements, ECC, ECC avec jardin d'hiver. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.



Tableau 1 : Moyennes des scores EBENE® obtenus pour les indicateurs Repos, Exploration, Toilettage, Interactions sociales et Mortalité, pour cinq systèmes de production de poulet de chair standard. Les scores sont compris entre 0 (score minimal) et 5 (meilleur score).

Modalité	ECC avec jardin d'hiver	ECC	Standard + (lumière + enrichissements)	Standard avec lumière naturelle	Standard réglementaire
Repos	4,70±0,1 ^b	4,60±0,3 ^b	3,80±1,0 ^a	3,60±1,1 ^a	3,31±1,3 ^a
Exploration	5,00±0,0 ^b	4,70±0,5 ^b	4,00±1,4 ^b	2,60±1,3 ^a	2,47±1,3 ^a
Toilettage	4,60±0,7 ^c	4,00±0,7 ^{bc}	3,40±1,5 ^b	2,20±1,1 ^a	2,05±0,9 ^a
Interactions sociales	4,80±0,6 ^c	3,80±1,8 ^b	4,10±1,0 ^{bc}	2,60±1,5 ^a	1,80±1,5 ^a
Mortalité	3,9±0,7	3,50±1,4	3,40±1,3	2,90±1,8	2,63±1,9

Globalement, les scores de comportements (repos, exploration, toilettage et interactions) sont meilleurs dans les systèmes qui incluent davantage de pratiques / équipements favorables au bien-être des poulets. L'indicateur repos octroie par exemple les meilleurs scores lorsque 30 à 50 % des animaux observés sont au repos. Dans les systèmes Standard, les poulets sont davantage au repos, ce qui explique la diminution du score EBENE® associé. Ceci peut s'expliquer par l'absence d'enrichissements et / ou de lumière naturelle, qui contribuent tous deux à stimuler l'activité des poulets. Aucune différence significative n'est observée pour l'indicateur mortalité, malgré le changement de souche pour les systèmes ECC.

L'ajout d'enrichissements adaptés aux besoins comportementaux des poulets est bénéfique pour leur bien-être. De plus, combiner plusieurs pratiques / équipements visant à améliorer le bien-être permet aux poulets d'exprimer une plus grande diversité de comportements.

3.4. Les solutions coûteuses ou dont l'intérêt reste à objectiver

Parmi les solutions coûteuses dont l'intérêt restait à objectiver, certaines ont été testées de manière contrôlée sur de grands groupes d'animaux dans la station expérimentale de l'Anses Ploufragan.

3.5. La baisse de densité pour améliorer la santé des poulets

Six souches ayant des vitesses de croissances différentes (42 à 61 g/j) ont été élevées à des densités d'environ 39 kg/m² et 30 kg/m². Le comportement des poulets (activité générale, interactions avec les enrichissements), leur santé (mortalité, problèmes de pattes, propreté et emplumement), et la qualité de la litière ont été comparés à même poids corporel (1,80 à 1,95 kg). De même, la qualité de la viande, et les performances zootechniques ont été comparées entre lots. La densité n'a pas affecté le poids, la mortalité ou les comportements. **Quelle que soit la souche, la plus faible densité était associée à une moindre prévalence de brûlures de tarse, à un meilleur score de démarche et à une amélioration de la qualité de la litière et de la propreté des poulets de chair.** Pour les trois souches les plus atteintes de pododermatites, une prévalence plus faible a été observée en faible densité comparé à la forte densité. Globalement, les performances et la qualité de la viande quant à elles n'ont pas été influencées par la baisse de densité.

3.6. Le changement de souche pour favoriser l'activité des poulets

Lors de ce même essai, la prévalence des brûlures de tarse et certains comportements (toilettage ou marche/court) n'étaient pas différents entre souches. Mais les poulets Ross 308 (croissance la plus rapide) étaient davantage inactifs, se tenaient moins debout et interagissaient moins avec les



enrichissements que les autres. D'autres indicateurs de bien-être, tels que le score de démarche et l'emplumement ont également été améliorés pour les souches ayant une vitesse de croissance plus faible. L'humidité de la litière a diminué avec la vitesse de croissance, ce qui a contribué à l'amélioration de l'état des pattes et à la propreté des bréchets. Enfin, la proportion d'oiseaux explorant était plus élevée chez les souches à vitesse de croissance plus faible. Le rendement en filet et l'efficacité alimentaire sont améliorés chez les Ross 308, mais cette souche présente une viande avec davantage de défauts musculaires et de pertes en eau. Ces résultats ont confirmé que **la réduction de la vitesse de croissance couplée à une densité d'élevage plus faible sont deux options pertinentes pour améliorer le bien-être animal des poulets élevés en claustration.**

3.7. L'ajout d'un jardin d'hiver pour stimuler l'activité des poulets

Lors d'un second essai, trois lots de 2500 poulets Redbro élevés en salles avec accès à un jardin d'hiver ouvert 24/24 dès 22 jours d'âge ont été comparés à trois lots identiques sans jardin d'hiver. Les consommations d'aliment et d'eau, la qualité de la litière, le poids, la mortalité, la santé des pattes (pododermatites et brûlures de tarses), la démarche ainsi que le niveau d'activité des animaux à l'intérieur et en jardin d'hiver ont été évalués. Il n'y a pas eu d'effet des jardins d'hiver sur les performances zootechniques. Les poulets des deux groupes n'ont pas présenté de pododermatites ou de problème de démarche mais les animaux ayant accès aux jardins d'hiver avaient moins de brûlures de tarses que ceux en claustration complète. Des données d'utilisation du jardin d'hiver ont pu être récoltées dans ces conditions : par exemple, les poulets fréquentaient davantage les jardins d'hiver jour après jour et davantage en début qu'en fin de journée, et jamais la nuit. Les poulets étaient plus actifs dans les jardins d'hiver (plus de comportements de marche et de course observés) et davantage au repos à l'intérieur des salles (plus d'animaux observés en position couchée). Néanmoins, il n'y avait pas de différence entre l'intérieur des deux types de salles.

Ces études indiquent que **le jardin d'hiver stimule l'activité des poulets et que les enrichissements en renforcent l'intérêt.** Cependant, **la faisabilité technique de la mise en place de ce levier est variable**, en fonction du système de ventilation des bâtiments en cas de rénovation, comme décrit par Aulanier *et al.*, 2024.

3.8. La structuration et la diversification de l'environnement pour laisser le choix aux poulets

Lors d'un troisième essai, trois lots de 2 500 poulets Redbro élevés en salles avec des repères visuels et de multiples éléments pour le repos ou l'exploration ont été comparés à trois lots identiques avec un minimum d'enrichissements. En plus d'indicateurs de santé et de performances zootechniques, et de mesures de l'utilisation des enrichissements, divers tests comportementaux ont été utilisés pour examiner les effets de l'environnement d'élevage sur la cognition, l'orientation spatiale et l'état émotionnel.

Une très bonne utilisation de tous les enrichissements a été constatée. Davantage de comportements d'exploration ainsi qu'une mobilité accrue ont été plus observés chez les poulets élevés dans un milieu plus structuré / diversifié. Les poulets du milieu complexe montraient une moindre réactivité face à une nouveauté témoignant d'une diminution de leurs niveaux de peur et d'anxiété. Aucune différence n'a été observée entre les groupes en termes de mortalité, de poids corporel, d'état des pattes (boiterie ou lésions) ou de qualité de litière.

Ces résultats montrent **qu'un environnement complexe favorise les comportements locomoteurs et d'exploration, réduit la réactivité émotionnelle et améliore ainsi le bien-être des poulets de chair, sans conséquences sur les critères de performances économiques.**



3.9. La combinaison de solutions prometteuses pour plus de bien-être ?

Le dernier essai réalisé à l'Anses compilait les solutions expérimentées précédemment en étudiant trois leviers d'amélioration de l'élevage tout en conservant un impact économique limité : une souche à croissance modérée en claustration, l'apport d'environnement structuré et enrichi pour une souche à croissance rapide, l'apport d'un jardin d'hiver pour une souche à croissance rapide. Cet essai a permis de confirmer les tendances préalablement observées : entre autres, **une bonne utilisation du jardin d'hiver mêmes chez les poulets à croissance rapide, avec des comportements « positifs » observés à cet endroit, une utilisation des enrichissements favorisant l'exploration dans tout le système, l'intérêt de souche à croissance modérée pour favoriser la mobilité des poulets de chair.**

3.10. L'anticipation d'évènements positifs comme levier d'amélioration du bien-être ?

L'essai complémentaire et plus exploratoire mené sur le site INRAE a mis en évidence que les poulets étaient capables d'apprendre et d'associer un son à un évènement (survenue de nourriture). Des tests comportementaux individuels n'ont en revanche pas révélé d'effet de ces apprentissages sur la réactivité émotionnelle des animaux, leur sociabilité ou encore leur capacité d'apprentissage.

Les essais menés indiquent que la mise en place d'une variété d'éléments dans l'environnement d'élevage peut être un moyen prometteur de faire évoluer la production standard de poulets de chair vers des systèmes de production qui répondent mieux aux besoins des animaux, tout en préservant les performances technico-économiques. Certaines de ces solutions doivent encore faire leur preuve en élevages commerciaux (ex : complexification du milieu de vie), ou être affinées en station expérimentale (ex : anticipation).

4. Des effets multicritères contrastés en fonction des évolutions retenues

4.1. Définition des scénarios

Les idées les plus prometteuses et pertinentes suite aux essais et aux échanges avec les participants ont été combinées pour construire des scénarios, dont la faisabilité a été évaluée. Un scénario de référence et deux scénarios d'évolution (Standard+ et ECC) ont été définis comme illustré sur la Figure 4 ci-dessous.

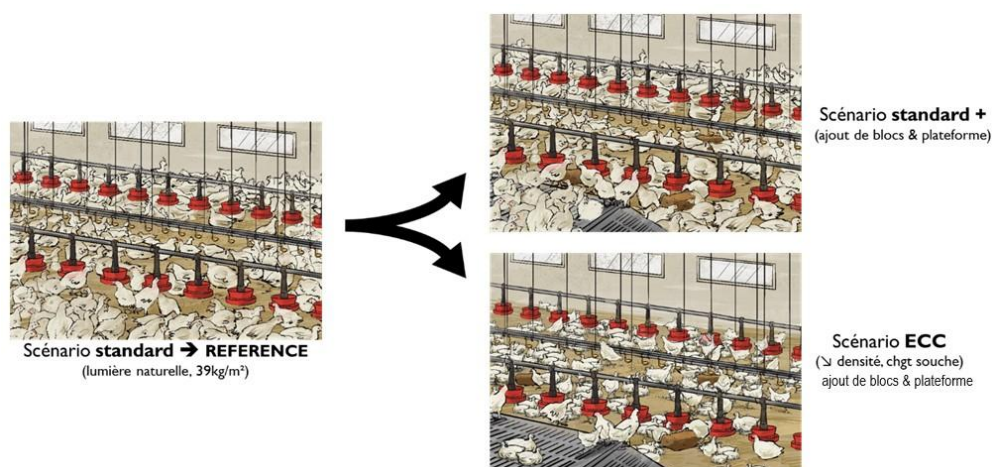


Figure 4 : Illustration de deux scénarios d'amélioration du bien-être du poulet de chair

Sur cette illustration (Figure 4), l'évaluation d'un scénario intégrant des leviers BEA s'effectue par comparaison avec un scénario de référence qui n'en comporte pas, afin d'en mesurer les effets. Deux scénarios innovants, Standard+ (en haut à droite) et ECC (en bas à droite), ont été élaborés en collaboration avec des acteurs de la filière puis évalués. Le scénario Standard correspond au scénario de référence. Il se caractérise par un bâtiment bénéficiant de l'accès à la lumière naturelle, l'utilisation d'une souche à croissance rapide et une densité de 39 kg/m². Le scénario Standard+ s'en distingue par l'ajout de blocs à piquer et de plateformes. Enfin, le scénario ECC se différencie par une densité réduite ainsi que par l'emploi d'une souche à croissance plus lente, combinés à des blocs à piquer et des plateformes. Ces deux scénarios ont été retenus car ils se développent progressivement sur le terrain. L'objectif est d'acquérir des connaissances sur ces systèmes afin d'éclairer les choix d'orientation de la production au sein de la filière.

4.2. Deux scénarios d'amélioration aux effets variés

Les résultats de l'évaluation sont décrits sur la Figure 5 avec les scores de dégradation et d'amélioration (-3 à +3) pour chaque pilier considéré (Le Goff et al., 2024b). Au sein de chaque pilier, 2 à 3 composantes permettent d'apprécier plus finement les effets induits.

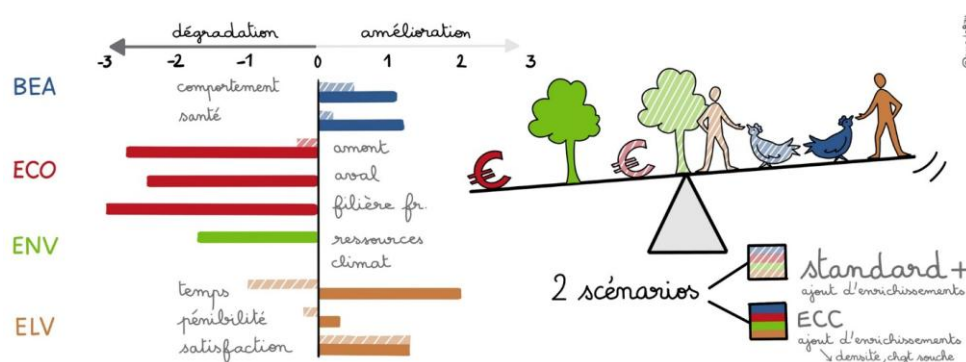


Figure 5 : Diagramme permettant de visualiser les impacts négatif ou positif des deux scénarios pour les quatre piliers retenus (BEA : bien-être animal, ECO : économie, ENV : environnement, ELV : travail et satisfaction de l'éleveur)

Description de la figure 5

Les dispositifs mis en place dans le scénario Standard + entraîne une légère amélioration de la santé des animaux grâce à une augmentation de leur activité (Figure 5). Toutefois, il génère des coûts liés aux enrichissements, ce qui dégrade légèrement les performances économiques, sans effet environnemental notable. Il implique également une augmentation du temps de travail des éleveurs, avec une pénibilité liée à la gestion des équipements. Le scénario ECC améliore le bien-être animal et favorise l'expression des comportements naturels, avec un effet positif modéré sur la santé. En revanche, il engendre une hausse des coûts de production, une baisse de productivité et des risques économiques pour la filière. Son impact environnemental est globalement neutre, et il permet une réduction du temps de travail des éleveurs, améliorant leurs conditions de travail malgré des incertitudes sur sa durabilité.

PILLIER	COMPOSANTE	SCENARIO	SCORE
BEA	Comportement	Standard +	0,5
BEA	Comportement	ECC	1
BEA	Santé	Standard +	0,2
BEA	Santé	ECC	1
ECO	Amont	Standard +	0,2
ECO	Amont	ECC	- 3
ECO	Aval	Standard +	0



ECO	Aval	ECC	- 2,5
ECO	Filière fr	Standard +	0
ECO	Filière fr	ECC	- 3
ELV	Temps	Standard +	- 1
ELV	Temps	ECC	2
ELV	Pénibilité	Standard +	- 0,2
ELV	Pénibilité	ECC	0,5
ELV	Satisfaction	Standard +	1,5
ELV	Satisfaction	ECC	1,5

Les deux scénarios améliorent le bien-être animal (**BEA**), avec une amélioration plus forte pour le scénario *ECC*, qui est liée à la combinaison de davantage de solutions. Le scénario *Standard+* favorise l'activité des poulets et permet notamment le perchage grâce aux enrichissements. Les changements de souche et de densité du scénario *ECC* stimulent d'autant plus certains comportements actifs, et des améliorations notables sont également observées sur la santé avec une réduction des problèmes de démarche, des pododermatites et de la mortalité (Foreau *et al.*, 2024).

Sur le pilier économie (**ECO**), les enrichissements génèrent un surcoût d'investissement, dont l'impact sur le coût de production reste très limité dans le scénario *Standard+*. Le scénario *ECC* entraîne quant à lui une baisse de 35 % de la productivité annuelle du bâtiment (vitesse de croissance réduite + moindre densité) et une moindre efficacité alimentaire des animaux / augmentation de l'indice de consommation (changement de souche), ce qui augmente considérablement les coûts de production par tonne de vif. Cette moindre productivité accroît également le risque d'augmentation des importations de viande de poulet, pour subvenir aux besoins des consommateurs français.

Aucune répercussion environnementale (**ENV**) n'a été mise en évidence au regard des hypothèses formulées pour le scénario *Standard+*. En revanche, la moindre productivité du scénario *ECC* entraîne une moindre efficacité d'utilisation des ressources (énergie, eau, utilisation des sols). Dans le cadre de l'analyse, les effets sur le changement climatique du scénario *ECC* sont contrastés et nécessitent davantage de données pour conclure.

Les effets sur le quotidien des éleveurs (**ELV**) sont contrastés pour ces deux scénarios. La mise en place des enrichissements engendre une augmentation du temps de travail annuel de 4,7 % dans le scénario *Standard+* ainsi qu'une pénibilité accrue (manutention, nettoyage). En revanche, le scénario *ECC* implique une réduction du temps de travail (-10 % de temps passé sur l'élevage, en heures par an) en raison d'un nombre plus faible de lots par an (7 lots/an en système standard vs. 5,9 lots/an en *ECC*). Le scénario *ECC* serait par ailleurs plus plaisant au quotidien pour l'éleveur que le scénario *Standard+*, et renverrait une image plus positive, en lien notamment avec le levier « réduction de la densité animale », plébiscité par les citoyens. En revanche, les éleveurs ont moins confiance dans l'avenir avec le scénario *ECC* qu'avec le scénario *Standard+*. Les arguments mis en avant pour le scénario *ECC* sont la baisse de production et par conséquent la moindre rentabilité économique de l'atelier, et surtout l'inquiétude de savoir si le consommateur sera prêt à payer ou non pour des produits plus chers issus de ce mode de production « *premium* ».

L'ajout d'enrichissements seuls apparaît comme un compromis acceptable pour améliorer le bien-être des poulets à moindre coût (*Standard+*). Pour améliorer davantage le bien-être des poulets (ex : scénario *ECC*), les surcoûts non négligeables associés devront faire l'objet de discussions sur la répartition des surcoûts dans la filière et le consentement à payer réel des consommateurs.



5. Conclusions et perspectives

Les évolutions en matière de bien-être du poulet de chair portées par les filières démontrent les efforts importants déployés pour améliorer les conditions d'élevage. Malgré un contexte économique propice aux importations, les éleveurs adaptent leur pratique d'élevage pour répondre aux cahiers des charges qui évoluent au gré des nouvelles connaissances, transmises notamment au cours du projet COCORICO. La lumière naturelle, l'ajout de plateformes ou d'objets à picorer répondent à des besoins comportementaux essentiels pour les poulets, et sont depuis peu couramment installés dans les bâtiments d'élevage. Les résultats du projet ont aidé à la construction de sens autour de ces évolutions, qui ont un réel intérêt pour les animaux si les équipements sont adéquats (taille, revêtement, emplacement, ...). Toutes ces évolutions en faveur du bien-être animal doivent cependant être évaluées en prenant en compte le point de vue de l'éleveur, et les effets sur l'environnement et l'économie. Cette vision multicritère est indispensable pour assurer la viabilité des évolutions proposées. Des effets contrastés et plus ou moins forts selon les leviers d'amélioration du bien-être considérés ont été mis en évidence. De plus, les travaux ont permis de quantifier les effets antagonistes BEA vs. Economie, qui restent cependant modérés lorsque seuls des enrichissements sont intégrés au système, sans changer la souche ou la densité. Des effets plutôt positifs du point de vue de l'éleveur (hors rémunération) ont été mis en évidence, notamment lorsque la densité et / ou la souche sont modifiée, ce qui allège le temps de travail et la pénibilité.

Des voies réalistes d'amélioration du bien-être existent pour le poulet standard. Pour des évolutions plus importantes, différentes stratégies peuvent être adoptées en fonction des priorités. Par exemple, le levier principal pour stimuler l'activité est le changement de souche ou l'ajout d'un jardin d'hiver. De même, le levier principal pour limiter les pododermatites consiste à réduire la densité. En revanche, certains leviers sont aujourd'hui peu étudiés (ex : jardin d'hiver) et leur faisabilité (technique, économique) n'est pas avérée. Ces travaux doivent donc se poursuivre pour aiguiller au mieux les filières, tout en considérant d'autres leviers prometteurs identifiés ici (ex : milieu complexe). Enfin, les évolutions envisagées sont généralement associées à des surcoûts qu'il conviendra d'abord de chiffrer avant d'engager une réflexion sur la répartition de ceux-ci dans la filière en lien avec le consentement à payer du consommateur.

Ethique

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.

ORCID des auteurs

Auriane Foreau : [0009-0009-2165-5325](https://orcid.org/0009-0009-2165-5325)

Laurine Messenger : [0009-0009-5399-7135](https://orcid.org/0009-0009-5399-7135)

Elsa Delanoue : [0009-0001-4086-7376](https://orcid.org/0009-0001-4086-7376)

Maryse Guinebretière : [0000-0002-9967-5512](https://orcid.org/0000-0002-9967-5512)



Frédérique Mocz : [0009-0009-6296-2153](https://orcid.org/0009-0009-6296-2153)

Clémence Lesimple : [0000-0003-0664-1151](https://orcid.org/0000-0003-0664-1151) - ORCID

Ludovic Calandreau : [0000-0002-7535-5733](https://orcid.org/0000-0002-7535-5733)

Elisabeth Duval : [0000-0002-0712-5549](https://orcid.org/0000-0002-0712-5549)

Bertrand Méda : [0000-0002-1233-2710](https://orcid.org/0000-0002-1233-2710)

Contributions des auteurs à l'article

Laura Warin : Rédaction - version originelle

Auriane Foreau : Rédaction - Révision et corrections

Laurine Messenger : Rédaction - Révision et corrections

Isabelle Bouvarel : Rédaction - Révision et corrections

Elsa Delanoue : Rédaction - Révision et corrections

Solenn Fassion : Rédaction - Révision et corrections

Maryse Guinebretière : Rédaction - Révision et corrections

Frédérique Mocz : Rédaction - Révision et corrections

Clémence Lesimple : Rédaction - Révision et corrections

Félicie Aulanier : Rédaction - Révision et corrections

Ludovic Calandreau : Rédaction - Révision et corrections

Elisabeth Duval : Rédaction - Révision et corrections

Bertrand Méda : Rédaction - Révision et corrections

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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 animaliers, techniciens et responsables d'exploitation pour le bon déroulé des essais expérimentaux, ainsi qu'aux éleveurs pour leur implication, et à toutes les personnes sollicitées lors des réunions et enquêtes. Merci également aux partenaires non financés pour leur implication dans le projet (comités de pilotage, technique, et *codesign*).

Déclaration de soutien financier

Cet article a été rédigé dans le cadre collaboratif des UMT BECOME et SANIVOL avec le soutien financier du fonds CASDAR, de l'interprofession ANVOL ainsi que du CIPC, du SYNALAF et de France 2030/ Territoires d'Innovation.

Références bibliographiques

ANSES. (2018). Avis de l'ANSES Saisine n° 2016-SA-0288.

Aulanier, F., Guillou, G., & Warin, L. (2024). Jardin d'hiver en élevages de poulets de chair : État des lieux des contraintes et solutions pour sa construction et gestion. *Revue Chambre d'Agricultures et Territoires*.



Chardon, C., Drouet, A., Besson, M., Warin, L., Messenger, L., & Loiseau, P. (2024). Effet de différents enrichissements sur les comportements de perchage et de picorage des poulets de chair en conditions claustrées. In *Quinzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours*.

Foreau, A., Le Goff, M., Meda, B., & Warin, L. (2024). Évaluation de l'intérêt de différents leviers pour améliorer le bien-être du poulet de chair. In *Quinzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours*.

Guerin, E., Stomp, M., Brajon, S., Aulanier, F., Leroux, M., Warin, L., & Bouvarel, I. (2022). Évaluation d'enrichissements pour améliorer le bien-être des poulets de chair. In *Quatorzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours*.

Le Goff, M., Warin, L., Foreau, A., Bouvarel, I., & Meda, B. (2024a). Leviers d'amélioration du bien-être en filière poulet « standard » : Comment évaluer leurs effets sur l'économie, l'environnement et le travail ? In *Quinzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours*.

Le Goff, M., Meda, B., Foreau, A., Bouvarel, I., & Warin, L. (2024b). Évaluation multicritère de deux scénarios visant à améliorer le bien-être du poulet standard sur l'économie, l'environnement et le travail de l'éleveur. In *Quinzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours*.

Warin, L., Guinebretière, M., Bellegarde, L., Brajon, S., Burgaud, F., Gregorio, E., Guerin, E., Le Bihan Duval, E., Reverchon-Billot, L., Warin, A., & Arnould, C. (2022). Quels sont les besoins comportementaux de l'espèce *Gallus gallus domesticus* ? In *Quatorzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours*.

Warin, L., Lafaiage de Gaillard, C., Bouvarel, I., & Delanoue, E. (2023). Améliorer le bien-être des poulets en élevage standard : Évaluations croisées de solutions. *TEMA*, 66, 11–21.

Pour citer cet article : Laura WARIN, Auriane FOREAU, Laurine MESSAGER, Isabelle BOUVAREL, Elsa DELANOUE, Solenn FASSION, Maryse GUINEBRETIERE, Frédérique MOCZ, Clémence LESIMPLE, Félicie AULANIER, Ludovic CALANDREAU, Elisabeth DUVAL & Bertrand MEDA, 2026 - Stratégies d'amélioration du bien-être des poulets élevés en système standard. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-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.



Utilisation des typologies de sols TypTerres pour améliorer le conseil agronomique

Laure SOUCEMARIANADIN¹, Lionel BARGEOT², Jean-Yves CAHUREL³, Bertrand LAROCHE⁴, Sébastien MINETTE⁵, Jean-Pascal Mure⁶, Fiona OBRIOT⁷, Anne-Sophie PERRIN⁸, Joëlle SAUTER⁹, Véronique STANGRET¹⁰, Romain TSCHEILLER¹¹, Matthieu VALE¹²

¹ Acta-les instituts techniques agricoles – 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

² Agaric-IG – 144 rue Rambuteau, 71000 Mâcon, France

³ Institut Français de la Vigne et du Vin Pôle Bourgogne, Beaujolais, Jura, Savoie – 210 boulevard Victor Vermorel, 69400 Villefranche-sur-Saône, France

⁴ INRAE - Unité Info&Sols – 2163 Avenue de la Pomme de Pin, 45075 Orléans, France

⁵ Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine – Service IRD, INRAE les Verrines, 86600 Lusignan, France

⁶ Chambre d'Agriculture de l'Isère – 27 rue Denfert Rochereau, 38200 Vienne, France

⁷ Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche (LDAR) du Conseil départemental de l'Aisne – Zone d'activités du Griffon 180 rue Pierre-Gilles de Gennes, 02007 Barenton-Bugny - Laon cedex, France

⁸ Terres Inovia – DAGRO – 1000 Avenue Agropolis, 34394 Montpellier Cedex 5, France

⁹ Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est – 2 Rue de Rome CS 30022 Schiltigheim, 67013 Strasbourg Cedex, France

¹⁰ EPLEFPA du Bas-Rhin – 44 bd de l'Europe, 67212 Obernai cedex, France

¹¹ Arvalis – 110 chemin de la côte vieille, 31450 Baziège, France

¹² Auréa AgroSciences – 270 Avenue de la Pomme de Pin, 45160 Ardon, France

Correspondance : laure.soucemarianadin@acta.asso.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art08>

Résumé

Le projet IDTypTerres visait à accompagner concepteurs et utilisateurs d'outils d'aide à la décision (OAD) et de modèles sol-dépendants (*i.e.*, nécessitant un paramétrage précis des caractéristiques du sol), pour une meilleure performance du conseil agronomique, en s'appuyant sur les typologies agronomiques TypTerres. Ce sont des typologies de sols dont les spécificités permettent de répondre au mieux aux besoins des conseillers et des agriculteurs dans la prise de décision agronomique. Cet article détaille comment les clés de détermination des unités TypTerres constituent un outil essentiel pour l'accompagnement de l'utilisateur. Les outils informatiques d'aide au choix du type de sol développés dans le projet sont présentés. Une synthèse des tests d'intégration des typologies TypTerres dans plusieurs OAD et un retour d'expérience d'élèves en bac+2 sur l'intégration des typologies agronomiques des sols dans la formation sont ensuite exposés avant d'évoquer les perspectives.

Mots-clés : Typologies de sols, TypTerres, outils d'aide à la décision, clé de détermination, accompagnement utilisateurs, conseil agronomique

Abstract: Using TypTerres soil typologies to improve agronomic advice

The aim of the IDTypTerres project was to help designers and users of decision-support tools (DSTs) and soil-dependent models to improve the performance of agronomic advice, using TypTerres



agronomic typologies. TypTerres are soil typologies with specific features that make them particularly well-suited to the needs of advisors and farmers in agronomic decision-making. This article explains how the TypTerres units' identification keys are an essential tool for assisting users. The application programming interface and other tools developed during the project to help users choose the adequate soil type are presented. A summary of tests on the integration of TypTerres typologies into DSTs, based on two tools and a model for managing nitrogen fertilisation as well as feedback from students, pursuing a two-year technical degree in agriculture, on the integration of agronomic soil typologies into training are then presented, followed by a discussion of prospects for future uses.

Keywords: soil typology, TypTerres, decision-support tools, identification key, user support, agronomic advice

1. Contexte et enjeux

Dans un contexte de transition agroécologique, il est crucial de mieux accompagner les conseillers et les agriculteurs dans l'identification des sols et l'intégration de leurs propriétés dans les activités de conseil (Brevik *et al.*, 2016).

Les outils d'aide à la décision (OAD) et modèles agronomiques nécessitant un paramétrage précis des caractéristiques des sols, ou sol-dépendants, constituent un élément essentiel de la transition agroécologique et peuvent permettre une meilleure prise en compte des sols dans la gestion agroenvironnementale. Or la performance de ces outils et modèles est directement liée à la connaissance des sols et de leurs propriétés : le choix du bon type de sol (= représentatif de la situation réelle) est le premier facteur influençant le conseil. C'est pourtant cette étape qui est souvent source de difficultés et confusions pour les utilisateurs (Soudière, 2011). Chaque outil dispose en effet de sa propre liste de sols à laquelle l'utilisateur doit rattacher le sol d'une parcelle (ou lot de parcelles). Or les listes de sols des OAD :

- sont souvent trop restreintes pour couvrir de manière exhaustive la diversité du terrain ;
- peuvent avoir des noms différents pour un type de sol identique ;
- incluent des noms de sol qui ne sont pas toujours compréhensibles par les utilisateurs.

Les deux premiers constats ont respectivement pour conséquence que l'utilisateur 1/ peut ne pas trouver de sol correspondant à celui présent sur sa parcelle dans la liste proposée et doit donc faire un rattachement imparfait ; 2/ doit identifier un type de sol pour ses parcelles à chaque fois qu'il utilise un nouvel outil.

Des données de caractérisation des sols issues des programmes de cartographie systématique sont disponibles à l'échelle nationale mais ces données ne sont pas directement utilisables par les non-pédologues car elles emploient des nomenclatures scientifiques, peu connues des acteurs de terrain. Et l'échelle à laquelle sont réalisées ces cartes n'est pas adaptée pour une utilisation à la parcelle. C'est pourquoi les typologies agronomiques des sols nommées TypTerres ont été développées : elles s'appuient sur des données spatialisées standardisées et robustes mais permettent de caractériser des données ponctuelles de manière simplifiée.

L'objectif de cet article est ainsi de présenter les typologies de sols TypTerres et quelques résultats du projet IDTypTerres focalisés sur différents outils développés autour de ces typologies pour accompagner les conseillers voire les agriculteurs dans l'identification des sols, avec moins d'erreurs.



2. De la création des TypTerres à leur utilisation en situation de conseil

2.1. Construction des typologies agronomiques

Les TypTerres, développées au sein du RMT Sols et Territoires (<https://sols-et-territoires.org/produits-du-rmt/typterres>), sont des typologies de sols à vision agronomique, c'est à dire opérationnelles pour le conseil et le diagnostic agronomique. Les données de sols harmonisées et exhaustives, issues de la cartographie systématique des sols au 1/250 000 qui constituent les référentiels régionaux pédologiques (RRP ; Laroche *et al.*, 2014), sont mobilisées pour créer un dialogue entre agronomes et pédologues et in fine créer des types de sol nommées unités TypTerres (UTT) (Figure 1). Les TypTerres regroupent ainsi les sols selon leurs propriétés ayant un intérêt agronomique.

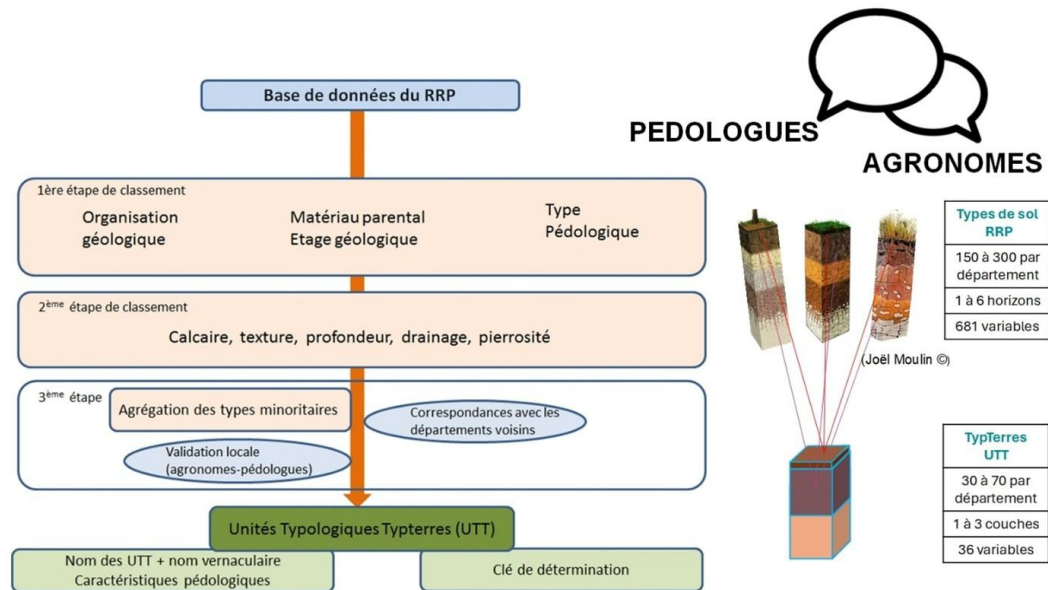


Figure 1 : Les typologies agronomiques TypTerres, issues d'un dialogue entre agronomes et pédologues, à partir des données de la cartographie des sols au 1/250 000 (d'après Laroche *et al.*, 2020)

Description de la figure

Trois étapes de classement et d'agrégation permettent de former des unités de sol TypTerres à partir des types de sols décrits dans les référentiels régionaux pédologiques ou RRP. L'objectif est de regrouper tous les sols ayant un comportement similaire d'un point de vue agronomique et ceci se fait via un dialogue entre pédologues et agronomes.

La 1^{re} étape regroupe les sols des RRP ayant des géologies similaires. La 2^e étape s'appuie sur 5 critères pour faire les regroupements : teneur en calcaire, texture du sol, profondeur du sol, drainage du sol et pierrosité. La 3^e étape finalise les regroupements en agrégeant les types de sols minoritaires. Cette étape inclut aussi la validation des regroupements avec les agronomes et l'établissement de correspondances avec les regroupements établis dans les départements voisins.

Ces différentes étapes d'agrégation permettent de passer, pour un département, de 150 à 300 types de sols dans les RRP à 30 à 70 unités TypTerres. L'objectif de simplification concerne aussi la description du sol : là où un type de sol dans le RRP peut avoir jusqu'à 6 horizons pédologiques, les unités TypTerres n'ont pas plus de 3 couches. Dans la base de données des RRP, un type de sol est décrit par 681 variables alors qu'une unité TypTerres a 36 variables associées. Ces dernières sont les plus utiles pour le conseil agronomique. Chaque unité TypTerres a un nom simple dont la structure est normalisée et peut aussi avoir un nom vernaculaire lorsqu'il existe localement. Des clés de détermination peuvent être créées pour aider à identifier les différentes unités TypTerres d'une typologie.



2.2. Pourquoi des TypTerres ?

Les typologies agronomiques TypTerres ont été développées pour faciliter le conseil agronomique ou environnemental et répondre notamment aux besoins des utilisateurs d'outils d'aide à la décision sol-dépendants : elles sont simples (vocabulaire compréhensible, nombre de types de sol raisonnable), harmonisées, utilisables à différentes échelles... Elles ont pour ambition :

- d'identifier les sols de manière simplifiée par rapport à des données « sol », de référence, déjà disponibles (RRP), qui sont reconnues et acceptées mais pas mobilisables par les utilisateurs non-experts ;
- de rendre l'usage des outils de conseil et d'aide à la décision « sol dépendants » plus pertinent ;
- de proposer un langage commun et partagé permettant les échanges entre organismes et territoires et d'établir les liens entre agronomes et pédologues d'un même territoire.

Ce dernier point répond directement à une préconisation du CESE (Courtoux et Claveirole, 2015) sur la mutualisation des connaissances, des terminologies et des référentiels entre les experts et les usagers pour une meilleure gestion des sols agricoles. Il s'agit :

- de réaliser des synthèses territoriales en valorisant des données sol de différentes origines qui soient harmonisées ;
- de permettre l'utilisation d'une typologie de sols unique, mobilisable aussi bien par les laboratoires d'analyse de sol, différents réseaux d'acquisition de références que les outils de conseil (dont OAD) ;
- d'aider les agriculteurs et leurs conseillers à mieux connaître leurs sols, à réduire les erreurs lors du rattachement de ces sols à des référentiels de conseil ;
- de favoriser la prise en compte de la diversité des sols dans les formations des établissements d'enseignement agricole ;
- et de faciliter à terme une harmonisation interrégionale, voire nationale des typologies de sols TypTerres.

2.3. Le projet IDTypTerres

2.3.1. Les objectifs d'IDTypTerres

Le projet IDTypTerres s'est construit autour de l'exploitation des typologies agronomiques des sols et de la mise en œuvre d'outils informatiques dédiés. La finalité du projet était d'accompagner concepteurs et utilisateurs outils d'aide à la décision et modèles sol-dépendants, pour une meilleure performance du conseil agronomique en répondant à quatre objectifs opérationnels :

- améliorer le paramétrage des OAD en constituant des références agronomiques harmonisées et accessibles au plus grand nombre ;
- aider les utilisateurs des OAD dans le choix des types de sol ;
- mettre en place les conditions pour intégrer les données TypTerres dans les outils d'aide à la décision, en développant des outils interopérables ;
- informer et former aux outils développés dans le projet et aux caractéristiques des principaux types de sols
- le projet avait trois publics cibles principaux : les producteurs des typologies TypTerres, les développeurs d'OAD et les utilisateurs d'OAD (conseillers, apprenants « futurs conseillers » et agriculteurs).



2.3.2. Un partenariat adapté

L'originalité et la robustesse du projet reposent sur la constitution d'un consortium pluridisciplinaire de 15 partenaires, implantés sur plusieurs régions, et qui couvrent l'ensemble des acteurs nécessaires à la construction de ces outils et à leur opérationnalisation. Il a ainsi permis de fédérer les territoires ayant développé une typologie TypTerres avant le dépôt du projet, assurant une coopération interrégionale structurée.

Ce rassemblement des acteurs a permis la capitalisation des expériences et des savoir-faire, condition indispensable à l'élaboration de développements méthodologiques et informatiques répliquables.

3. Quelques résultats phares du projet

3.1. Les clés de détermination, un outil essentiel pour l'accompagnement de l'utilisateur

Les typologies TypTerres, avec leur règle de nommage simplifiée, sont plus compréhensibles par les acteurs agricoles non-pédologues, mais il faut encore accompagner l'utilisateur de l'OAD dans le choix de la bonne unité TypTerres.

Pour cela, pour chaque typologie TypTerres, en plus de la liste des unités et du tableau regroupant les variables pédologiques pour chacune des couches des unités, les producteurs de ces typologies peuvent créer des clés de détermination. Ces dernières sont des arbres de décision composés de questions successives simples et qui permettent de sélectionner, parmi la liste d'unités disponibles, une unité TypTerres (UTT) unique.

3.1.1. Une méthodologie pour construire les clés de détermination des unités TypTerres

Dans le cadre du projet, un guide méthodologique a été élaboré pour aider les producteurs de TypTerres dans la construction des clés de détermination. Un questionnaire d'enquête a été diffusé largement en ligne sur l'ensemble du territoire hexagonal auprès des concepteurs de diagnostics de sols ou de typologies de sols. Les données collectées via le questionnaire ont ensuite été traitées et hiérarchisées avant d'être évaluées et complétées au cours de trois ateliers qui ont permis de discuter les différents critères mobilisables pour qualifier un sol. Sur les 26 critères cités par les répondants, 14 critères (profondeur, proportion de cailloux, texture...) ont été identifiés comme a priori indispensables, 7 critères comme importants et 5 critères apparaissent secondaires (Tableau 1). Pour compléter les résultats du questionnaire, treize clés de détermination des sols existantes ont également été analysées. C'est la synthèse de l'ensemble de ces éléments qui a permis d'aboutir au rapport « Expertise des critères indispensables pour la réalisation de clé de détermination des sols dans le cadre d'une mise en œuvre d'une démarche TypTerres » (https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_420).

Tableau 1 : Pourcentage de mobilisation des critères proposés dans le questionnaire d'enquête pour identifier un sol



Critères pouvant être mobilisés pour identifier un sol	Nombre de réponses	Mobilisation du critère
Critères a priori indispensables (fortement utilisés) > 70 %		
Caractérisation de la profondeur du sol	21	95 %
Proportion de cailloux / graviers en surface (éléments grossiers)	23	91 %
Caractérisation de la texture de surface	23	91 %
Appartenance à une zone géographique (administrative ou géographique)	24	88 %
Caractérisation de l'hydromorphie en surface	24	88 %
Teneur en calcaire	21	86 %
Position dans le paysage (bas de pente, plateaux...)	24	83 %
Nature du substrat, matériau parental...	21	81 %
pH du sol (acide/basique)	21	76 %
Pente de la parcelle	24	75 %
Caractérisation de l'hydromorphie en profondeur	24	75 %
Type de cailloux par classe (calcaire, grès, silex...)	23	74 %
Caractérisation de la couleur	23	74 %
Présence de fente de retrait (indication de présence d'argile)	23	73 %
Critères importants [50 %-70 %]		
Caractérisation de la battance	24	63 %
Taille des éléments grossiers	23	61 %
Forme des cailloux (rond, anguleux...)	23	61 %
Position par rapport à un cours d'eau	24	58 %
Caractérisation du relief (forme : concave, convexe)	24	58 %
Caractérisation de la profondeur d'enracinement	21	57 %
Présence de plantes bioindicatrices (prêle, mercuriale...)	21	52 %
Critères secondaires mais pouvant être nécessaires pour des typologies locales < 50 %		
Caractérisation de la CEC	21	48 %
Comportement de la culture	21	38 %
Présence de fossiles	21	33 %
Capacité de ressuyage	23	30 %
Caractérisation de la portance	21	10 %

3.1.2. Tests des clés de détermination dans différents contextes

Les clés de détermination ont été testées dans plusieurs territoires avec différents types d'acteurs. Ces premiers tests ont été fondamentaux pour l'amélioration des clés. A titre d'exemple, pour les départements 79 et 86, 2 à 3 réunions, par département, ont été nécessaires pour finaliser et valider les clés de détermination (critères retenus, ordre des critères, etc.). Ces réunions regroupaient des conseillers aguerris et novices.

Des guides ont été créés pour accompagner les conseillers dans l'utilisation de ces clés de détermination (https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_421 et https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_422).



3.2. Les outils informatiques d'aide à l'identification du type de sol

Une action du projet était dédiée à la préparation d'une plateforme qui permette la diffusion des TypTerres à l'aide de clés de détermination. Dans ce but, un ensemble de composants logiciels open source permettant la diffusion des données et leur méthode de déploiement a été créé.

3.2.1. Application de saisie des clés de détermination des unités TypTerres

En se basant sur des outils existants, le projet a permis le développement d'une application de saisie des clés de détermination ergonomique et facile à prendre en main (Figure 2).

Cette application, au format API (interface de programmation d'application)⁹, est dédiée aux producteurs des TypTerres.

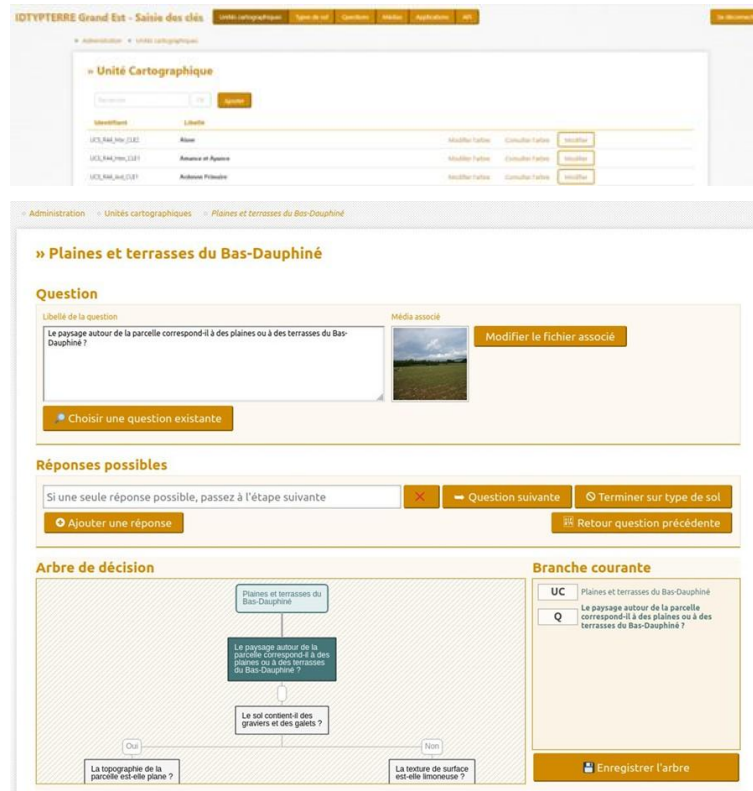


Figure 2 : Capture d'écran de l'application de saisie des clés de détermination a) composée de 4 onglets principaux (Unité cartographique, Types de sols, Questions, Médias) et b) détail de l'onglet Questions

Description de la figure

L'application de saisie des clés de détermination est composée de 4 onglets principaux :

- *unité cartographique* ;
- *types de sols* ;
- *questions* ;
- *médias*.

L'onglet « Unité cartographique » permet de lister les différentes unités géographiques servant de base aux clés de détermination associées à une typologie TypTerres. Ça peut être par exemple une petite région naturelle.

⁹ Interface logicielle qui permet de « connecter » un logiciel ou un service à un autre logiciel ou service afin d'échanger des données et des fonctionnalités (CNIL, <https://www.cnil.fr/fr/definition/interface-de-programmation-dapplication-api>)

L'onglet « Questions » permet de construire la clé de détermination associée à chaque unité cartographique. Le producteur de TypTerres saisit chaque question et les différentes réponses possibles. Un panneau permet de visualiser l'arbre de décision en construction avec les différentes questions successives et réponses possibles.

L'application de saisie et de diffusion est disponible en code source ouvert sur la forge collaborative GitHub (<https://github.com/AgaricIG/IDTypTerre>). Elle doit être installée sur un serveur et paramétrée. Agaric-IG propose une offre de service permettant la mise à disposition de l'application et d'un espace sur un serveur informatique pour déposer les données ainsi qu'une sécurisation de l'application et des données, accompagnée d'une garantie de service. La mutualisation de l'offre permet de proposer des coûts réduits d'accès à ces services pour les producteurs de TypTerres intéressés.

3.2.2. Consultation des clés de détermination et choix d'une unité TypTerres

L'application finale d'utilisation des clés de détermination (= identification de l'UTT ; Figure 3) permet à l'utilisateur de déterminer la ou les unités TypTerres sur le terrain. Elle a pour vocation d'être intégrée dans une application hôte, comme un outil d'aide à la décision pour des agriculteurs. Une application hôte de base, nomade, qui permet d'exploiter les clés de détermination saisies dans l'application a été développée. Elle a plusieurs objectifs :

- servir de démonstrateur pour le projet ;
- servir d'application de base aux partenaires qui n'auraient pas d'outil d'aide à la décision ;
- alimenter une documentation pour configurer l'utilisation de l'API Sol IDTypTerres dans les OAD existants.

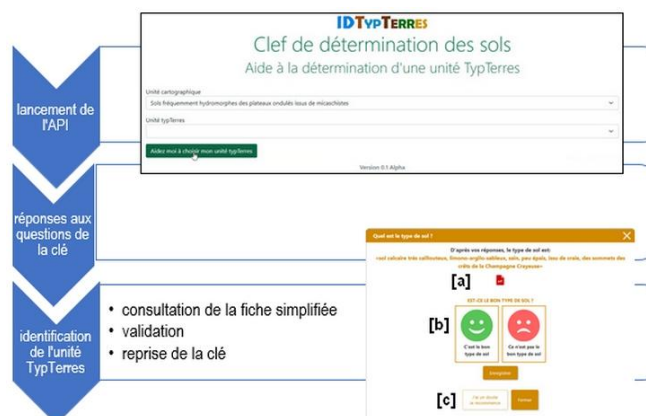


Figure 3 : Capture d'écran de l'API IDTypTerres module « Consultation d'une clé de détermination = choix d'une UTT » 1 : lancement de l'API ; 2 : réponses aux questions de la clé ; 3 : identification d'une unité TypTerres = a/ consultation de la fiche simplifiée, b/ validation, c/ reprise de la clé

Description de la figure

L'API développée dans le projet est interopérable avec tout OAD sol-dépendant. Elle peut être mobilisée par l'utilisateur d'un OAD s'il souhaite être accompagné dans le choix d'une unité TypTerres. Après avoir identifié la zone géographique appropriée pour ses besoins, l'utilisateur se verra présenter les questions de la clé de détermination. Les différentes réponses qu'il va apporter vont lui permettre d'arriver à une unité TypTerres. Il a alors accès à une fiche simplifiée présentant les principales caractéristiques de l'unité TypTerres pour l'aider à valider ce choix. Il peut indiquer si l'unité TypTerres obtenue lui paraît correspondre ou non en cliquant sur le bouton « c'est bon » ou sur le bouton « ce n'est pas bon ». Dans ce second cas, il peut alors choisir de reprendre la clé de détermination en cliquant sur le bouton « J'ai un doute, je veux recommencer ».

3.2.3. Validation du choix de l'unité TypTerres

Enfin, un développement informatique a permis de générer des fiches IDTypTerres standardisées qui contiennent les informations principales de l'unité TypTerres (Figure 4), permettant à l'utilisateur de l'API de valider son choix de l'unité TypTerres proposée en fin de parcours de la clé de détermination.



UTT n° 1 : Sol à textures variables, profond, non caillouteux, calcaire, sain issu d'alluvions récentes (FLUVIOSOL calcaire). Surface : 38637 ha (Isère).

Correspondance avec la typologie Mesparcelles : H1-Sols de marais - tourbeux, sains

Position paysagère : Plaines alluviales du Rhône et de l'Isère et recouvrements alluviaux localisés (Bas-Dauphiné).

Présence de l'UTT dans l'Isère :



Propriétés modales¹ des trois 1ères couches de l'UTT n° 1

Propriétés	Couches de l'UTT		
N° (nom RP)	1 (A1ca)	2 (A2ca)	3 (Sca/Cca)
Profondeur (cm)	0-27	27-74	> 74
Texture (GEPPA)	Lsa	Lsa	Sl
Couleur	Brun gris	Brun grisâtre	Gris
Argile (%)	15	14	10
Limons (%)	41	39	29
Sables (%)	44	46	61
Pierrosité (%)	2	2	18
MOS ² (%)	2.2	1.5	-
pH	8.1	8.1	8.4
CaCO ₃ (%)	23	23	24
CEC ³ (meq/100g)	13.2	12.1	8.6

¹ : valeurs les plus fréquentes - ² : 1.724 x Corg - ³ : Metson

Profondeur modale du sol : 122 cm

Drainage naturel : favorable

Pour aller plus loin :

Figure 4 : Exemple de fiche simplifiée générée automatiquement à partir des données de l'UTT. Ici c'est l'UTT 1 du TypTerres Isère (= sol à textures variables, profond, non caillouteux, calcaire, issu d'alluvions récentes) qui est présentée. Dans le référentiel pédologique le nom du sol est FLUVIOSOL calcaire.

Description de la figure

La fiche simplifiée comporte 5 parties :

- en haut de la fiche, le nom de l'UTT est rappelé avec la surface qu'elle couvre en hectares ;
- en dessous, du texte précise s'il existe une correspondance entre cette UTT et un type de sol dans une autre typologie de sols existant sur le territoire et dans quelle zone du territoire on retrouve communément cette UTT ;
- puis une carte illustre les zones où l'UTT est présente ;
- un tableau présente les propriétés pédologiques (en ligne : profondeur, texture, couleur, teneurs en argile, éléments grossiers, matières organiques, etc.) pour chaque couche (en colonne) de l'UTT ;
- enfin, sous le tableau, du texte précise la profondeur totale de l'UTT et le drainage naturel.

3.3. Applications

3.3.1. Tests d'intégration des typologies TypTerres dans les outils d'aide à la décision et effet sur le conseil

Dans le cadre du projet, l'intégration des TypTerres à des outils existants a été testée et l'effet sur le conseil fourni a été évalué. Ces tests se sont concentrés sur des outils de pilotage de la fertilisation azotée (AzoFert®, N-Pérennes, CHN).

Ces tests ont montré que les OAD/modèle peuvent absorber une certaine incertitude des données « sol » utilisées à l'échelle d'un réseau de parcelles, et qu'en ce sens les unités TypTerres pourraient



être une base intéressante pour l'identification du type de sol à paramétrer dans de futurs OAD. Par exemple, une analyse de sensibilité du modèle CHN a permis de montrer que si l'unité TypTerres choisie a une teneur en calcaire dans la couche de surface différente de celle du sol à modéliser ceci n'a pas d'effet significatif sur le conseil produit (si par ailleurs les teneurs en argile et en matières organiques et la profondeur du sol sont proches). Mais cette performance globale, observée pour tous les outils, ne s'affranchit pas d'un risque d'erreur qui peut être élevé au cas par cas, et qui peut être pénalisant pour des applications de pilotage/conseil. Cela rappelle qu'au-delà du rattachement des UTT aux différentes bases sol, l'enjeu principal reste le bon choix de jeu de paramètres de sol pour chaque parcelle. La clé de détermination, qui permet de faire correspondre la ou les UTT les plus appropriées au(x) sol(s) d'une parcelle donnée, est ainsi déterminante.

Ces travaux ont permis de fournir des recommandations pour les différents publics cibles (https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_419).

Le paramétrage des outils, développés initialement avec des typologies différentes, avec les données TypTerres n'a pas été évident. Il a bien été mis en évidence que pour certains départements, les données disponibles dans les fichiers décrivant les UTT étaient partielles (dans notre cas d'étude, les TypTerres ne disposaient par exemple pas des données teneur en azote total). Les typologies TypTerres ne sont pas développées pour répondre à tous les usages pour lesquels elles pourraient être mobilisées. Il faut également faire attention aux UTT dont les données caractéristiques seraient issues d'un usage du sol spécifique (exemple : prairies) et qui pourraient être mobilisées dans d'autres usages (exemple : grandes cultures). Ceci implique que dans certains cas, il faille compléter, par expertise, les données des UTT pour correspondre aux données d'entrée des outils. C'est pourquoi valoriser des données d'analyses de sol récentes reste une recommandation pour l'utilisateur.

Les difficultés rencontrées poussent dans un premier temps à adopter un système de correspondance entre les typologies TypTerres et les typologies de sols inhérentes aux outils, afin d'assurer l'utilisation de données d'entrées complètes et cohérentes.

Le travail mené ici a permis de mettre en évidence que l'intégration des TypTerres dans des outils existants nécessite un travail conséquent de correspondance et de vérification/validation (données entrée et sortie). Par ailleurs, pour le développement de nouveaux outils à utilisation nationale ou couvrant de larges territoires, l'intérêt pour les éditeurs d'intégrer les TypTerres sera d'autant plus important que celles-ci seront disponibles nationalement.

3.3.2. Comment intégrer les typologies agronomiques des sols dans la formation initiale agricole ? – retour d'expérience d'une classe de BTS

Une classe de BTS ACSE (Brevet de Technicien Supérieur Analyse, conduite et stratégie de l'entreprise agricole) de l'établissement public local d'enseignement et de formation professionnelle agricole (EPLEFPA) du Bas-Rhin, accompagnée par la Chambre Régionale d'Agriculture du Grand Est, a intégré l'utilisation des TypTerres dans plusieurs de ses modules d'enseignement.

Trois sorties terrain ont ainsi été organisées pour permettre aux étudiants de se familiariser avec les typologies agronomiques et les éléments nécessaires pour les identifier sur le terrain.

Ils ont aussi testé les clés de détermination (outil informatique ou format papier). Les étudiants ont ensuite pu utiliser ces outils dans l'exploitation dans laquelle ils étaient en stage. Ce projet a été pour eux l'occasion de se confronter à l'utilisation de données sol et ainsi clarifier la nécessité d'identifier les sols de façon précise pour une utilisation dans les outils d'aide à la décision. Cela leur a aussi permis d'intégrer la prise en compte des sols de manière concrète dans la gestion de l'exploitation et de comparer les informations disponibles dans les unités TypTerres par rapport à celles d'une analyse de terre. Les étudiants ont touché du doigt la difficulté d'harmonisation des bases de données sur les sols puisqu'ils en connaissaient certaines et la concordance avec les UTT n'était pas évidente à trouver.



Pour faciliter l'adoption des typologies TypTerres, il est important de clairement afficher les correspondances avec les typologies préexistantes les plus utilisées (liste sols GREN par exemple).

Une matinée de restitution a également été organisée pour partager entre les partenaires du projet IDTypTerres et les élèves de la classe de BTS avec un retour d'expérience de ces derniers sur les outils proposés par le projet, présentant les atouts et limites des clés de détermination ou difficultés rencontrées dans leur utilisation (<https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/7e55c50c-928b-4d3e-8110-36fa84557bb8>). Des séquences pédagogiques ont été développées qui permettront de renouveler l'expérience avec de nouvelles classes de BTS de l'EPLFPA du Bas-Rhin, potentiellement avec des profils d'élèves différents (filière Aménagements paysagers) voire dans d'autres établissements.

4. Conclusions et perspectives

Le projet IDTypTerres a permis de développer des outils et méthodes (clés de détermination, API-Sol...) permettant d'accompagner l'utilisateur d'outil d'aide à la décision dans le choix du type de sol correspondant à celui de sa parcelle, en mobilisant les typologies agronomiques de sols TypTerres.

Cependant le test de l'intégration des TypTerres dans des OAD existants a montré un certain nombre de limites, notamment en lien avec la disponibilité encore partielle des typologies. L'outil d'aide au choix des unités TypTerres peut toutefois être mobilisé dans d'autres situations de conseil agronomique. Et les TypTerres continuent de se développer (Figure 5) avec un accompagnement au sein du RMT Sols et Territoires. Ces travaux seront poursuivis dans le nouveau programme du RMT (2026-2030). Il s'agit désormais de développer l'appropriation par les conseillers agronomes et les agriculteurs. Cela passe notamment par la promotion de l'utilisation des typologies pour l'acquisition et la diffusion de références agronomiques en qualifiant les sols des expérimentations.

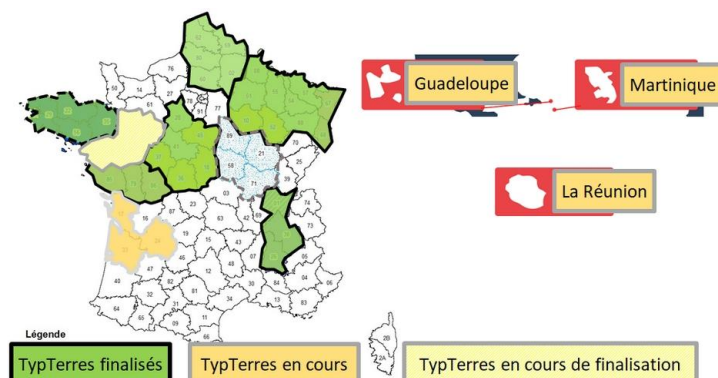


Figure 5 : Etat d'avancement des TypTerres en juin 2024

Description de la figure

Cette carte localise les territoires disposant :

- d'une typologie de sols TypTerres finalisée (Bretagne, Centre-Val-de-Loire, Hauts-de-France, Grand Est et une partie de l'ancienne région Rhône-Alpes) ;
- d'une typologie de sols TypTerres en cours de finalisation (Pays de la Loire) ;
- d'une typologie de sols TypTerres en cours de création (Dordogne, Gironde, Charente-Maritime, Martinique, Guadeloupe et La Réunion).

Les travaux réalisés dans le cadre du projet IDTypTerres, en collaboration avec le RMT Sols et Territoires, ont permis de mettre à disposition des futurs producteurs de typologies agronomiques de sols un guide méthodologique révisé et complété (<https://sols-et-territoires.org/produits-du-rmt/typterres/qt-typterres>). Les outils informatiques développés dans le projet sont open-source et



peuvent donc être réutilisés par différents développeurs d'OAD. Le code source et la documentation ont été publiés sur la plateforme GitHub (<https://github.com/AgaricIG/IDTypterre>).

Des projets en cours et à venir prévoient de tester l'utilisation des TypTerres dans diverses applications de conseil. C'est le cas du projet DIPLODOCUS (Diffuser et Promouvoir LOcalement les DONnées Caractérisant les Unités de Sol) porté par la Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle Aquitaine, avec des partenaires impliqués dans des départements des régions Grand Est, Auvergne Rhône-Alpes et Occitanie, qui a été lauréat de l'AAP CASDAR 2025 : il va notamment remobiliser les outils développés dans IDTypTerres.

Produire les typologies TypTerres et créer les clés de détermination qui leur sont associées est un exercice chronophage, nécessitant des moyens humains et financiers, qui ne pourra avancer que s'il peut bénéficier de financements. Les tests des clés de détermination ont conforté l'intérêt et l'attente des acteurs de terrain pour ces outils, qui peuvent permettre de lever les difficultés d'identification du type de sol sur le terrain et d'accès à des données sols harmonisés, utiles et utilisables. Le projet IDTypTerres était une preuve de concept pour démontrer que ces typologies sont une solution pertinente pour répondre à l'enjeu de mieux faire connaître et rendre plus accessibles les données sols aux conseillers et agriculteurs. Cependant pour favoriser l'adoption des typologies dans les outils de conseil, il faut qu'elles soient disponibles le plus largement possible, nous espérons avoir montré l'intérêt de consacrer les moyens nécessaires à leur création ainsi qu'aux clés de détermination.

Ethique

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.

ORCID des auteurs

Laure Soucémarianadin : <https://orcid.org/0000-0002-9340-3268>

Jean-Yves Cahurel : <https://orcid.org/0000-0002-2161-8040>

Matthieu Valé : <https://orcid.org/0009-0001-0769-4258>

Anne-Sophie Perrin : <https://orcid.org/0000-0001-5537-4024>

Contributions des auteurs

JS et SM = analyse formelle, investigation sur les clés de détermination ; Tous les auteurs = méthodologie sur les clés de détermination.

LB = conceptualisation, méthodologie, logiciel sur l'outil d'aide au choix de l'unité TypTerres ; MV = ressources sur l'outil d'aide au choix de l'unité TypTerres.



JYC, FO et RT = préparation des données, analyse formelle, investigation, méthodologie, ressources sur les tests d'intégration des TypTerres à des outils d'aide à la décision et modèle agronomique sol-dépendants ; LS = méthodologie.

JPM = supervision visuelle ; JPM, LS, LB, SM, BL, RT, JS, JYC et ASP = conceptualisation, préparation des données, méthodologie, validation pour les fiches synthétiques TypTerres.

JS et VS = investigation, méthodologie, ressources pour les activités avec la classe de BTS ACSE de l'EPL du Bas-Rhin.

LS = conceptualisation, administration du projet et rédaction - ébauche du manuscrit initial ; Tous les auteurs = rédaction - relectures et corrections.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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 partenaires ayant pris part au projet et contribué à l'acquisition de résultats présentés en partie dans ce manuscrit : Christian Revalier et Hervé Nedelec (CA45), Christophe Ducommun (Institut Agro), Yosra Ellili (UniLaSalle) ainsi que les élèves de la classe de BTS ACSE (2022-2024) de l'EPLEFPA du Bas Rhin et leurs enseignants Antoine Stoehr et Killian Guey. Sont aussi remerciés pour leurs contributions au projet : Cédric Darbon (Agaric-IG), Julie Callens et François Taulemesse (Arvalis), Sophie Pouzenc et Sophie Maillant (CRAGE), Marie Bonnisseau et Sam Schrock (IFV) et Nathalie Harel (Terres Inovia). Des remerciements tout particuliers sont adressés à David Froger et Adeline Boulfray Mallet (Chambre d'agriculture d'Indre-et-Loire) pour leur expertise dans la mise en œuvre des tests d'intégration des TypTerres dans N-Pérennes.

Déclaration de soutien financier

Le projet IDTypTerres a reçu le soutien financier du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural.

Références bibliographiques

- Brevik, E. C., Calzolari, C., Miller, B. A., Pereira, P., Kabala, C., Baumgarten, A., & Jordán, A. (2016). Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma*, 264, 256–274. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.017>
- Courtoux, A., & Claveirole, C. (2015). *La bonne gestion des sols agricoles : Un enjeu de société*. Les éditions des Journaux officiels. https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2015/2015_14_gestion_sols_agricoles.pdf
- Laroche, B., Richer de Forges, A.-C., Leménager, S., Arrouays, D., Schnebelen, N., Eimberck, M., Toutain, B., Lehmann, S., Tientcheu Nguenkam, M.-E., Héliès, F., Chenu, J.-P., Parot, S., Desbourdes, S., Girot, G., Voltz, M., & Bardy, M. (2014). Le programme Inventaire Gestion Conservation des Sols de France : Volet référentiel régional pédologique. *Études et Gestion des Sols*, 1(1), 141–150. <https://hal.inrae.fr/hal-02641576v1>
- Laroche, B., Degan, F., Koller, R., Scheurer, O., Bouthier, A., Moulin, J., Sauter, J., Ducommun, C., Fort, J.-L., Maillant, S., Party, J.-P., Renouard, C., Saby, N. P. A., & Bertouy, B. (2020). TYPTERRRES : Vers une typologie agronomique partagée. *Études et Gestion des Sols*, 27, 241–255. <https://www.afes.fr/ressources/typterrres-vers-une-typologie-agronomique-partagee/>
- Soudière, M.-L. (2011). *Recensement des outils d'analyses sols-dépendant et étude des référentiels sols* (Rapport de stage de fin d'étude, niveau M2). Strasbourg, France.



Pour citer cet article : Laure SOUCEMARIANADIN, Lionel BARGEOT, Jean-Yves CAHUREL, Bertrand LAROCHE, Sébastien MINETTE, Jean-Pascal MURE, Fiona OBRIOT, Anne-Sophie PERRIN, Joëlle SAUTER, Véronique STANGRET, Romain TSCHÉILLER & Matthieu VALE, 2026 - Utilisation des typologies de sols TypTerres pour améliorer le conseil agronomique. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art08>



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.



Phénotyper par capteurs le Couvert végétal de la pomme de terre pour mieux lutter contre le virus Y : Projet CANOPY (2020-2025)

Laurent GLAIS¹, Melen LECLERC², Heiner DENZER³, Christophe LANGRUME²,
Stéphane JUMEL², Christophe DARGIER⁴, Philippe LATY⁵, Philippe DOLO⁶, Sébastien VAST⁷,
Sarah CARDON⁸, François VERNEY⁴, David DUPRE⁹, Frédéric BOULARD¹, Loïc DANIEL²,
Maryse URVOY¹, Laura DEMEY¹⁰, Yves LE HINGRAT^{1,8}

¹ inov3PT, Domaine de la Motte, 35653, Le Rheu, France

² IGEPP, INRAE, Institut Agro, Univ Rennes, 35653, Le Rheu, France

³ Pessl Instruments GmbH, Werksweg 107, A-8160 Weiz, Autriche

⁴ FN3PT, 44 Rue du Louvre, 75001 Paris, France

⁵ Comité Centre et Sud, avenue des Droits de l'Homme, 45921 Orléans, France

⁶ Bretagne Plant Innovations, 471 La Gare, 29460 Hanvec, France

⁷ Comité Nord Plants, Rue des Champs Potez, 62217 Achicourt, France

⁸ FN3PT, 43-45 rue de Naples, 75008 Paris, France

⁹ SIPRE, Rue des Champs Potez, 62217 Achicourt, France

¹⁰ inov3PT, Rue des Champs Potez, 62217 Achicourt, France

Correspondance : laurent.glais@inov3pt.fr ; melen.leclerc@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art09>

Résumé

L'huile minérale protège les plants de pommes de terre des infections dues au virus Y (PVY). L'objectif du projet est d'identifier un capteur fixe, permettant de suivre en temps réel le développement du couvert, afin d'adapter les fréquences de pulvérisation de l'huile à la vitesse de croissance foliaire des plantes. Ce suivi a révélé une variabilité importante du développement foliaire selon les années, les sites géographiques et la variété. La confrontation des vérités terrain aux données collectées automatiquement a permis de confirmer une corrélation entre le développement de la canopée et la mesure de la hauteur des plantes ou de leur réflectance. La dynamique de ces variables retransmet bien celle du couvert, en particulier lors de la phase de croissance active. Enfin, un premier travail de modélisation a montré que les données de capteurs peuvent être utilisées pour donner une surface foliaire mais aussi que la variété peut impacter significativement la sortie des modèles.

Mots-clés : PVY, canopée, phénotypage, outil numérique, capteurs, indice de végétation

Abstract: Real-time monitoring of potato canopy cover to better fight against potato virus Y: CANOPY project (2020-2025)

Mineral oil protects potato plants from infections caused by Potato virus Y (PVY). The objective of the project is to identify a fixed sensor capable of monitoring the development of the canopy in real time, to adjust the frequency of oil spraying to the rate of leaf growth in the plants. This monitoring revealed significant variability in leaf development depending on the year, geographic location, and variety. Comparing field observations with automatically collected data confirmed a correlation between canopy development and measurements of plant height or reflectance. The dynamics of these variables



accurately reflect those of the canopy, particularly during the active growth phase. Finally, initial modelling work showed that sensor data can be used to estimate leaf area, but also that the variety can significantly impact model outputs.

Keywords: PVY, canopy, phenotyping, numeric tools, sensors, vegetation index

1. Introduction

L'agriculture d'aujourd'hui est soumise à une pression réglementaire et sociétale forte pour diminuer les intrants en culture vis-à-vis notamment des produits phytosanitaires, tout en conservant un niveau de production élevé de manière à répondre à la croissance de la population mondiale (MAAF, 2015). Face à ces deux demandes, les besoins exprimés des agriculteurs sont donc de développer des stratégies innovantes pour préserver la qualité des semences tout en limitant l'utilisation d'intrants. Dans ce contexte, le projet a pour enjeux d'évaluer la pertinence d'utiliser des outils technologiques et numériques afin de mieux raisonner l'application des huiles minérales et améliorer ainsi la protection des plantes face au virus Y (PVY).

Le PVY est un des problèmes sanitaires majeurs auquel la production de pommes de terre, toutes filières confondues, doit faire face. En effet, depuis près de quarante ans le PVY est devenu le virus le plus répandu en France mais aussi dans tous les pays producteurs de pomme de terre, où il est maintenant responsable de plus de 90 % des infections virales en production de plants (Glais *et al.*, 2017). Sur les 10 dernières années, les données recueillies sur la qualité sanitaire des semences révèlent que le PVY est encore responsable annuellement de l'infection de près de 30 % des lots de semences ; alors que le second virus le plus fréquent en France (virus X, PVX) ne cause que 3 % des infections (données FN3PT). La conséquence directe de ces attaques virales pour la filière plant peut être un déclasserement des lots de semences, voire un refus à la certification si le taux de virus est supérieur aux normes en vigueur. En effet, le PVY est listé comme un organisme nuisible réglementé non de quarantaine en accord avec la directive 2020/177/UE. L'application en droit français de cette directive stipule que jusqu'à 5 % de virus, un lot peut être commercialisé ; au-dessus, il est refusé. Pour la filière de consommation, il a été estimé qu'à l'échelle de la plante si celle-ci était infectée par le PVY à la plantation, une perte de rendement jusqu'à 80 % pouvait être enregistrée en fonction de la variété cultivée, par rapport à une plante saine (Hane & Hamm, 1999 ; Rykbost *et al.*, 1999). Cette baisse est la conséquence de tubercules moins nombreux et plus petits, et d'un nombre plus limité de tiges par pied. Par ailleurs, parmi les sept souches de PVY reconnues, celle nommée PVY^{NTN} induit la maladie des nécroses annulaires superficielles sur tubercules (Beczner *et al.*, 1984), qui rend impossible la commercialisation des tubercules portant ce type de symptôme. En raison de tous ces dommages qu'il peut induire sur plante, de sa transmission quasi instantanée d'une plante infectée à une plante saine lors de la prise alimentaire de près de 70 espèces de pucerons, et de sa présence sur plus de 500 espèces végétales (cultivées, adventices), le PVY est le virus le plus fréquent sur cette culture et le plus problématique pour les producteurs.

Seule l'application d'huiles minérales en végétation permet de lutter efficacement contre le PVY (Boiteau *et al.*, 2009) en limitant la transmission du virus par les pucerons vecteurs de maladie et ainsi restreindre les dommages induits par ce virus. Optimiser l'application des huiles en végétation pour i) maximiser le contrôle des infections et ii) les utiliser à bon escient même si elles sont reconnues aujourd'hui comme produits de biocontrôle, est ainsi un enjeu majeur pour les producteurs de plants de pomme de terre, et ce au niveau de tous les bassins de productions. Les agriculteurs utilisent aujourd'hui des cadences d'application standard afin de protéger le plus possible les nouvelles feuilles produites. A l'échelle d'une même exploitation agricole de nombreux facteurs induisent de la variabilité concernant la dynamique du couvert végétal : variété, itinéraire technique, microclimat, historique de la parcelle... Cette variabilité qui peut être très forte entre deux parcelles proches est difficile à



appréhender et est rarement prise en compte. Adapter les traitements à la parcelle apparaît comme un levier pertinent pour améliorer la protection contre les infections virales.

Mobiliser le numérique est aujourd'hui reconnu comme étant un moyen pertinent pour améliorer la protection des cultures (Reboud *et al.*, 2022). Lors de la dernière décennie les avancées technologiques ont permis de démocratiser l'utilisation de capteurs dans de nombreux domaines dont l'agriculture et de permettre le développement d'outils d'aide à la décision. Ce projet propose de développer un outil numérique pour le suivi en temps réel du développement du couvert de pomme de terre afin de mieux cibler les applications d'huiles minérales et les adapter aux conditions locales de chaque parcelle. Ce travail requiert une approche pluridisciplinaire avec les tâches suivantes (Figure 1) qui sont détaillées dans cet article :

- l'intégration, le déploiement et la validation de capteurs pour le suivi au champ ;
- l'expérimentation et du phénotypage manuel du couvert ;
- le développement d'un système d'information pour automatiser le recueil et le stockage des données et retourner des informations vers les utilisateurs ;
- le développement de modèles pour suivre la dynamique du couvert à partir de données capteurs ;
- la mobilisation de cet outil numérique intégré pour élaborer de nouvelles stratégies de lutttes et identifier les limites pour une utilisation en pratique.

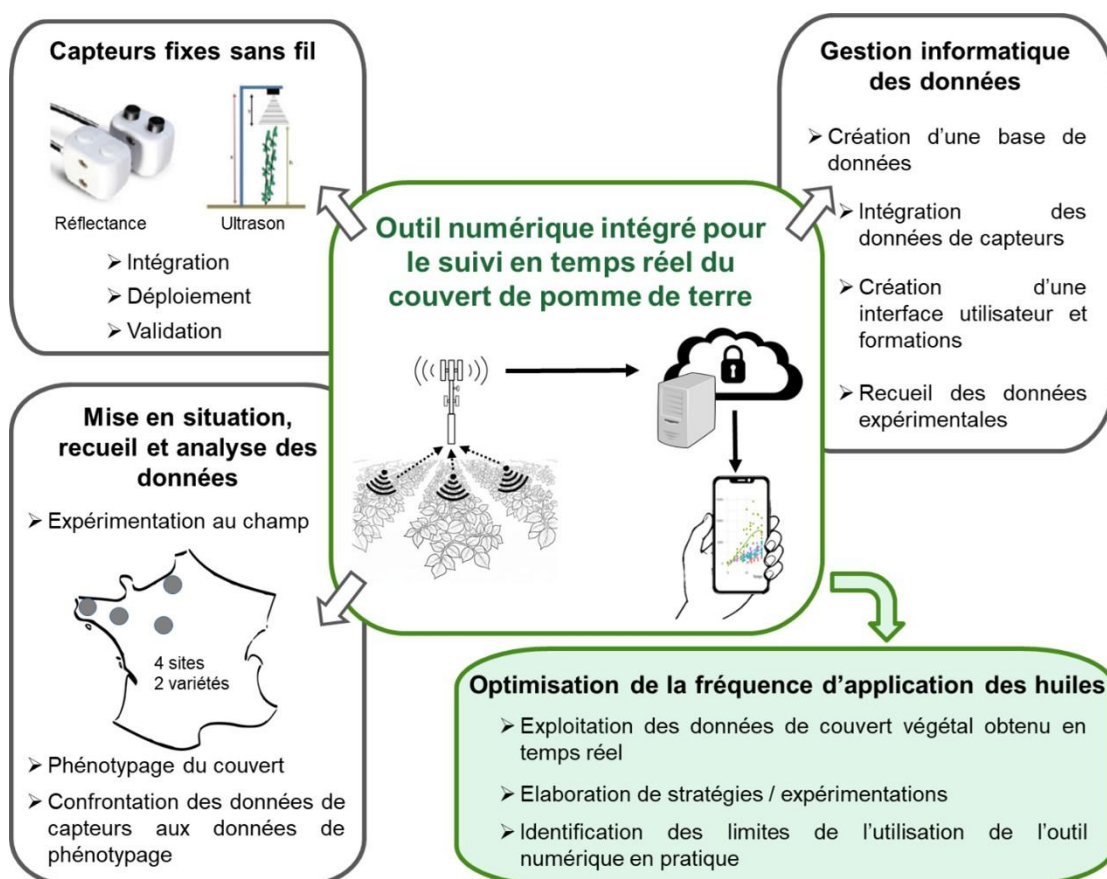


Figure 1 : Représentation synthétique de l'objectif, des actions menées et de la finalité du projet CANOPY.

Description de la figure



Présentation des trois actions mises en place pour intégrer des outils numériques permettant de suivre en temps réel le couvert des plantes de pommes de terre. La première action a consisté à intégrer, déployer et valider deux capteurs fixes sans fil (capteurs de réflectance et ultrason). La seconde a été de mettre en situation ces capteurs sur 4 sites d'expérimentation, de phénotyper le couvert et confronter les données acquises avec les capteurs à des données de réalités terrain. La troisième action a été de développer une base de données permettant l'intégration automatique des données de capteurs, et le recueil des données expérimentales. L'enjeu de ce projet est d'exploiter les données de couvert végétal obtenu en temps réel pour optimiser la fréquence d'application des huiles minérales.

2. Intégration, déploiement et validation de capteurs fixes sans fil

L'objectif du projet étant d'avoir un suivi fin dans le temps de la croissance du couvert, nous nous sommes orientés vers l'utilisation de capteurs fixes. Déployés en petit nombre, ces derniers ne permettent pas d'informer précisément sur l'hétérogénéité spatiale du couvert, comme c'est le cas avec un suivi par proxie ou télédétection. Néanmoins, ils permettent d'avoir une représentation temporelle très fine du phénomène suivi.

Pour caractériser le couvert, en particulier la surface foliaire, nous avons choisi deux types de capteurs complémentaires qui donnent des signaux pertinents pour phénotyper la végétation :

- Des capteurs à ultrasons (TS3 Ultrasonic Sensor, Toposens GmbH, München, Allemagne) pour le suivi de la hauteur du couvert. Ce type de capteur émet des impulsions hautes fréquences. Lorsque les ondes émises rencontrent les feuilles des plantes, elles se réfléchissent et retournent vers le capteur qui détecte cet écho et mesure le temps écoulé entre l'émission de l'impulsion et la réception de l'écho. Ce temps est ensuite utilisé pour calculer la distance au couvert et permet donc de suivre l'évolution de sa hauteur ;
- Des capteurs dans le rouge et le proche infra-rouge (Apogee Instruments, Logan Utah, USA) permettant de mesurer la réflectance du couvert végétal. La lumière du soleil mesurée par un premier capteur rentre en contact avec la canopée ; selon les longueurs d'ondes considérées de ce rayonnement solaire, des éléments peuvent soit traverser le couvert végétal et atteindre le sol, soit être absorbés et utilisés pour stimuler la photosynthèse, ou soit être réfléchis. Cette lumière réfléchie, est ensuite captée par un second capteur. Le différentiel de rayonnement entre les deux capteurs permet d'établir un spectre de réflectance du couvert végétal. Ce spectre est ensuite traduit en indice de végétation NDVI (indice de végétation par différence normalisée) ou EVI2 (indice de végétation amélioré).

La société Pessl Instruments, partenaire du projet CANOPY, a intégré ces capteurs dans un prototype qui permet d'automatiser la mesure via ces capteurs toutes les 15 minutes et de transmettre ces données par un réseau GSM (4G 3G) via une carte Sim au système d'information de la société. Ces données sont directement transmises via l'API dédiée ou l'interface FieldClimate. Pour être déployés dans les parcelles expérimentales de chaque site, ces capteurs ont été installés sur des portiques, enchâssant deux rangs de pomme de terre, permettant un suivi au nadir du couvert (Figure 2).



Figure 2 : Portique sur lequel ont été positionnés les différents capteurs à ultrasons et de réflectance pour suivre le développement foliaire des plantes ainsi que le système de transmission sans fil pour un suivi en temps réel. Photo © INRAE

Description de la figure

Photo présentant le système de fixation des capteurs à ultrasons et de réflectance en parcelle expérimentale. Ces capteurs sont fixés sur une barre horizontale soutenue aux extrémités par deux barres inclinées, enfoncées dans le sol de manière à bien stabiliser l'ensemble. La barre horizontale est positionnée à une hauteur de 1.2 m environ, de manière que les capteurs soient au-dessus de la hauteur maximale de la canopée des plantes de pomme de terre. Le portique enjambe 2 rangs de pommes de terre, afin que chaque capteur, orienté vers le sol, puisse être placé au-dessus d'un rang.

Afin de contrôler la fiabilité des mesures réalisées par le prototype de Pessl Instruments, mais aussi pour pallier de potentielles défaillances de ce système, les parcelles expérimentales sur le site INRAE (Le Rheu, Ille et Vilaine (35)) ont été instrumentées avec des capteurs similaires, et une autre architecture, sur un autre portique. Les capteurs à ultrasons utilisés par INRAE, ont été intégrés sur une carte Arduino MKR WAN 1300 permettant une transmission des trames de données sur le réseau LoRaWAN. Ces trames ont été ensuite filtrées et collectées par des passerelles informatiques réparties sur le site, chargées de capter les transmissions sans fils et de transmettre les données sur le réseau Intranet INRAE. Ces données au format Json ont été alors traitées par une solution OpenSource (NodeRed/Influxdb/Grafana) hébergée et sécurisée sur le Datacenter INRAE situé à Toulouse pour visualisation et extraction finale. Pour la réflectance, nous avons utilisé le capteur SRS Decagon qui présente les mêmes caractéristiques que celui utilisé par la société Pessl Instruments. Les données ont été recueillies par une centrale d'acquisition Campbell CR1000 via le protocole de transmission filaire SDI-12. Elles ont été ensuite collectées manuellement par liaison RS232. Pour l'ensemble de ces capteurs, les données ont été collectées toutes les 15 minutes.

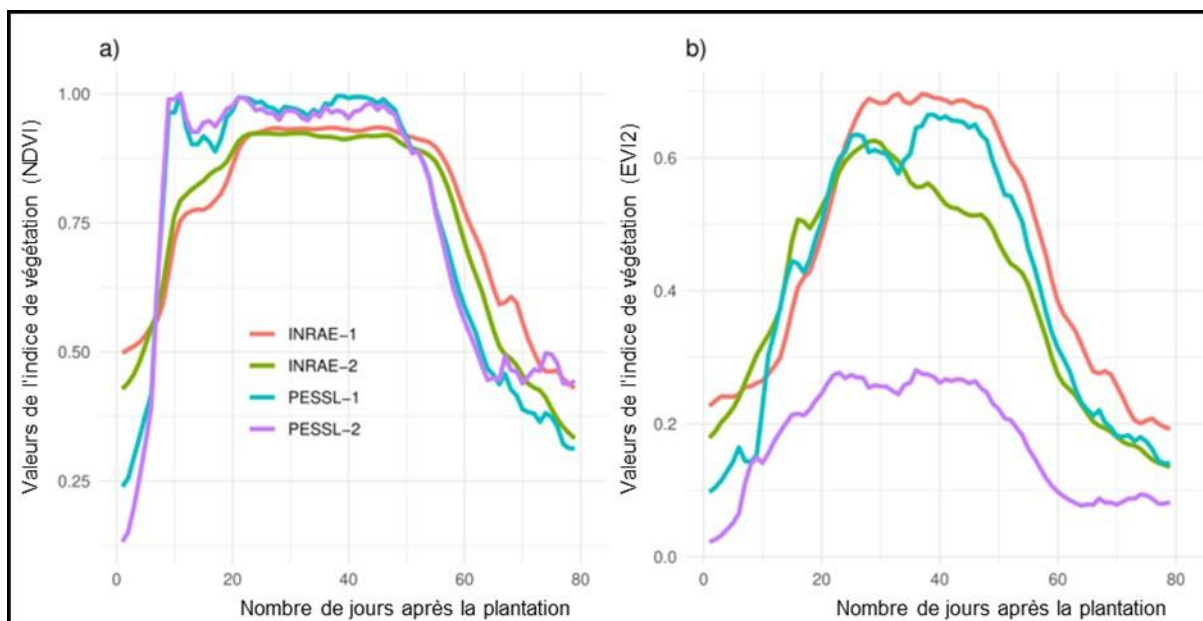


Figure 3 : Comparaison des données de réflectance acquises via les capteurs INRAE et Pessl Instruments pour l'année 2022 sur le site de Le Rheu. Les données de réflectance au cours du temps sont ici traduites en indices de végétation NDVI (a) et EVI2 (b), moyennées à la journée. PESSL-1 / PESSL-2 : 2 capteurs de réflectance intégrés par le partenaire Pessl Instruments ; INRAE-1 / INRAE-2 : 2 capteurs de réflectance développés par INRAE.

Description de la figure

Présentation graphique de l'évolution des valeurs de deux indices de végétation (NDVI, EVI2) en fonction du nombre de jours après la plantation. Les deux indices ont présenté un profil proche. Les courbes obtenues en forme de cloche, ont montré que ces indices de végétation, correspondant à un taux de recouvrement du sol, augmentaient très rapidement sur les 20 premiers jours de la culture, jusqu'à obtenir un indice saturant. Ces valeurs stagnaient ensuite pendant environ 20 jours, puis diminuaient rapidement sur 20 jours suivants.

Comme illustré dans la Figure 3, les deux indices de végétation donnent des dynamiques proches, mais avec des valeurs moins saturantes (en-dessous de 1) pour l'indice EVI2 au moment où le développement du couvert végétal était à son maximal. Les autres différences observées pouvant s'expliquer par des localisations différentes des portiques dans la parcelle et l'âge du capteur de réflectance utilisé par la solution INRAE qui avait déjà été déployée pendant plusieurs années pour d'autres expérimentations.

Enfin, une station météorologique a été installée sur chaque site dans une des parcelles expérimentales. La station (iMETOS3.3 Pessl Instruments) était équipée de sondes permettant de recueillir toutes les 15 minutes des données de température/humidité de l'air et du sol, le volume de pluviométrie, le vent (intensité, direction).

3. Expérimentation au champ et phénotypage du couvert végétal

3.1. Mise en place des parcelles expérimentales

Quatre parcelles expérimentales ont été mises en place dans des régions présentant des conditions pédoclimatiques contrastées : deux en région Bretagne (Finistère (29), gérée par Bretagne Plants Innovation - BPI, Ille et Vilaine (35), suivi par INRAE Le Rheu - LRH), une en région Hauts-de-France (Pas-de-Calais (62), géré par Comité Nord - CN) et une dans la région Centre-Val de Loire (Loiret (45), suivi par le Comité Centre et Sud - CCS). Sur les deux premières années 2021-2022, seule la variété



Passion a été implantée. C'est une variété précoce, reconnue à dire d'experts comme présentant un développement foliaire important en termes de hauteur et de vigueur. Pour les campagnes 2023-2024, une seconde variété, Allians, a été ajoutée. C'est une variété à chair ferme, semi-précoce, qui présente un développement foliaire moins important que celui de Passion. Chaque année, un seul lot de semences de chacune de ces variétés a été utilisé pour la mise en place des essais dans les différents sites. Ces lots ont été fournis par Bretagne Plants Innovation.

Pour les campagnes 2021-2022, sur chaque site a été implantée une micro-parcelle de 15 m x 6 m de manière à disposer de 8 rangs de 75 tubercules de pommes de terre, avec une distance inter-rang de 0.75 m et d'une distance entre les pieds de 0.20 m (Figure 4). Sur chaque micro-parcelle, trois zones étaient définies :

- une zone où étaient placés les deux portiques ayant chacun un capteur de réflectance et à ultrasons. Chacun de ces capteurs était positionné au-dessus d'un rang ;
- une zone où étaient définis trois quadras (1 m x 1 m) matérialisant l'emplacement pour la mesure manuelle de la hauteur des plantes et la prise de vue de la canopée au cours du temps ;
- une dernière où était réalisé le prélèvement, dite zone de collecte, des plantes pour recueillir les données destructives.

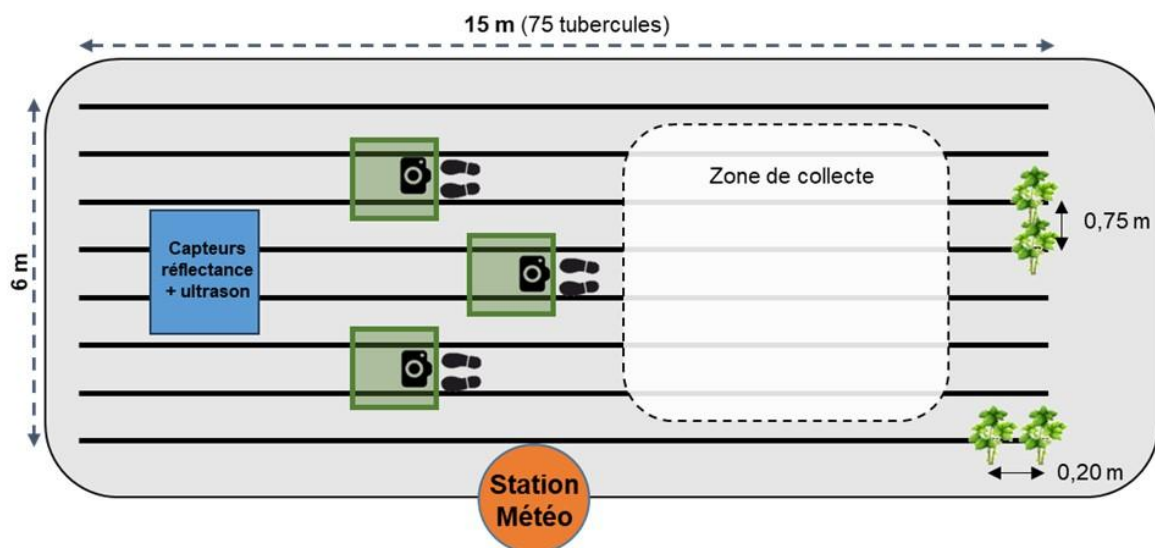


Figure 4 : Schéma d'un site expérimental avec la localisation des différentes zones de recueil des données collectées par les capteurs et par les opérateurs.

Description de la figure

Représentation schématique d'un site expérimental de forme rectangulaire. Toute la moitié droite de la placette correspond à la zone de collecte des plantes pour réaliser des mesures destructives. Sur la moitié gauche, sont localisées les 3 zones de 1 m x 1 m où sont réalisées les mesures manuelles de hauteur des plantes et les prises de vue pour l'estimation du taux de recouvrement. A l'extrémité gauche, est positionné le portique avec les différents capteurs. Une station météorologique est placée en bordure de la placette.

Pour les campagnes 2023-2024, le nombre de micro-parcelles a été doublée sur chaque site de manière à intégrer la seconde variété. Chacune d'elle était pourvue d'un seul portique équipé des deux types de capteurs et des mêmes zones de collecte des données manuelles.

Sur ce dispositif, aucun traitement huile, ni insecticide n'ont été appliqués. En fonction des conditions climatiques chaque année, la plantation des essais a été réalisée fin avril/début mai (Loiret, Finistère), ou début/fin mai (Ille et Vilaine, Pas-de-Calais).

3.2. Phénotypage du couvert végétal durant la saison de culture

Pour chaque expérimentation instrumentée, le couvert a été phénotypé tout au long de la période de culture pour confronter les données de capteurs aux caractéristiques du couvert.

Les données manuelles collectées étaient de deux ordres : des données non destructives et des données destructives. Concernant les données non destructives, au niveau des trois quadras définis sur chacun des quatre sites expérimentaux, trois points de mesure ont été pris avec une règle, du haut de la butte jusqu'au sommet des plantes. Une photo d'ensemble a également été prise de chaque quadra pour avoir un suivi du taux de couverture du sol par analyse d'images.

L'objectif central du projet étant de suivre la surface foliaire, cette dernière a été mesurée par échantillonnage destructif. Les méthodes traditionnelles d'estimation de la surface foliaire telles que le planimètre étant coûteuses et chronophages, nous avons mis au point une méthode permettant d'estimer rapidement la surface foliaire pour chaque échantillon de chaque site. Brièvement, la méthode consiste à placer sur un support spécifique les étages foliaires de chaque tige individualisée d'une plante collectée ; de prendre une photo de ce matériel biologique avec les repères associés présents sur le support, et de réaliser une analyse d'images implémentée sous ImageJ et Python (Figure 5). La méthode et sa validation est détaillée dans Jumel *et al.* (2025) et les codes sont disponibles sur la forge INRAE à l'adresse suivante : <https://forge.inrae.fr/stephane.jumel/support-and-associated-algorithms-for-measuring-leaf-area>.

A chaque date de notation, trois plantes entières ont été prélevées dans la zone dédiée de chacun des sites. Pour chacune des tiges de ces 3 plantes, chaque étage foliaire a suivi la méthodologie décrite ci-dessus afin d'estimer la surface foliaire. L'ensemble des parties aériennes de chaque plante était ensuite regroupé dans un sac de papier kraft, et pesé afin de définir la biomasse globale de chaque plante. Ce sac était ensuite mis dans une étuve à 80°C pendant 48h, pour obtenir le poids sec.

L'ensemble de ces données a été collecté deux fois par semaine pendant la phase de croissance active des plantes (environ cinq semaines) et une seule fois par semaine lorsque la végétation stabilisée était atteinte (environ quatre semaines). Ces données étaient renseignées manuellement dans la base de données développée par la FN3PT dans le cadre de cette étude.

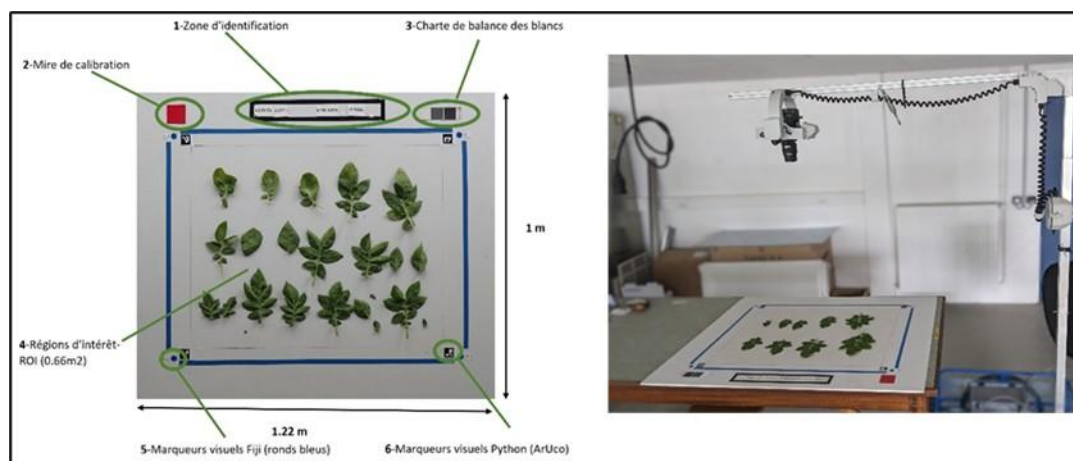


Figure 5 : Présentation du support et des repères intégrés permettant une estimation automatique de la surface foliaire grâce à une analyse d'image sous ImageJ et Python. Photos © INRAE

Description de la figure

La figure est composée de deux photos. Celle de gauche présente le support sur lequel les étages foliaires individualisés d'une même tige ont été positionnés. Ce matériel biologique était placé au milieu d'un carré délimité par des traits bleus, sans avoir de chevauchement entre les folioles. A chaque angle de ce carré se trouvait un marqueur visuel reconnu automatiquement par ImageJ ou par Python qui leur permettait de savoir dans quelle zone se trouve le végétal à quantifier.



D'autres informations étaient présentes en haut du panneau, à l'extérieur de la zone d'analyse (zone d'identification avec le nom de la variété, le numéro de la plante et celui de la tige ; une charte de balance des blancs pour homogénéiser toutes les prises de vue selon la luminosité présente). La photo de droite montre comment était réalisée la prise de vue. Cette prise de vue était effectuée à l'aide d'une perche équipée d'un système de déclenchement à distance et d'un appareil photo maintenu à la verticale par un système de stabilisation automatique, au-dessus du panneau.

3.3. Dynamiques des couverts de pomme de terre

Les surfaces foliaires estimées par imagerie montrent que quelle que soit l'année et le site d'expérimentation, la surface foliaire atteint son maximum entre 35 et 40 jours après l'émergence de 100 % des plantes de la placette (Figure 6). Cette première phase de croissance forte de la surface correspond au développement des différentes tiges de chaque plante ainsi que des feuilles (période appelée croissance active). Une phase descendante est ensuite observée, correspondant à la chute des feuilles basales et à la croissance limitée des étages terminaux (période appelée végétation stabilisée). La comparaison entre les sites d'expérimentation montre que la croissance de la surface foliaire n'est pas homogène d'un site à l'autre. En effet, pour une même variété, cette surface est 2 à 3 fois supérieure sur le site du Centre-Val de Loire (CCS), comparée aux trois autres sites. Cette surface plus importante sur ce site peut s'expliquer par le fait de l'installation d'un système d'irrigation présent dans cette parcelle qui permet aux plantes d'être moins impactées en cas de conditions de sécheresse.

En plus de cette variabilité entre les sites, une importante variabilité interannuelle a été également observée pour un même site (Figure 7). Sur le site de la région Centre-Val de Loire (CCS) notamment, entre la campagne 2024 (11 000 cm²) et 2023 (7 500 cm²), une perte de surface foliaire de près de 32 % a été enregistrée au point culminant (Figure 7). Une différence jusqu'à 150 % a été observée entre les années 2021 et 2022 (5 000 cm²) (résultats non présentés). Ces variations importantes sont liées aux différentes conditions climatiques rencontrées selon les années.

Ces variations de surface foliaire entre les sites d'expérimentation et entre les années pour un même site, se retrouvent également avec la variété Allians. En effet, en 2024 une surface de 7 500 cm² était enregistrée sur le site Centre-Val de Loire (CCS), contre 5 500 cm² à la campagne 2023, soit une perte de 26 %. Ces données montrent la difficulté de prévoir l'évolution de la surface foliaire, malgré des pratiques culturales similaires. Elles mettent bien en avant la pertinence de suivre la dynamique de chaque parcelle pour espérer adapter au mieux la lutte contre les infections virales.

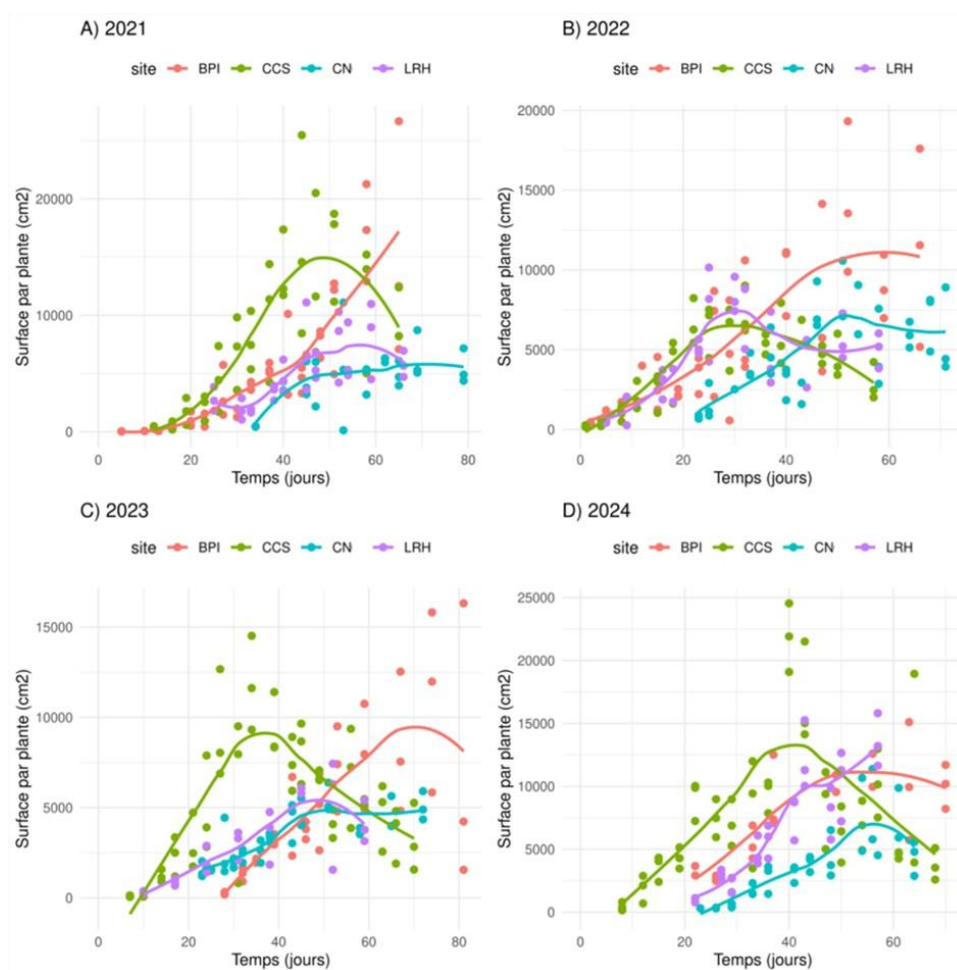


Figure 6 : Dynamique de développement de la surface foliaire de la variété de pomme de terre Passion sur les différents sites expérimentaux (BPI-Bretagne Plant Innovations ; CCS-Comité Centre et Sud ; CN-Comité Nord ; LRH-Le Rheu), de 2021 à 2024 (A à D). Le temps 0 correspond au 15 mai de chaque année.

Description de la figure

La figure se compose de 4 graphes intitulés A, B, C et D correspondant à l'évolution de la surface foliaire de la variété Passion de 2021 à 2024 sur les 4 sites d'expérimentation. La courbe rouge correspond à l'évolution de la surface enregistrée à Bretagne Plant Innovations (BPI) ; en vert celle au Comité Centre et Sud (CCS) ; en bleu au Comité Nord (CN) ; en violet à Le Rheu (LRH). En 2021, la dynamique d'évolution de la surface foliaire au CN, LRH et BP était similaire, avec un développement progressif de la surface qui a débuté 15 jours après la plantation et qui saturait à près de 6000 cm² à 50 jours après la plantation. Cette surface a diminué ensuite lentement jusqu'à la fin de la sénescence. Au CCS, cette dynamique a été trois fois plus importante que sur les 3 autres sites, avec une surface foliaire de 15 000 cm² atteinte au bout de 50 jours après la plantation. Cette surface a diminué ensuite rapidement lors de la sénescence.

En 2022, la dynamique de croissance foliaire a été similaire entre les sites CCS, CN et LRH avec un pic de surface foliaire à 7500 cm². En revanche, c'est à BPI que la surface foliaire a été la plus importante avec une surface de 11000.

En 2023, le profil de développement foliaire a été le même pour les sites LRH et CN, avec un pic de surface foliaire à 5000 cm², 50 jours après la plantation. De la même manière, cette dynamique a été similaire pour BPI et CCS, avec un pic de près de 10000 cm², avant de baisser progressivement au moment de la sénescence.

En 2024, les profils de développement foliaire pour les sites LRH, CCS et BPI ont été très proches, avec une valeur maximale de surface de l'ordre de 12000 cm². En revanche, sur le site du CN, elle a été plus faible, avec une surface maximale de 7500 cm².

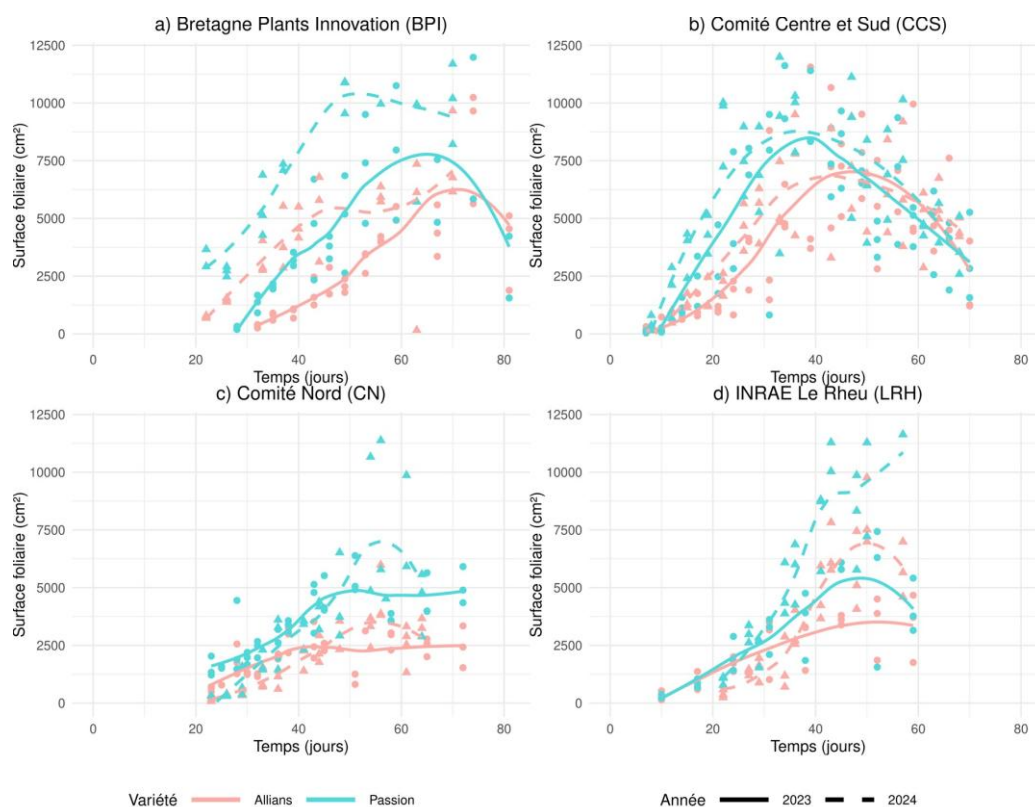


Figure 7 : Dynamique de développement de la surface foliaire des variétés Passion (en bleu) et allians (en rouge) selon les sites d'expérimentation (BPI-Bretagne Plant Innovations ; CCS-Comité Centre et Sud ; CN-Comité Nord ; LRH-Le Rheu) et les années 2023 (ligne continue avec des points) et 2024 (ligne discontinue avec des triangles). Le temps 0 correspond au 15 mai de chaque année. Pour gagner en visibilité tous les graphiques ont les mêmes limites d'axes et pour le graphique b) quelques points outliers indiquant des plantes à des surfaces foliaires allant jusqu'à 20000 cm² ne sont pas visibles.

Description de la figure

La figure se compose de quatre graphiques intitulés a, b, c et d. Chaque graphique illustre l'évolution de la surface par plante, exprimée en centimètres carrés, en fonction du temps, exprimé en jours. Le temps 0 correspond au 15 mai de chaque année. Deux variétés de plantes, nommées Allians et Passion, ont été comparées sur deux années distinctes, 2023 et 2024. La variété Allians est représentée par une couleur rouge, tandis que la variété Passion est indiquée par une couleur bleue. Chaque graphique représente les observations brutes, en point pour 2023 et triangle pour 2024. A cela s'ajoute une courbe de lissage représentant la tendance des données en traits plein pour 2023 et en ligne de tiret pour 2024. Ainsi chaque graphique comprend 4 courbes : une ligne pleine rouge pour Allians en 2023, une ligne pleine bleue pour Passion en 2023, une ligne de tirets rouge pour Allians en 2024 et une ligne de tirets bleue pour Passion en 2024. Le graphique a correspondant au site Bretagne Plants Innovation, montre que la surface par plante de la variété Allians a augmenté progressivement jusqu'à environ 6000 cm² vers 50 jours en 2023, puis a diminué légèrement. En 2024, cette surface a atteint un pic plus élevé, aux alentours de 8000 cm² vers le même nombre de jours. Pour la variété Passion, la surface par plante a atteint environ 7500 cm² en 2023 et environ 10500 cm² en 2024, avant de diminuer légèrement après 50 jours. Le graphique b, intitulé Comité Centre et Sud, indique que la surface par plante de la variété Allians a atteint environ 7000 cm² en 2023 et 2024, vers 40 jours, avant de diminuer. Pour la variété Passion, la surface par plante a culminé à environ 8700 cm² en 2023 et 2024, toujours vers 40 jours, puis a diminué rapidement. Le graphique c, intitulé Comité Nord montre que la surface moyenne par plante de la variété Allians a atteint environ 2500 cm² en 2023 et environ 3700 cm² en 2024, vers 50 jours, puis s'est stabilisée. Pour la variété Passion, cette surface a atteint environ 5000 cm² en 2023 et environ 7000 cm² en 2024, vers 50 jours. Le graphique d, intitulé INRAE Le Rheu indique que la surface par plante de la variété Allians a atteint environ 4000 cm² en 2023 et environ 7000 cm² en 2024, vers 50 jours, puis a diminué légèrement. Pour la variété Passion, cette surface a atteint environ 5000 cm² en 2023 et environ 12000 cm² en 2024, vers 50 jours, avant de diminuer légèrement en 2023.

4. Gestion informatique des données

L'objectif de cette action était la mise au point d'un système d'information pour la collecte, le stockage et la visualisation des données issues du réseau de capteurs mis en place dans les différents sites d'expérimentation et des données collectées par les opérateurs. Une étude détaillée a été réalisée pour proposer aux utilisateurs un ensemble « application web, base de données et service web en tâche de fond » permettant de répondre à cet objectif. La base de données développée a été hébergée dans un data center sécurisé (infogéré) au niveau de inov3PT (Figure 8). Un système de programme permanent (service Windows) interrogeait en permanence le serveur de stockage du prestataire PESSL Instruments avec des requêtes afin de récupérer les informations souhaitées associées à chaque capteur, de contrôler les données et d'émettre des alertes en cas d'anomalies, de consolider les données, et mettre à disposition des informations sous forme d'application web à destination des utilisateurs finaux.

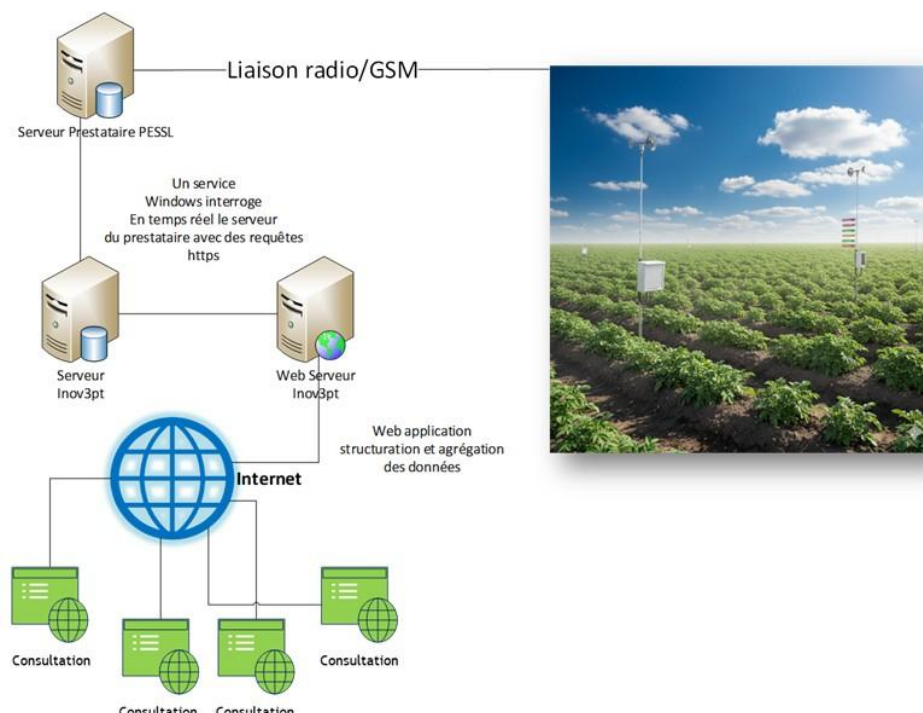


Figure 8 : Représentation schématique du cheminement des informations collectées par les capteurs jusqu'aux utilisateurs finaux.

Description de la figure

Le visuel est composé de deux parties principales. À gauche, un schéma technique illustrant une architecture de communication et de traitement de données. À droite, une photographie représentant un dispositif installé dans un champ agricole. Le schéma de gauche montre plusieurs serveurs et leurs interactions via des connexions réseau. En haut à gauche, un premier bloc intitulé « Serveur Prestataire PESSL » est représenté par une icône de serveur. Une liaison horizontale part de ce serveur vers la droite, annotée « Liaison radio/GSM ». La zone centrale correspond aux serveurs Inov3pt. Deux serveurs sont placés en dessous : Serveur Inov3pt et Web Serveur Inov3pt qui sont reliés par une connexion. Une annotation indique qu'un service Windows interroge en temps réel le serveur du prestataire via des requêtes HTTPS. À droite du Web Serveur Inov3pt, un texte indique : Web application structuration et agrégation des données. Sous les serveurs, une icône représentant un globe est associée au mot « Internet ». Plusieurs lignes partent de ce globe vers des icônes de postes utilisateurs schématisant la consultation des utilisateurs.

Cette base de données reprenait la liste des équipements présents sur chaque site, configurait les différentes parcelles d'un site (nom des sites, nombre de plantes, nombre de tiges, nombre de quadrats, variété), permettait l'enregistrement de données automatiques (capteurs) et manuelles (hauteur des plantes), et d'importer ou exporter des photos (surface foliaire, canopée).



5. Discussion : Confrontation des données de capteurs aux données de phénotypage

5.1. Analyse empirique

A partir des spectres de réflectance enregistrés avec les capteurs Apogee, deux indices de végétation ont été calculés, le NDVI et le EVI2. Ces deux indices ont permis de suivre l'évolution de la densité de végétation de la plantation à la sénescence des plantes de pomme de terre dans les différents sites. Sur le site en Ille et Vilaine (LRH) par exemple (Figure 3), les résultats obtenus ont montré que lors de la croissance active des plantes, la valeur de ces indices augmentait fortement démontrant un recouvrement progressif du sol, traduisant indirectement le développement des plantes. Cette phase était ensuite suivie par un plateau, correspondant à un état de la plante appelée la végétation stabilisée, puis une diminution brutale des indices associée à la sénescence des plantes et à la réouverture du couvert végétal. Ainsi, sans fournir directement des données chiffrées de surface foliaire, la dynamique des variables données par les capteurs permet déjà d'informer sur la dynamique du couvert.

5.2. Prédiction de la surface foliaire

Nous avons mobilisé des méthodes d'apprentissage automatique standard pour évaluer notre capacité globale à prédire une surface foliaire à un temps t à partir de données de capteurs acquises au temps t . Cela correspond à un problème de régression classique où nous allons chercher à prédire la surface foliaire par plante, variable réponse ou de sortie obtenue par le suivi longitudinal destructif du couvert, à partir d'un ensemble de variables d'entrées, ici toutes quantitatives et obtenues par les capteurs déployés dans le projet. Pour cela nous avons utilisé les données obtenues entre 2019 et 2024 sur le site INRAE de Le Rheu (LRH) sur lequel des données préliminaires au projet ont pu être intégrées pour maximiser le nombre d'observations. Les données brutes de surface foliaires présentant une forte variabilité inter-plantes rendent plus difficile les prédictions. Nous avons ici utilisé la surface foliaire obtenue par un modèle non-linéaire bi-logistique ajusté aux données par les moindres carrées. Ce modèle capture bien la dynamique moyenne du couvert observé (croissance et défoliation) et permet d'avoir des données de surface foliaire journalière (Glais *et al.* 2026). Concernant les données de capteurs, nous avons i) considéré les moyennes journalières, ii) remplacé les données manquantes, pouvant être imputées à des pannes (capteurs, antenne, serveur), en utilisant une interpolation linéaire et iii) moyenné les données journalières lorsque plusieurs capteurs du même type étaient présents dans la même parcelle. Comme prédicteurs de la surface foliaire nous avons considéré les indices de végétation NDVI et EVI2, la hauteur du couvert obtenu par ultrasons ainsi que la température et l'humidité de l'air. Trois modèles classiques d'apprentissage automatique ont été utilisés : la régression linéaire, les forêts aléatoires (Random Forest) et l'extrême gradient boosting (XGBoost) (Figure 9). Le jeu de données initial a été réparti aléatoirement en 80 % pour l'apprentissage et 20 % pour le test. Comme mesure de performance, nous avons considéré la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE), la moyenne des différences absolues entre valeurs prédites et valeurs réelles (MAE) et le coefficient de détermination (R^2), des métriques classiques pour les problèmes de régression. Les analyses ont été réalisées en utilisant le logiciel libre R et les packages caret, randomForest, xgboost et MLmetrics. En considérant toutes les données acquises sur le site INRAE pour la variété Passion, les résultats montrent une bonne prédiction de la surface foliaire. Pour de faibles valeurs de surface foliaire les modèles ont tendance à surestimer la surface alors que pour de fortes valeurs (typiquement une fois le couvert fermé) les modèles sous-estiment cette surface. C'est le modèle XGBoost, à priori plus performant, qui prédit le mieux devant les forêts aléatoires et enfin la régression linéaire qui elle ne capture pas les non-linéarités (Figure 9). Comme suggéré par le calcul des corrélations entre les variables, le calcul de l'influence des variables dans les prédictions montre que la hauteur et les indices de végétations (NDVI et EVI2) sont les

variables les plus importantes pour prédire la surface foliaire et suggère une influence très faible de la température et de l'humidité de l'air.

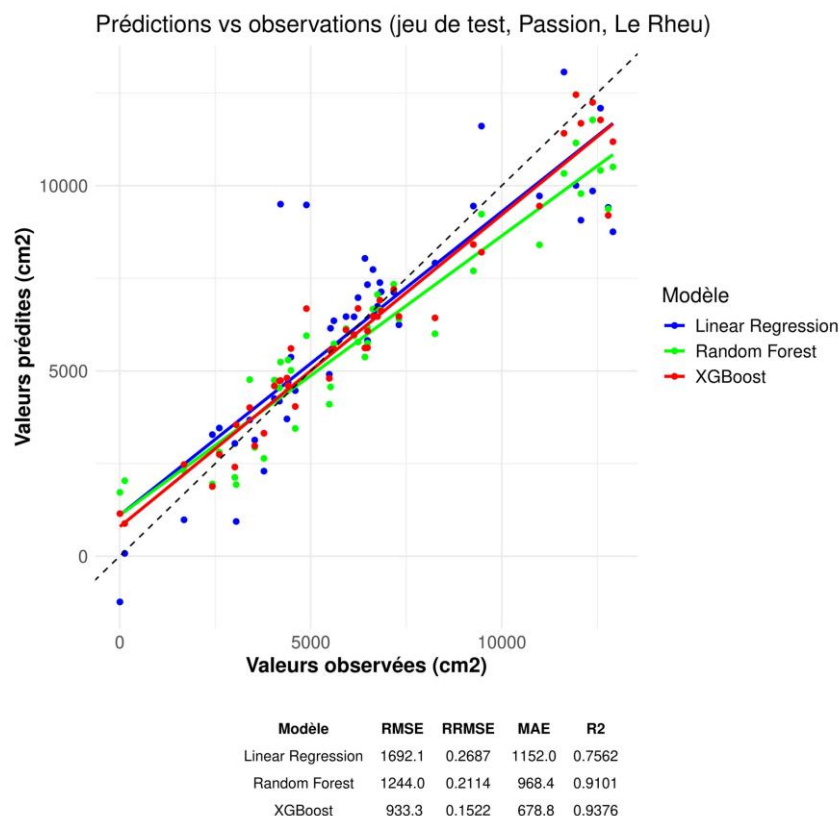


Figure 9 : Comparaison des valeurs prédites et observées (cm²) pour les trois modèles prédictifs. Chaque point représente une observation du jeu de test pour la variété Passion sur le site de Le Rheu. La ligne pointillée correspond à l'égalité parfaite ($y = x$). Les lignes colorées indiquent les tendances de prédiction pour chaque modèle : régression linéaire (bleu), forêt aléatoire (vert) et XGBoost (rouge). Les performances des modèles sont résumées par les indicateurs RMSE, RRMSE, MAE et R².

Description de la figure

La figure présente un nuage de points comparant des valeurs de surface foliaire observées (axe horizontal) à des valeurs prédites par des modèles (axe vertical) pour la variété Passion sur le site INRAE de Le Rheu. Les deux axes utilisent la même unité (cm²) et couvrent une plage allant de 0 à 14 000. Chaque point représente une observation individuelle de jeu de test. Trois ensembles de points sont distingués par couleur : bleu pour le modèle de régression linéaire, vert pour la forêt aléatoire et rouge pour le gradient boosting extrême. Une ligne diagonale en pointillés traverse le graphique du bas gauche vers le haut droit. Elle correspond à la première bissectrice qui représente la situation idéale où les valeurs prédites sont égales aux valeurs observées. Les points sont globalement alignés le long de la diagonale, indiquant une corrélation positive entre valeurs observées et prédites. La dispersion des points autour de la diagonale varie selon la couleur. Les points bleus montrent une dispersion plus importante autour de la diagonale avec des écarts marqués indiquant des sous-estimations et surestimations plus fortes. Les points verts et rouges sont plus proches de la diagonale avec des dispersion plus faibles.

Trois lignes continues, chacune associée à une des trois couleurs et donc modèles utilisés représentent les tendances moyennes. Les lignes montrent que les modèles ont tendance à surestimer la surface foliaire pour des valeurs allant jusqu'à 5000 cm² puis à la sous-estimer pour des valeurs plus fortes. Les lignes sont relativement proches et l'écart le plus notable correspond à la droite verte qui a une pente plus faible et montre que les forêts aléatoires sous-estiment plus la surface foliaire pour des valeurs importantes que les deux autres modèles. Sous le graphique un tableau présente quatre métriques utilisées pour évaluer les performances prédictives des trois modèles : RMSE, RRMSE, MAE et R². En prenant dans l'ordre suivant les modèles régression linéaire, forêt aléatoire et XGBoost le tableau montre que les erreurs (RMSE, RRMSE, MAE) diminuent du premier au troisième modèle alors qu'au contraire le coefficient de détermination augmente. Les résultats montrent que l'ensemble des modèles capture la tendance générale des données et que le modèle XGBoost (en rouge) prédit des valeurs plus proches des observations avec des erreurs plus faibles.



Dans un deuxième temps nous avons voulu savoir si l'apprentissage réalisé sur la variété Passion était transférable à la variété Allians, moins haute et au feuillage moins dense. Pour cela nous avons évalué les capacités prédictives des modèles présentés ci-dessus en considérant comme jeu de test les données acquises pour la variété Allians. Dans ce cas on remarque que c'est la forêt aléatoire qui prédit le mieux et que le XGBoost est le moins performant (Figure 10). De plus, on observe un biais important avec une surestimation des trois modèles. Cela met en exergue un problème de surajustement et la difficulté de prédire correctement la surface foliaire pour toutes les variétés. Néanmoins, dans les cas où le biais identifié est stable, ce qui est le cas ici, il est envisageable de corriger les prédictions a posteriori.

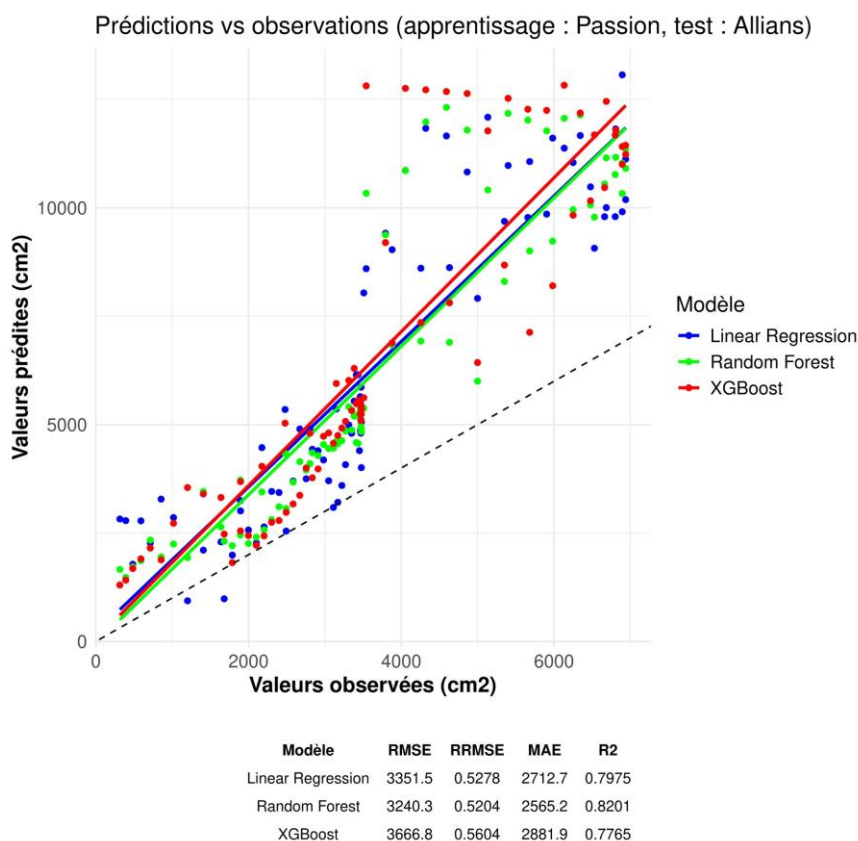


Figure 10 : Comparaison des valeurs prédites et observées (cm²) pour les trois modèles prédictifs lorsque l'apprentissage est réalisé sur la variété Passion et le jeu de test correspond aux données acquises pour la variété Allians. Chaque point représente une observation du jeu de test pour la variété Allians sur le site de Le Rheu. La ligne pointillée correspond à l'égalité parfaite ($y = x$). Les lignes colorées indiquent les tendances de prédiction pour chaque modèle : régression linéaire (bleu), forêt aléatoire (vert) et XGBoost (rouge). Les performances des modèles sont résumées par les indicateurs RMSE, RRMSE, MAE et R²

Description de la figure

La figure présente un nuage de points comparant des valeurs de surface foliaire observées pour la variété Allians sur le site INRAE de Le Rheu (axe horizontal) à des valeurs prédites par des modèles (axe vertical) entraînés avec les données acquises sur la variété Passion. Les deux axes utilisent la même unité (cm²) et couvrent une plage allant de 0 à 14 000. Chaque point représente une observation individuelle de jeu de test. Trois ensembles de points sont distingués par couleur : bleu pour le modèle de régression linéaire, vert pour la forêt aléatoire et rouge pour le gradient boosting extrême. Une ligne diagonale en pointillés traverse le graphique du bas gauche vers le haut droit. Elle correspond à la première bissectrice qui représente la situation idéale où les valeurs prédites sont égales aux valeurs observées.



Les points sont quasiment tous au-dessus de la diagonale indiquant une surestimation de la surface foliaire de la variété Allians. La dispersion des points ainsi que l'écart à la première bissectrice augmentent avec la surface foliaire. Trois lignes continues, chacune associée à une des trois couleurs et donc modèles utilisés représentent les tendances moyennes. Les lignes montrent que les modèles surestiment la surface foliaire et que le biais augmente avec la surface foliaire. Les lignes sont relativement proches et l'écart le plus notable correspond à la droite rouge qui a une pente plus élevée et montre que le modèle XGBoost surestime plus la surface foliaire pour des valeurs importantes que les deux autres modèles. Sous le graphique un tableau présente quatre métriques utilisées pour évaluer les performances prédictives des trois modèles : RMSE, RRMSE, MAE et R2. Le tableau montre que les erreurs (RMSE, RRMSE, MAE) diminuent dans l'ordre XGBoost, régression linéaire et forêt aléatoire, le coefficient évoluant logiquement dans le sens inverse.

6. Conclusions, perspectives

Le projet CANOPY a permis de montrer qu'il était possible d'avoir un outil numérique répondant à la demande forte de la filière plant de pomme de terre de pouvoir suivre en temps réel le développement de la plante pour permettre à terme d'adapter au contexte local (variété, croissance du couvert) les pulvérisations en huile minérale de protection contre les infections PVY. Ce projet met notamment en avant la large panoplie de compétences à mobiliser pour mettre au point, valider, déployer et utiliser ce type d'outil. En déployant des capteurs fixes sur quatre sites d'expérimentation, pendant quatre années, et sur deux variétés de pomme de terre nous avons pu faire la preuve de concept qu'il était possible de suivre la croissance du couvert en temps réel, mais aussi d'identifier différentes limites et perspectives.

La transmission sans fil des données et le déploiement d'un système informatique adapté permettent aux utilisateurs finaux d'accéder aux données en temps réels. La hauteur et les indices de végétation étant fortement corrélés au développement du couvert végétal, le simple suivi régulier de ces variables est très informatif et permet d'avoir une première idée de la dynamique du couvert. Par exemple une augmentation rapide de la hauteur et d'indices de végétation indiquent une croissance rapide du couvert. Des développements informatiques pourraient permettre de rendre ces informations encore plus facilement accessibles (e.g. applications smartphone) et conviviales.

Le phénotypage non destructif et destructif des couverts de pomme de terre réalisé lors du projet a fourni de nombreuses données quantitatives sur le développement foliaire des plantes qui était encore souvent estimé de manière empirique. L'ensemble de ces données a notamment mis en exergue une grande hétérogénéité de développement des plantes selon la localisation géographique de la culture, l'année, et la variété considérée. Ce dernier élément est en total accord avec les observations faites de façon empirique par les experts terrain qui estiment le regroupement des variétés en trois groupes selon la nature de la croissance des plantes : croissance lente / moyenne / rapide. Cette variabilité (variétale, localisation géographique, annuelle) complexifie énormément la gestion de protection des plantes contre les infections virales et met en avant le défi d'adapter la gestion au contexte local de chaque parcelle. En effet, une même variété produite dans des zones géographiques différentes présentera une dynamique de développement foliaire variable. De la même manière deux variétés produites dans une même parcelle pourront avoir un développement foliaire différent selon leur physiologie propre. Cette variabilité importante a pour conséquence que les recommandations générales faites pour protéger les couverts peuvent souvent être peu adaptées aux contextes locaux.

La première confrontation des données d'observation de la surface foliaire aux données issues des capteurs a montré que i) la forte variabilité inter-plantes de la surface foliaire diminue les performances des modèles pour prédire la surface foliaire à partir des capteurs (voir Glais *et al.* 2026), ii) qu'en lissant d'abord les surfaces foliaires, des modèles prédictifs communs peuvent relativement bien prédire avec un biais faible sur la surface foliaire à partir du suivi non destructif par capteurs et que iii) des données acquises sur une variété ne permettent pas de prédire sans biais la surface foliaire de toutes les variétés. Pour obtenir un meilleur modèle prédictif et limiter le sur-apprentissage sur une variété, il serait important de collecter des données (surface foliaire et suivi par capteur) dans un ensemble de variétés présentant des architectures et des dynamiques de croissances variées. Ce travail reste à compléter



notamment pour évaluer les transferts entre années et sites expérimentaux. Les modèles d'intelligence artificielle récents étant plus performants que les modèles de machine learning classiques comme ceux que nous avons utilisés, l'utilisation d'architectures types transformers pour les séries temporelles pourraient permettre d'améliorer la qualité des prédictions. De plus, il pourrait être intéressant d'envisager des prévisions à court terme pour essayer de prédire la surface foliaire les jours suivants. Répondre à ce type de question serait tout à fait intéressant pour avoir un outil d'aide à la décision et pourrait nécessiter la combinaison de modèles d'IA et de modèles d'écophysiologie.

L'analyse des données et le calcul de l'influence des variables dans les modèles de prédiction montre que quelle que soit la variété et sa dynamique de développement foliaire, en période de croissance active, la hauteur des plantes définie avec les capteurs à ultrasons, permettait de prédire de façon fiable la surface foliaire. En revanche, lors de la végétation stabilisée, c'est l'indice de végétation EVI2 qui serait préconisé pour la prédiction. Si la phase de croissance active est la plus importante il pourrait envisager de ne suivre que la hauteur du couvert, en particulier sa dynamique, pour avoir un bon proxy de la dynamique de la surface foliaire. Toutefois ces tendances pourraient dépendre de l'architecture de la plante et il faudrait étudier cet aspect plus en profondeur pour généraliser cette tendance. Si ce facteur de développement foliaire est pris en compte à l'avenir par les experts terrain pour les conseils apportés aux producteurs pour la modulation des pulvérisations huile, il sera important pour les obtenteurs de connaître la dynamique de développement foliaire de leurs nouvelles variétés par rapport aux autres variétés. Dans l'idéal, nous pourrions imaginer une approche d'agriculture de précision où chaque parcelle soit suivie en temps réel pour que les traitements soient adaptés à l'échelle de la parcelle. Une autre approche qui pourrait être moins précise mais intéressante, serait que ce suivi en temps réel du développement foliaire via les capteurs, se fasse dans chaque bassin de production de la pomme de terre, et sur chacun des trois groupes de variétés définis selon leur dynamique de développement foliaire.

A terme, en vue d'une utilisation optimale des capteurs à ultrasons et de réflectance en conditions de culture, une nouvelle réflexion devra être engagée pour identifier un système de portique capable de se baisser automatiquement à l'approche d'un engin agricole pour ne pas bloquer leur passage lors des différents traitements de la culture. On pourrait imaginer des systèmes similaires à ceux utilisés pour l'ouverture automatique de portails, adaptés à des portiques. Nous pourrions également envisager d'équiper les machines agricoles de caméras pour cartographier la parcelle et mieux décrire la variabilité spatiale de la surface foliaire. En combinant capteurs fixes et suivi embarqué par caméra de manière opportuniste (lorsque la machine passe), il serait ainsi envisageable de prédire la dynamique spatio-temporelle au sein de chaque parcelle.

La méthodologie et le dispositif appliqués jusqu'à présent permettent de collecter des données à l'échelle de la plante ; cependant il pourrait être également intéressant d'acquérir des données de développement foliaire à l'échelle de la feuille pour évaluer notamment la surface foliaire produite au cours du temps selon les étages foliaires et selon le stade physiologique de la plante (croissance active, végétation stabilisée). Ces informations sont cruciales pour une protection optimale de la plante face aux infections virales du fait que la protection apportée par l'huile est une protection de contact qui n'est pas efficace sur les nouvelles surfaces foliaires produites entre deux pulvérisations.

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 étaient 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

LECLERC, M. : <https://orcid.org/0000-0002-5314-461X>

LANGRUME, C. : <https://orcid.org/0009-0005-1279-6928>

LE HINGRAT, Y. : <https://orcid.org/0000-0002-26212541>

Contributions des auteurs

Laurent GLAIS : Pilotage des essais expérimentaux sur les 4 régions ; collecte des données destructives sur le site LRH en Ile et Vilaine

Melen LECLERC : Gestion des analyses statistiques et développement du modèle de prédiction ; collecte des données destructives sur le site LRH en Ile et Vilaine

Heiner DENZER : Intégration des capteurs et mise en place des capteurs dans les différents sites d'expérimentation

Christophe LANGRUME : Pilotage et suivi des capteurs INRAE ; collecte des données destructives sur le site LRH en Ile et Vilaine

Stéphane JUMEL : Développement de la méthode rapide d'évaluation de la surface foliaire ; collecte des données destructives sur le site LRH en Ile et Vilaine

Christophe DARGIER : Développement de la base de données

Philippe LATY : Mise en place et gestion de l'essai sur le site CCS en région Centre-Val de Loire

Philippe DOLO : Mise en place et gestion de l'essai sur le site BPI en région du Finistère

Sébastien VAST et David DUPRE : Mise en place et gestion de l'essai sur le site CN en région Hauts-de-France

Sarah CARDON : Formation des opérateurs à l'enregistrement des données manuelles sur la base de données, développement de la partie front-end permettant de visualiser les données collectées issues des capteurs

François VERNEY : Développement des outils de visualisation en temps réel des données collectées issues des capteurs

Frédéric BOULARD et Maryse URVOY : Plantation et récolte ; collecte des données destructives sur le site de la région Ile et Vilaine

Loïc DANIEL : Mise en place de l'essai sur le site LRH de la région Ile et Vilaine

Laura DEMEY : Responsable de la gestion administrative de projet

Yves LE HINGRAT : Pilotage initial du projet CANOPY

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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

Aux partenaires et personnes impliquées dans la mise en place et le suivi des essais, et aussi pour la gestion des capteurs.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a bénéficié du concours financier du ministère de l'agriculture et de l'alimentation via le compte d'affectation spéciale « Développement agricole et rural de recherche technologique pour la compétitivité et la durabilité des filières de la production à la transformation » dans le cadre de l'appel à projets Recherche Technologique 2020.

Références bibliographiques

Beczner, L., Horvath, J., Romhanyi, I., & Förster, H. (1984). Studies on the ethiology of tuber necrotic ringspot disease in potato. *Potato Research* 27: 339-352.

Boiteau, G., Singh, M., & Lavoie, J. (2009). Crop border and mineral oil sprays used in combination as physical control methods of the aphid-transmitted potato virus Y in potato. *Pest Management Science*, 65: 255-259.

Glais, L., Bellstedt, D.U. & Lacomme, C. (2017). Diversity, Characterisation and Classification of PVY. In: Lacomme C., Glais L., Bellstedt D.U., Dupuis B., Karasev A.V., Jacquot E. (Eds), *Potato virus Y: biodiversity, pathogenicity, epidemiology and management*. Springer International Publishing AG, Chan. Pp 43-76.

Glais, L., Leclerc, M. (2026). Volet technique final du projet CANOPY. Plateforme de la R&D Agricole. <https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/120159b8-9382-4d46-9b00-7b6e3524d0b8>

Hane, D.C., Hamm, P.B. (1999). Effects of seedborne potato virus Y infection in two potato cultivars expressing mild disease symptoms. *Plant Disease* 83: 43-45.

Jumel, S., Glais, L., Boulard, F., Langrume, C. & Leclerc, M. (2025). Conception d'un support de prises de vue et d'une chaîne d'analyse d'images pour l'estimation rapide de la surface foliaire sur feuilles détachées. *NOV'AE* 5.

MAAF (2015). Plan Ecophyto II.

Reboud, X., Bedoussac, L., Cellier, V., Cordeau, S., Delzon, S., Leclerc, M., & Jouan, J. (2022). Mobiliser les agroéquipements et le numérique pour des systèmes de culture sans pesticides. *ZÉRO PESTICIDE*, 177.

Rykbost, K.A., Hane, D.C., Hamm, P.B., Voss, R., & Kirby, D. (1999). Effects of seedborne potato virus Y on russet Norkotah performance. *American Journal of Potato Research*. 76: 91-96.

Pour citer cet article : Laurent GLAIS, Melen LECLERC, Heiner DENZER, Christophe LANGRUME, Stéphane JUMEL, Christophe DARGIER, Philippe LATY, Philippe DOLO, Sébastien VAST, Sarah CARDON, François VERNEY, David DUPRÉ, Frédéric BOULARD, Loïc DANIEL, Maryse URVOY, Laura DEMEY & Yves LE HINGRAT, 2026 - Phénotyper par capteurs le Couvert végétal de la pomme de terre pour mieux lutter contre le virus Y : Projet CANOPY (2020-2025). *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol112-art09>



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.



Prévision du risque de dégâts causés par les taupins sur les pommes de terre, et stratégies de lutte durables

Bruno NGALA¹, Ronan LE COINTE², Philippe LARROUDÉ³, Florian MANCEAU¹, Jérémy CIGNA^{1,4}, Sylvain POGGI², Amandine MOLLET⁵, Philippe DOLO⁶, François VERHEGGEN⁷, Yves LE HINGRAT^{1,8}

¹ inov3PT, rue des Champs Potez, 62217 Achicourt, France

² IGEPP, INRAE, Institut Agro, Univ Rennes, 35653, Le Rheu, France

³ Arvalis - Institut du végétal, 21 chemin de Pau, 64121 Montardon, France

⁴ CNRS, Institut de Biologie Intégrative de la Cellule, 1 Av. de la Terrasse, 91190 Gif-sur-Yvette, France

⁵ FREDON Hauts de France – 21 et 265 rue Becquerel 62750 Loos-en-Gohelle, France

⁶ Bretagne Plant Innovations, 471 La Gare, 29460 Hanvec, France

⁷ Université de Liège - Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech - Laboratoire d'Écologie chimique et comportementale - Bât. TERRA - Avenue de la Faculté d'Agronomie 2B - Gembloux 5030, Belgique

⁸ FN3PT, 43-45 Rue de Naples, 75008 Paris, France

Correspondance : bruno.ngala@inov3pt.fr ; ronan.le-cointe@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art10>

Résumé

Dans un contexte de retrait des solutions chimiques, les larves de taupins (*Agriotes* spp.) sont devenues des ravageurs majeurs de la pomme de terre. Le projet TAUPIC (2020–2024) a réuni un large consortium pour développer des outils de prévision du risque, évaluer des solutions alternatives (biocontrôle, variétés, plantes de service) et initier des stratégies de protection intégrée. Les résultats montrent (i) une hiérarchisation des facteurs de risque, (ii) une forte variabilité spatio-temporelle des infestations, (iii) une efficacité partielle du biocontrôle (0–45 %), (iv) des différences variétales significatives liées aux profils métaboliques, et (v) le développement d'outils innovants (barcoding ADN, élevage, olfactométrie). TAUPIC a permis de constituer un socle de connaissances et ouvre la voie à une protection durable contre les taupins (*Agriotes* spp.).

Mots-clés : Taupins *Agriotes*, Pomme de terre, Biocontrôle, Protection intégrée, Prévision du risque, Variétés

Abstract: Predicting the risk of damage caused by wireworms to potatoes and sustainable control strategies

In a context of declining availability of chemical solutions, wireworm larvae (*Agriotes* spp.) have become major pests of potato crops. The TAUPIC project (2020–2024) brought together a broad consortium to develop risk prediction tools, assess alternative solutions (biocontrol, varieties, companion crops), and initiate integrated pest management strategies. The results show (i) a ranking of risk factors, (ii) strong spatial and temporal variability in infestations, (iii) partial effectiveness of biocontrol (0–45%), (iv) significant varietal differences linked to metabolic profiles, and (v) the development of innovative tools (DNA barcoding, rearing methods, olfactometry). TAUPIC has established a solid knowledge base and paves the way for sustainable protection against wireworms (*Agriotes* spp.).

Keywords: Wireworms *Agriotes* spp., Potatoes, Biocontrol, Integrated protection, Risk factors, Varieties



1. Introduction

Les taupins (Coléoptères, Elateridae) constituent aujourd'hui des ravageurs majeurs de la pomme de terre, provoquant des pertes économiques importantes par des dégâts sur tubercules (piqûres, galeries, présence de larves) (Kuhar et Speese, 2009). Les espèces responsables se répartissent en deux grands groupes selon leur cycle biologique : des espèces à cycle court (2–3 ans) et d'autres à cycle long (4–5 ans), dont la dynamique influence fortement les niveaux d'infestation et la gestion du risque. La production de plants est particulièrement impactée en raison d'exigences réglementaires strictes, mais l'ensemble des filières est concerné (Kasirajan et Ngouajio, 2012 ; Poggi *et al.*, 2021). En France, la pression des taupins, variable selon les contextes pédoclimatiques et les rotations, tend globalement à s'accroître (Larroudé, P., 2015).

La situation est particulièrement critique dans certaines zones d'élevage, notamment dans l'Ouest (Larroudé, P., 2015). En Bretagne, une enquête a montré que près de la moitié des parcelles étaient touchées, voire jusqu'à deux tiers localement, avec des niveaux élevés de dégâts rendant certains lots non commercialisables. Des difficultés supplémentaires apparaissent à l'export, notamment vers des pays comme l'Égypte en raison d'exigences sanitaires ciblant certaines espèces non présentes en France. D'autres régions sont également fortement affectées : le Sud (notamment Perpignan), les Pays de la Loire, la Nouvelle-Aquitaine ou encore l'Auvergne-Rhône-Alpes, où des pertes économiques importantes et des abandons de production sont observés. À l'inverse, certaines zones comme la Beauce restent relativement moins touchées, probablement en lien avec les sols et les systèmes de culture.

Dans les Hauts-de-France, les attaques sont en progression, avec en 2019 environ 20 % de tubercules touchés en moyenne sur un réseau de surveillance dédié. Plusieurs espèces ont été identifiées, dont *Agriotes sordidus* et *A. lineatus*, tandis que cinq espèces adultes ont été piégées (cycle long (4–5 ans) : *A. sputator*, *A. gallicus*, *A. lineatus*, *A. obscurus*, et cycle court (2–3 ans) : *A. sordidus*). Toutes les filières sont concernées, et de nombreuses variétés présentent des dégâts significatifs. Les systèmes en agriculture biologique sont particulièrement vulnérables en l'absence de solutions de lutte efficaces autorisées.

Cette recrudescence s'explique en partie par le retrait progressif de substances actives efficaces, comme l'éthoprophos interdit en 2019, rendant nécessaire le développement de nouvelles stratégies de gestion. Le projet TAUPIC (Casdar 2020–2024) s'inscrit dans cette dynamique, avec pour objectifs : (i) améliorer la prévision des risques d'attaque, (ii) développer des solutions alternatives de protection des tubercules, et (iii) concevoir des stratégies de protection intégrée combinant différents leviers agronomiques et biologiques.

2. Matériels et méthodes

2.1. Améliorer la prévision de risques d'infestation et de dégâts de taupins & Epidémiosurveillance

2.1.1. Enquêtes en parcelles pour améliorer la prévision du risque d'infestation et de dégâts en pomme de terre

Des enquêtes menées en 2021 et 2022 ont couvert 359 parcelles et collecté près de 90 variables (pédologiques, historiques, culturelles, paysagères et climatiques). En raison de la disparité des données entre les bassins de production (nombre limité de parcelles sur la zone comité Nord) et les années (aucuns dégâts en 2021 sur la zone Comité Centre et Sud), les analyses se sont concentrées sur la Bretagne. Dans ce jeu de données, nommé « Bretagne Plants », 239 parcelles ont été retenues (voir Figure 1 pour la localisation des parcelles) pour constituer un jeu de données homogène, représentatif du principal bassin de production. Les analyses ont permis de hiérarchiser les facteurs

influençant l'infestation (assolement, conditions pédoclimatiques, environnement) et ceux liés aux dégâts (sensibilité variétale, météo annuelle, itinéraires culturaux). Des modèles statistiques et de *machine learning* ont été utilisés pour relier ces variables aux niveaux de dégâts observés.

Principales étapes :

- conception et actualisation des questionnaires d'enquête ;
- réalisation des enquêtes (entretiens, collecte de données variées) ;
- échantillonnage des parcelles : après la récolte, entre février et mars, 4 échantillons de sol de 8 litres chacun ont été prélevés aléatoirement pour caractériser les niveaux d'infestation en larves du genre *Agriotes* et non *Agriotes* ainsi que pour les analyses de sol (texture, pH, matière organique) ;
- extraction de données météorologiques (INRAE AGROCLIM) et paysagères (méthode ALM1).

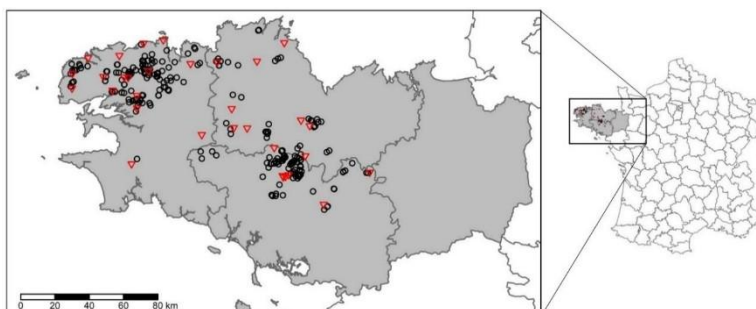


Figure 1 : Localisation des parcelles enquêtées en Bretagne : 239 parcelles ont été géolocalisées et sont représentées par des cercles noirs. Les stations météorologiques sont représentées par des triangles rouges.

Description de la figure 1

La figure 1 représente une carte géographique de la Bretagne sur laquelle sont localisés deux types de points.

Les parcelles enquêtées apparaissent sous forme de nombreux cercles noirs répartis sur l'ensemble du territoire. Leur densité varie selon les zones : certaines régions présentent une forte concentration de cercles, indiquant un nombre élevé de parcelles étudiées, tandis que d'autres zones sont plus faiblement couvertes.

Les stations météorologiques sont indiquées par des triangles rouges, moins nombreux et répartis de manière plus espacée. Leur position permet d'apprécier la couverture du territoire en points de mesure climatique.

L'ensemble de la carte permet de visualiser :

- la distribution spatiale des parcelles étudiées,
- le maillage des stations météorologiques,
- la proximité relative entre parcelles et stations.

La superposition de ces deux types d'informations met en évidence les zones où les données agronomiques (parcelles) et climatiques (stations) peuvent être croisées, ainsi que les éventuels déséquilibres de couverture spatiale.

2.1.2. Caractérisation des dégâts et codage de la variable réponse :

Les dégâts observés sur pomme de terre constituent la variable réponse. Cette variable a été considérée selon 2 types de codage : (i) sous forme d'une variable quantitative correspondant au nombre de tubercules non commercialisables par lot de 100 tubercules, et (ii) sous forme d'une variable qualitative comportant 2 modalités, présence ou absence de dégâts.



La Figure 2 montre la distribution de la variable « dégâts » exprimée sous sa forme quantitative, pour les enquêtes associées à « Bretagne Plants » : 125 lots ne présentent aucun dégât, 64 lots comportent entre 1 et 4 tubercules touchés, 34 lots comportent entre 5 et 10 tubercules touchés, et 16 lots comportent plus de 10 tubercules touchés avec une valeur maximale de 32.

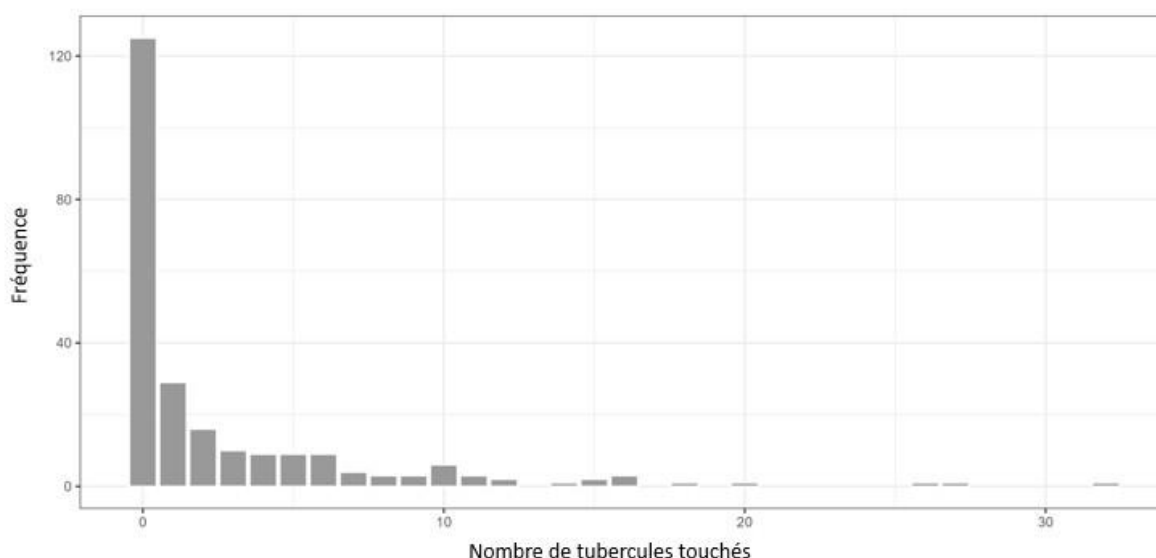


Figure 2 : Distribution des dégâts sur le jeu de données « Bretagne Plants » (variable quantitative).

Description de la figure 2

La figure 2 présente la distribution d'une variable quantitative correspondant au niveau de dégâts observés dans un ensemble de données.

Les valeurs sont représentées selon une échelle continue, organisée le long d'un axe horizontal (valeurs croissantes du niveau de dégâts). L'axe vertical indique la fréquence d'observation ou l'effectif associé à chaque intervalle de valeurs.

La distribution est visualisée sous forme d'un histogramme :

- des barres montrent la répartition des observations selon différentes classes de valeurs ;
- la hauteur des barres indique la concentration des observations pour chaque intervalle.

La figure permet d'identifier :

- la concentration principale des données (zone où les observations sont les plus fréquentes) ;
- l'étendue des valeurs (valeurs minimales et maximales observées) ;
- la présence éventuelle d'une asymétrie (distribution dissymétrique vers les faibles ou fortes valeurs) ;
- la dispersion des données (répartition plus ou moins étalée).

Selon la forme observée, la majorité des parcelles peut se situer dans des niveaux de dégâts faibles à modérés, avec éventuellement quelques observations présentant des niveaux plus élevés.

L'ensemble donne une vision globale de la variabilité des dégâts au sein du jeu de données et permet d'apprécier leur distribution statistique.

2.1.3. Liste des variables collectées et description des variables explicatives retenues :

Lors des enquêtes, près de 90 variables explicatives ont été collectées, regroupées en plusieurs catégories selon leur rôle dans l'infestation ou les dégâts. Après sélection, les variables retenues sont :

- niveaux d'infestation : Inf_Agriotes et Inf_NonAgriotes, issus de prélèvements de sol.



- caractéristiques pédologiques: pH, proportion d'argile, proportion de sable, matière organique.
- contexte paysager : proportions de prairies, cultures sarclées, céréales/légumineuses d'hiver et de printemps, colza d'hiver, surface de la parcelle.
- historique prairie: nombre d'années en prairie entre N-15 et N-5.
- rotation: années en prairie, labours, cultures d'hiver/printemps, cultures sarclées, chaulages.
- conditions climatiques N-1: précipitations + irrigation, température moyenne, jours avec humidité > 0,31, déclinés par saison (hiver, printemps, été, automne).
- itinéraire technique : dates de plantation, défanage, récolte, durées entre ces étapes, densité, type de buttage, traitement pyrèthrinoides.
- conditions climatiques pendant la culture: mêmes indicateurs que N-1, calculés sur 3 périodes (plantation-récolte, plantation-défanage, défanage-récolte).

Certaines variables (ex. variétés) ont été exclues pour manque de pertinence ou de représentativité.

2.1.4. Etude approfondie des facteurs de risques de dégâts sur un réseau de parcelles

En complément des enquêtes parcellaires, un suivi approfondi a été mené sur des sites pilotes de culture de pomme de terre afin de mieux comprendre la dynamique des taupins. L'objectif est de caractériser l'abondance larvaire, la diversité spécifique, l'évolution des attaques et d'identifier les conditions climatiques, culturales et pédologiques favorables aux infestations et aux dégâts, afin d'améliorer la prévision du risque. Sur les trois années d'étude, 28 sites pilotes ont été étudiés par le réseau des partenaires du projet, 9 sites en 2021, 10 sites en 2022 et 9 sites en 2023. Ces sites ont été suivis par les différents partenaires du projet : Bretagne Plants Innovations, Arvalis, Fredon Hauts de France, comité Centre et Sud, Comité Nord/ inov3PT.

Le dispositif expérimental repose sur 16 micro-parcelles (4 rangs de 35 m divisés en 4), observées à 5 dates après plantation (30, 60, 90, 110 et 130 jours). À chacune des dates d'échantillonnage, des prélèvements de sol (20x20x20 cm³) dans la butte ont permis de quantifier l'abondance larvaire, identifier les stades de développement et les espèces des taupins.

Les observations de dégâts sur 25 tubercules par micro-parcelle ont également été réalisées à 90, 110 et 130 jours post-plantation. Les variables climatiques telle que la pluviométrie (station météo à proximité du site), températures et humidité du sol à 15cm de profondeur (Sonde capacitive Sentek Drill & Drop, AGRALIS France) et agronomiques (caractéristiques physico chimiques du sol : texture, pH et % matière organique, date de défanage, durées de culture) ont été croisées avec les indicateurs d'abondance et de dégâts, sur différentes fenêtres temporelles (avant plantation, entre la plantation et les différentes observations, et autour du défanage). Les analyses ont été conduites séparément pour deux groupes d'espèces : Cycles longs 4 à 5 ans de vie larvaire dans le sol (*A. lineatus*, *A. sputator*, *A. obscurus*) → 9 sites (hors Vermelles_2023), et cycle court 1 à 3 ans de vie larvaire dans le sol (*A. sordidus*) → 8 sites.

2.1.5. Identification des espèces présentes

Les enquêtes et suivis de parcelles menées dans le cadre du projet ont permis d'actualiser les connaissances sur la diversité et la répartition des taupins dans les zones de production de pomme de terre. Les larves issues des tris de sol ont d'abord été caractérisées morphologiquement, permettant notamment d'identifier celles du genre *Agriotes* grâce à des critères spécifiques, comme la présence de spiracles sur le neuvième segment abdominal. Ce criblage a été réalisé principalement par l'INRAE-IGEPP, ainsi que par la Fredon Hauts-de-France et Arvalis pour certains échantillons. Les analyses ont ensuite été complétées par des identifications moléculaires après extraction d'ADN. Une PCR



multiplexe a notamment été utilisée pour détecter les principales espèces nuisibles en France du genre *Agriotes*, à cycle long (*A. lineatus*, *A. sputator*, *A. obscurus*) ou court (*A. sordidus*) (Mahéo et al., 2020).

Dans un second temps, les ADN des échantillons identifiés comme non *Agriotes* (et certains *Agriotes*) ont été analysés via un outil DNA barcoding adapté par le partenaire inov3PT à partir des travaux de Hebert et al. 2003. Cet outil moléculaire (bar-code ou code-barres génétique) consiste à amplifier une portion du gène de la Cytochrome Oxydase I (COI), de le séquencer et de l'identifier par analyse bio-informatique en la comparant à des séquences de référence disponibles dans les bases de données publiques. Cet outil permet d'identifier l'ensemble des espèces de taupins collectées et a été utilisé sur plus de 300 échantillons du projet (enquêtes et sites).

L'outil barcod a également été utilisé pour apprécier la diversité des populations de taupins présentes en parcelles d'essais durant la culture de pomme de terre et sur des échantillons prélevés après récolte autour de tubercules de pomme de terre et à un niveau moindre provenant de bennes et bâtiments de producteurs.

2.2. Développement de solutions innovantes et durables pour la prévention et la maîtrise des dégâts de taupins sur pomme de terre

2.2.1. Protéger les tubercules de pommes de terre, en évitant ou esquivant les attaques de taupins

L'objectif de cette tâche était d'identifier des stratégies de protection des tubercules de pommes de terre efficaces vis-à-vis des attaques de taupins. Elle consiste à évaluer différentes formulations et/ou stratégies de biocontrôle (microorganismes : *Metarhizium brunneum* F52, *Metarhizium brunneum* CB15-III, *Beauveria bassiana* ATCC74040 (Naturalis), *Beauveria bassiana* NPP111B005, macroorganismes : nématodes entomopathogènes, substances naturelles(extraits d'ail, extraits de piments et moutarde), d'amendements(cyanamide calcique, chitine, algues bore) + huiles essentielles,), stratégie appâts (plantes compagnes blé-orge, fertilisants organiques) ainsi que le levier variétal pour éviter les dégâts sur tubercules à la récolte.

Protection des tubercules

Quatorze (14) essais ont été implantés durant le projet de 2021 à 2023 pour évaluer différentes solutions dans une diversité de situations, avec l'appui des partenaires ou prestataires : Bretagne Plants Innovation (29), Astria (64), Fredon HdF et inov3PT (62), Midi Agro (16) et Arvalis (80). Les différentes solutions ont été appliquées selon différentes manières : soit en raie de plantation à l'aide de dispositifs de diffusion, soit en plein avant plantation, elles ont été soit incorporées dans le sol, soit pulvérisées sur la végétation à différents moments au cours du cycle de la pomme de terre. Les essais ont été menés en bande ou en micro-parcelles sur des dispositifs en blocs de Fischer à 4 répétitions de 4 rangs de 10 mètres de longueur. Sur chaque répétition de chacune des modalités 100 tubercules étaient observés et la présence d'une morsure (taille < 3.5 mm) ou d'un trou (taille > 3.5 mm) causés par les larves de taupins était noté.

2.2.2. Appétence de la plante cible – sensibilité variétale

Deux approches complémentaires ont été développées :

Essais au champ : quatre essais ont été menés en 2022 et 2023 évaluant la sensibilité de quinze variétés de pommes de terre en blocs de Fischer à six répétitions. L'évaluation portait sur 100 tubercules par répétition, distinguant les morsures superficielles (< 3,5 mm) et les trous profonds (> 3,5 mm) (collaboration Bretagne Plants Innovation).

Des tests en laboratoire (collaboration l'Université de Liège-Gembloux) ont été réalisés sur trois témoins de sensibilité : Charlotte (peu sensible), Spunta (moyennement sensible) ou Monalisa (très sensible)



identifiés dans le cadre des essais au champ ont pour objectif de définir le comportement des larves de taupins des espèces *A. obscurus* et *A. lineatus*.

Pour chaque variété, l'appétence des tubercules sur 15 jours ainsi que leurs effets sur le développement des larves de taupins des espèces *Agriotes obscurus* et *A. lineatus* a été évalué sur une période de 50 semaines. L'attractivité des variétés a ensuite été étudiée par des tests de choix binaires. Enfin, les composés organiques volatils (COV) émis par les tubercules, à deux stades physiologiques différents, ont été identifiés et quantifiés grâce à une collecte dynamique des composés volatils suivie d'analyses en chromatographie en phase gazeuse. Les méthodes utilisées sont consignées dans la publication de Chacon et al. (2023).

Activité alimentaire et croissance larvaire - L'activité alimentaire des taupins a été étudiée pour différentes variétés de pommes de terre en conditions contrôlées. Chaque larve était placée individuellement avec un tubercule dans une boîte contenant de la vermiculite humidifiée, maintenue dans l'obscurité à 21 ± 1 °C. Après quinze jours, les dégâts causés aux tubercules ont été évalués à partir du nombre de morsures, du nombre et de la taille des galeries profondes. Le poids des taupins et des tubercules a également été mesuré au début et à la fin des essais.

Attractivité et identification des COV

L'attractivité de différentes variétés de pommes de terre pour les taupins a été évaluée à l'aide d'un olfactomètre à deux branches. Les larves pouvaient choisir entre les odeurs émises par deux variétés de tubercules placées dans des bocal distincts. Après diffusion des odeurs, la position des taupins était observée afin d'identifier leur préférence olfactive. Les essais ont été réalisés en conditions contrôlées, avec plusieurs répétitions techniques.

Les tubercules ont été lavés, séchés puis stockés à 4 °C avant l'analyse des composés organiques volatils (COV). Deux tubercules étaient placés dans une chambre hermétique et les COV collectés durant 6 h sur des tubes adsorbants spécifiques. Les analyses ont été réalisées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS). Les composés ont été identifiés grâce à des bases de données et indices de rétention. Les quantités de COV ont ensuite été estimées et rapportées au poids sec des pelures, représentatif de la surface d'émission.

2.2.3. Etudes de la biologie des taupins en conditions contrôlées

Depuis 2020, un système d'élevage a été mis en place chez inov3PT à Achicourt, sur le modèle de l'IGEPP et d'Agroscope, afin de produire des populations homogènes de larves en conditions contrôlées. Le suivi quotidien des vols d'adultes (mars-juin), via des pièges à fourrage et des données météorologiques, a permis à la fois de collecter le matériel nécessaire aux élevages et d'analyser les facteurs environnementaux influençant leur activité. Ces élevages ont ensuite servi à conduire diverses expérimentations méthodologiques et à évaluer des stratégies de lutte en conditions contrôlées.

Un dispositif d'olfactométrie à 4 voies avec un pot central connecté au 4 pots périphériques via des tunnels, a été développé en 2021. Il a permis d'étudier les comportements et préférences alimentaires des larves de taupins et de cribler rapidement les extraits végétaux, variétés de pommes de terre et plantes de service selon leur attractivité ou leur caractère répulsif.

Entre 2022 et 2023, des couverts végétaux ont été testés en combinaison avec des champignons entomopathogènes (*Metarhizium brunneum*) encapsulé. Des études visant à identifier les couverts végétaux (sarrasin, moutard, radis fourrager, ray-grass anglais) impactant la ponte des adultes et le développement des jeunes larves de taupins ont été menées sous tunnel et en serre (2023 – 2024).



2.3. Analyses de données :

2.3.1. Améliorer la prévision de risques d'infestation et de dégâts de taupins & Epidémiosurveillance

2.3.1.1. Analyses des données issues des enquêtes

Dans le projet TAUPIC, la prévision du risque de dégâts repose sur la prédiction d'une variable réponse (quantitative : nombre de tubercules touchés, ou qualitative : présence/absence de dégâts) via des modèles de régression ou de classification. Trois algorithmes non linéaires ont été utilisés pour ces deux tâches : Random Forest (RF1), Conditional Random Forests (RF2) et Extreme Gradient Boosting (XGB), tous basés sur des ensembles d'arbres de décision. Pour la classification, la régression logistique (LOGREG) a également été appliquée. Les modèles ont été évalués selon :

- régression : MAE, RMSE, R^2
- classification : taux de bon classement (Accuracy)

La calibration s'est faite sur 239 parcelles, suivie d'une validation par validation croisée pour estimer la capacité prédictive sur de nouvelles parcelles. L'ensemble des analyses a été réalisé sous R v4.4.2.

2.3.1.2. Analyses des données issues de l'étude approfondie des facteurs de risques de dégâts sur un réseau de parcelles

Pour ce jeu de données les analyses réalisées par XLSTAT (version 2024.4.0.1424) sont basées sur la mise en relation des conditions climatiques, des caractéristiques physico-chimiques du sol et des pratiques culturales avec l'abondance larvaire ou les dégâts. Seules certaines relations dont les coefficients de corrélation (r) sont inférieurs à -0.50 ou supérieurs à +0.50 sont commentées. Certaines relations sont réalisées par le biais d'équations de prédiction en affichant le coefficient de détermination R^2 .

2.3.1.3 Analyse des données d'essais en micro-parcelles

La séquence de l'analyse se déroule comme suit : 1- L'essai est-il réaliste, c'est-à-dire capable de fournir des données utiles ? Pour cela, il faut que le niveau d'attaque dans le témoin non traité soit suffisant, 2 - les résultats sont-ils cohérents ? Pour cela, il faut que par comparaison au témoin non traité, la préparation de référence donne des résultats attendus. Si ces 2 conditions sont remplies, et après une transformation Arcsinus, les variables sont soumises à une analyse de variance (ANOVA) puis à un test de Tukey ($\alpha \leq 5\%$) pour comparer les préparations entre elles à l'aide du logiciel statistique R (v3.4.2).

2.3.1.3. Analyses des données d'essais en laboratoire

Les analyses statistiques ont été réalisées sous R afin d'évaluer l'effet des variétés de pommes de terre sur l'alimentation, le développement et l'attractivité des taupins. Différents tests statistiques (ANOVA, Kruskal-Wallis, Mann-Whitney-Wilcoxon) ont permis de comparer les variations de poids, les dégâts observés et la taille des galeries. Des modèles mixtes ont été utilisés pour analyser l'évolution du poids et de la taille des larves sur 50 semaines, en tenant compte de la variabilité individuelle. Les préférences olfactives des taupins lors des tests de choix ont été étudiées par modèles binomiaux. Enfin, les profils de composés organiques volatils (COV) des tubercules ont été comparés entre variétés et stades de développement grâce à des analyses multivariées (PermANOVA, ACP) et des analyses univariées.

2.3.1.4. Analyses des données issues d'essais en conditions contrôlées

Pour les expériences réalisées en conditions contrôlées, les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à l'aide de GenStats V21. Le seuil de significativité statistique entre les modalités a été déterminée à 95 % % niveaux de confiance à l'aide du test Tukey ($\alpha \leq 5\%$).



3. Résultats (figures et tables inclus)

3.1. Enquêtes en parcelles pour améliorer la prévision du risque d'infestation et de dégâts en pomme de terre

3.1.1. Résultats des modèles de prévision de la variable réponse quantitative (nombre de tubercules touchés)

Parmi les trois méthodes testées, RF1 et XGB présentent un très bon ajustement ($R^2 = 0,93$ et 1 respectivement), contrairement à RF2 ($R^2 = 0,57$). Ces performances élevées suggèrent un possible surapprentissage, justifiant une étape de validation. La Figure 3 compare les modèles en termes d'erreur (MAE, RMSE) et de variance expliquée (R^2). Un modèle de référence dit « nul » est également présenté : il consiste à prédire systématiquement la valeur moyenne des dégâts observés dans le jeu de données initial. Trois principaux enseignements en ressortent :

- les 3 modèles produisent des prédictions nettement meilleures que le modèle nul ;
- les 3 modèles présentent des performances équivalentes, à titre d'illustration des valeurs d'erreur absolue moyenne (MAE) entre prédictions et observations égales à 2,9, 3,0 et 2,8 respectivement pour RF1, RF2 et XGB ;
- ces performances estimées par validation croisée restent modestes.

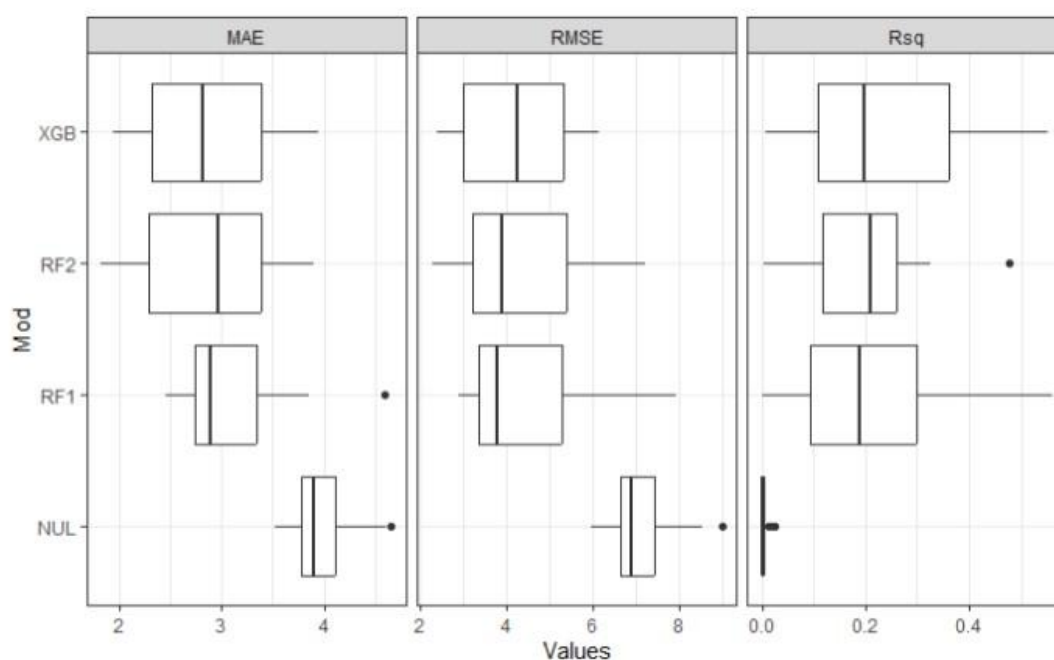


Figure 3 : Comparaison des performances de quatre modèles (RF1, RF2, XGB, modèle nul) pour prédire le nombre de tubercules touchés, à partir d'indicateurs d'erreur (MAE, RMSE) et de variance expliquée (R^2).

Description de la figure 3

La figure 3 compare quatre modèles de prédiction (RF1, RF2, XGB et un modèle de référence nul) selon trois indicateurs : MAE, RMSE et R^2 .

Chaque modèle est associé à des valeurs permettant d'évaluer :

- la précision des prédictions (MAE, RMSE),
- la capacité à expliquer la variabilité des données (R^2).



Les tendances observées sont les suivantes :

- RF1 et XGB présentent de faibles erreurs et des valeurs élevées de R^2 , indiquant de bonnes performances.
- RF2 affiche des erreurs plus élevées et un R^2 plus faible, traduisant une performance intermédiaire.
- le modèle nul présente les erreurs les plus fortes et un R^2 très faible, servant de référence minimale.

L'ensemble met en évidence des différences nettes de performance entre les modèles et permet d'identifier les plus efficaces pour la prédiction des dégâts.

3.1.2. Identification et hiérarchisation des variables explicatives prépondérantes pour la variable réponse quantitative (nombre de tubercules touchés)

Chacun des 3 algorithmes appliqués possède une mesure propre de l'importance des variables explicatives. Le Tableau 2 dresse le bilan des variables identifiées comme importantes, et de leur hiérarchisation, et souligne en caractères gras les variables dont l'influence fait consensus : le niveau d'infestation en larves du genre *Agriotes* (INF_Agriotes), mesuré sur la base de 4 tris de sol par parcelle, le pH (Sol_pH) et la teneur en matière organique (Sol_MO).

Parmi les variables impliquées dans le processus de colonisation de la parcelle, outre le pH et la teneur en matière organique, 4 variables explicatives sont mises en exergue par 2 algorithmes simultanément : Rota_prairie_nb (par XGB et RF2), la surface de la parcelle (Parcelle_Surface, par RF1 et XGB), le nombre d'années en cultures sarclées (Rota_CS, par RF2 et XGB), et les conditions météorologiques en période estivale (Meteo_summer_n.1_temperature, par RF1 et XGB).

Parmi les variables impliquées dans le processus d'attaques sur pomme de terre, aucune n'est consensuelle aux 3 méthodes. Toutefois, l'itinéraire technique de la culture de pomme de terre est représenté avec la conduite de la culture en buttes ou en billons (ITK.ecart) identifiée comme importante par RF2 et XGB, et la durée de la culture (ITK_Delta_plant_def et ITK_Delta_def_rec) identifiée par RF1 et XGB. De plus, les conditions climatiques entre le défanage et la récolte apparaissent via la variable Meteo_N_Hum_0.31_def_rec qui correspond au nombre de jours entre le défanage et la récolte où le sol présente une humidité supérieure à 0.31, identifiée comme influente par RF1 et XGB.

De façon moins consensuelle, l'algorithme XGB identifie comme importantes la texture du sol, les proportions de surface en prairie et culture sarclée dans le paysage, le nombre d'années en céréales ou légumineuses d'hiver, et plusieurs caractérisations des conditions météorologiques l'année précédente. Le nombre de labours est quant à lui identifié par l'algorithme RF2.



Tableau 2 : Synthèse des variables identifiées comme importantes pour la prévision des dégâts exprimée en nombre de tubercules touchés par lot, pour chacun des 3 algorithmes mis en oeuvre (RF1, RF2, XGB). Les variables faisant consensus pour les 3 méthodes sont surlignées en caractères bleus, et en vert lorsque le consensus est limité à 2 méthodes.

Random forest (RF1)	XGBoost (XGB)	Conditional random forest (RF2)
SoL_pH	SoL_pH	ITK_ecart
Meteo_N_Hum_0.31_def_rec	Meteo_N_Hum_0.31_def_rec	INF_Agriotes
Meteo_winter_n.1_temperature	Meteo_winter_n.1_precipitation	SoL_pH
Meteo_spring_n.1_temperature	Parcelle_Surface	Rota_Lab
INF_Agriotes	Meteo_summer_n.1_temperature	Rota_CS
Parcelle_Surface	Rota_CS	Rota_prairie_nb
ITK_Delta_def_rec	Paysage_PJ_nb	SoL_MO
Meteo_summer_n.1_temperature	INF_Agriotes	Meteo_autumn_n.1_humidite_du_sol
SoL_MO	SoL_Sables	
ITK_Delta_plant_def	SoL_MO	
	Meteo_Pluie_irri_def_rec	
	Paysage_CS	
	ITK_ecart.Buttes	
	Rota_Interculture	
	ITK_Delta_plant_def	
	SoL_argiles	
	Meteo_winter_n.1_temperature	
	Rota_CLH	
	Paysage_CH	
	Paysage_CLH	
	Meteo_spring_n.1_temperature	
	ITK_Delta_def_rec	
	Rota_prairie_nb	
	Meteo_Tmoy_Pla_def	
	Meteo_spring_n.1_humidite_du_sol	

3.1.3. Résultats des modèles de prévision de la variable réponse qualitative (présence / absence de dégâts)

L'ajustement des modèles testés sur le jeu de données présente de très bons résultats, exprimés sous forme de valeurs élevées du taux de bon classement des lots (avec ou sans dégâts). Ces valeurs sont 1, 1, 0.88 et 0.78 pour RF1, XGB, RF2, et LOGREG respectivement. La Figure 4 montre les résultats en termes de bon classement des modalités de la variable réponse qualitative (présence/absence de dégâts). Les principaux enseignements mis en évidence sont :

- tous les modèles testés améliorent la prévision du risque de dégâts par rapport à un modèle nul (qui prédirait systématiquement la classe la plus représentée, conduisant ici à un taux de bon classement de 52 %);
- les 4 modèles présentent des performances très similaires, avec une valeur moyenne de taux de bon classement égale à 61 % pour LOGREG, 62 % pour RF2 et XGB, et 64 % pour RF1 ;
- les capacités prédictives, estimées par validation croisée, restent modestes ;



- les modèles les plus flexibles de classification non linéaire (RF1, RF2, XGB) ne se démarquent pas significativement d'un modèle de régression linéaire généralisée (LOGREG).

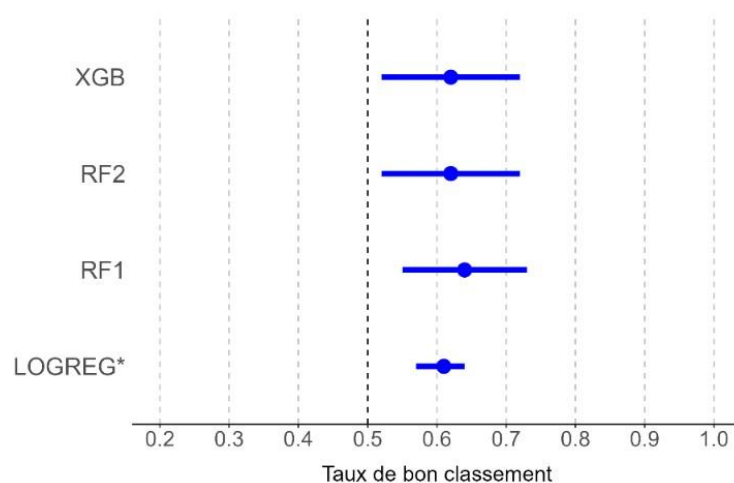


Figure 4 : Taux de bon classement pour un ensemble de lots de validation, i.e. n'ayant pas servi lors de la phase de calibration du modèle de prévision du risque. Symbole : valeur moyenne. Ligne : écart-type, sauf pour la méthode LOGREG (intervalle de confiance à 95 %).

Description de la figure 4

La figure 4 présente les performances de différentes méthodes de classification appliquées à un ensemble de lots de validation. Chaque méthode est représentée individuellement sur un axe horizontal (catégories distinctes), permettant une comparaison directe de leurs résultats.

Pour chaque méthode, un symbole central indique la valeur moyenne du taux de bon classement. Ce symbole constitue la valeur de référence pour comparer les performances entre méthodes.

Autour de cette valeur moyenne, une ligne verticale représente la variabilité des résultats :

- pour la majorité des méthodes, cette ligne correspond à l'écart-type, traduisant la dispersion des performances entre les lots testés ;
- pour la méthode LOGREG, la ligne représente un intervalle de confiance à 95 %, indiquant la plage dans laquelle se situe la valeur moyenne avec un niveau de confiance statistique donné.

Les principales informations visuelles reposent sur :

- la position des symboles (comparaison des performances moyennes entre méthodes),
- la longueur des lignes (niveau de variabilité ou d'incertitude associé à chaque méthode).

La figure permet ainsi d'identifier visuellement les méthodes offrant les meilleures performances moyennes, ainsi que celles dont les résultats sont les plus stables ou, au contraire, les plus variables selon les lots de validation.

3.1.4. Identification et hiérarchisation des variables explicatives prépondérantes pour la variable qualitative (présence / absence de dégâts)

Concernant les dégâts exprimés en termes de présence/absence de tubercules touchés le Tableau 3 dresse le bilan des variables identifiées comme importantes, et de leur hiérarchisation, et souligne en caractères gras (bleus et verts) les variables faisant le plus consensus. Au-delà du niveau d'infestation de la parcelle en larves de taupins du genre *Agriotes* (INF_Agriotes), les principales catégories de variables identifiées comme influentes sur les dégâts sont les caractéristiques pédologiques (le pH), les conditions météorologiques, la surface de la parcelle, le travail du sol dans la rotation (Rota_lab), et dans une moindre mesure le contexte paysager.



Tableau 3 : Synthèse des variables identifiées comme importantes pour la prévision des dégâts exprimés en termes de présence/absence de tubercules touchés dans un lots, pour chacun des 4 algorithmes mis en œuvre (RF1, RF2, XGB, LOGREG). Les variables faisant consensus pour 3 ou 4 méthodes sont surlignées en caractères bleus, et en vert lorsque le consensus est limité à 2 méthodes. *Les seuils de significativité sont inférieurs à 0.05 excepté pour les variables repérées par une astérisque.

Random forest (RF1)	XGBoost (XGB)	Conditional random forest (RF2)	Régression logistique (LOGREG)*
Meteo_Pluie_irri_def_rec	Meteo_Pluie_irri_def_rec	INF_Agriotes	INF_Agriotes
Sol_pH	Meteo_autumn_n.1_temp	Meteo_spring_n.1_temp	Rota_prairie_nb
Parcelle_Surface	Parcelle_Surface	Meteo_Pluie_irri_def_rec	Rota_Lab
Paysage_CS	Sol_pH	Rota_Lab	Rota_CLH
Sol_MO	Paysage_CS	Meteo_autumn_n.1_temp	Rota_CS
Sol_Sables	Paysage_PJ_nb	Parcelle_Surface	Sol_pH
	Sol_Sables	Sol_pH	Meteo_summer_n.1_temp
		Histo_prairie_nb	Meteo_spring_n.1_precip
		Meteo_autumn_n.1_hum.sol	Meteo_spring_n.1_temp
		Rota_CLP	Parcelle_Surface*
			Paysage_CLH*
			Meteo_autumn_n.1_precip*
			Meteo_N_Hum_0.31_def_rec
			*

3.1.5. Enseignements des enquêtes en parcelles de producteurs

En préambule, il convient de souligner que la définition de la variable réponse traduisant le niveau de dégâts joue un rôle crucial dans la calibration du modèle de prévision du risque de dégâts. Dans le cadre du projet TAUPIC, le diagnostic du statut d'un tubercule (« touché » ou « non touché ») a été calqué sur la réglementation concernant la certification de plants de pomme de terre, les tubercules étant notés « touchés » dès lors que les symptômes correspondant à 3 galeries étaient observés. La question se pose de considérer alternativement une variable réponse dont la modalité « touché » correspond à la notation d'un symptôme attribué aux taupins, quelle que soit la sévérité observée. Notons que, selon que l'on retienne par exemple 1 ou 3 galeries pour déclarer un tubercule « touché », la distribution de la variable réponse codant les dégâts varie significativement (impacts sur le nombre de lots – et donc de parcelles- avec dégâts, et sur l'intensité des dégâts dans un lot échantillonné sur une parcelle).

Concernant les variables influentes, quelle que soit l'approche mise en œuvre (traitement de la variable réponse de manière quantitative ou qualitative, et type d'analyse : modèles non linéaires de machine learning ou modèle de régression logistique), plusieurs variables explicatives font consensus et sont identifiées comme importantes pour la prévision des dégâts causés par les larves de taupins sur les pommes de terre. Le niveau d'infestation en larves du genre *Agriotes* apparaît comme influent, mais pas systématiquement, contrairement à ce que nous attendions. Réalisée sur la base de quatre tris de sol par parcelle, quelques mois après la récolte du lot de pommes de terre, cette mesure du niveau d'infestation peut en fait être remise en cause, car elle ne reflète pas fidèlement la pression des larves de taupins avant la plantation, de nombreuses larves étant présentes dans les tubercules à la récolte. De plus, sur les 239 parcelles que compte le jeu de données, seules 124 larves du genre *Agriotes* ont été échantillonnées, soit en moyenne 0,51 larve par parcelle : ce signal est peut-être trop faible pour être mis en avant par les modèles. À titre de comparaison, l'outil d'aide à la décision pour la prévision des niveaux d'infestation sur le maïs, développé par l'IGEPP en collaboration avec ARVALIS, s'est appuyé sur l'analyse des résultats d'enquêtes réalisées dans 419 parcelles, dans lesquelles un total de



1 436 larves a été collecté, soit en moyenne 3,4 larves par parcelle. Nous remarquons également que des larves du genre *Agriotes* n'ont été trouvées que dans 43 des 114 parcelles signalées avec des dégâts. Ceci confirme qu'il est encore très difficile de mettre en relation le nombre de larves capturées avec les dégâts à la récolte. Ceci est vrai quelle que soit la méthode d'échantillonnage, comme le montre Horton (2006), qui a constaté que des dégâts significatifs pouvaient être observés alors qu'aucune larve n'avait été trouvée.

Comme prévu, les caractéristiques pédologiques, notamment le pH et la teneur en matière organique, ont un impact important sur les dégâts causés par les taupins sur les cultures de pomme de terre. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Poggi *et al.* (2018) et Hermann *et al.* (2013), publiés dans la littérature scientifique. Les analyses statistiques réalisées dans le cadre du projet TAUPIC montrent que la texture du sol est également influente, mais dans une moindre mesure. Ceci peut s'expliquer par la faible variabilité des teneurs en sable et en argile du jeu de données, la quasi-totalité des parcelles étudiées ayant une texture limoneuse.

Comme l'ont montré des travaux récents effectués à l'IGEPP (cf. Poggi *et al.*, 2021), la disposition des éléments du paysage dans l'espace et dans le temps peut impacter l'infestation de la parcelle par les taupins. Dans notre étude, les variables décrivant le contexte paysager sont assez peu représentées. La surface de la parcelle apparaît néanmoins influente, de même que les proportions du contexte paysager local en prairies et cultures sarclées, mais dans une moindre mesure.

Parmi les variables décrivant l'historique de la parcelle, l'historique récent, traduit par les variables descriptives associées à la nature de la rotation (i.e. sur les cinq dernières années), apparaît plus influent sur le niveau de dégâts que l'historique considéré sur une période plus longue (i.e. sur les années N-15 à N-5). Il convient de signaler que dans le jeu de données actuellement analysé, la variable *Histo_prairie_nb* est la moins bien renseignée (8 données manquantes, soit 3,5 % du total). Cette variable n'ayant pu être renseignée via le registre parcellaire graphique (RPG), car les données n'étaient disponibles qu'au niveau de l'ilot jusqu'en 2014 et non de la parcelle, il serait pertinent de prévoir une collecte dès la phase d'enquête lors des projets futurs. En effet, dans l'étude de Roche *et al.* (2023), la présence d'une prairie dans l'historique de la parcelle (15 à 5 ans avant l'enquête sur le terrain) a montré un effet significatif sur l'abondance des larves de taupins. Par ailleurs, nos résultats montrent que le nombre de labours au cours des cinq dernières années influence le niveau de dégâts. Ceci est en accord avec différents travaux publiés dans la littérature scientifique qui montrent que le travail du sol peut exposer les larves à la surface et augmenter leur taux de prédation, et que l'arrêt du labour augmente les densités larvaires (Le Cointe *et al.*, 2023). A noter que les nombres d'années en cultures sarclées et en prairie apparaissent comme des variables explicatives d'importance.

3.2. Etude approfondie des facteurs de risques de dégâts sur un réseau de sites-pilotes

3.2.1. Caractérisation des populations de taupins et l'évolution de l'abondance larvaire

Sur trois années d'étude (2021-2023), 28 sites ont été suivis, mais seulement 17 ont été retenus pour l'analyse finale. Les populations de taupins étaient dominées par des espèces du genre *Agriotes*, avec une prédominance d'*Agriotes sordidus* (espèce à cycle court) dans le sud de l'Aquitaine et en Vendée, d'*Agriotes sputator* dans le Pas-de-Calais et en Haute-Vienne, et un mélange d'espèces (*A. lineatus*, *A. sputator* et *A. obscurus* – espèces à cycles longs) dans l'Aisne et dans le Finistère. Les analyses ont montré une augmentation de la taille des larves des espèces à cycles longs au fur et à mesure du cycle de culture Figure 5.

3.2.2. Evolution de l'abondance larvaire

Les conditions climatiques (température et pluviométrie) du printemps de l'année précédente, pourraient avoir un effet sur l'abondance larvaire observée au début du cycle de la pomme de terre. Une



température élevée au printemps favorise l'abondance larvaire, tandis qu'une pluviométrie élevée a un effet légèrement inhibiteur (Roche *et al*, 2023). Dans le cadre de cette étude, une relation positive ($r = 0.598$; $p > 0.20$) est observée entre l'abondance 30 jours après plantation et la température base 10°C cumulée au printemps (de 15 avril au 15 juin) de l'année précédente. L'effet de la pluviométrie est plus limité.

Les observations réalisées au cours de la période de culture montrent, en fonction des espèces de taupins présentes sur les sites suivis, des résultats intéressants sur l'évolution des tailles de larves dans les 20 premiers centimètres du sol (Figure 5) et l'évolution des niveaux d'abondances larvaires (Figure 6). Pour *Agriotes sordidus*, il n'est pas observé d'augmentation réelle des populations dans la butte en cours du cycle de la culture. En revanche pour les espèces à cycles longs, l'abondance larvaire augmentait régulièrement, la relation entre l'abondance mesurée en date1 (30 jours après plantation - 30JAP) et l'abondance cumulée à la fin du cycle de culture (date 5 130JAP) était significative ($r = 0.861$; $p < 0.01$).

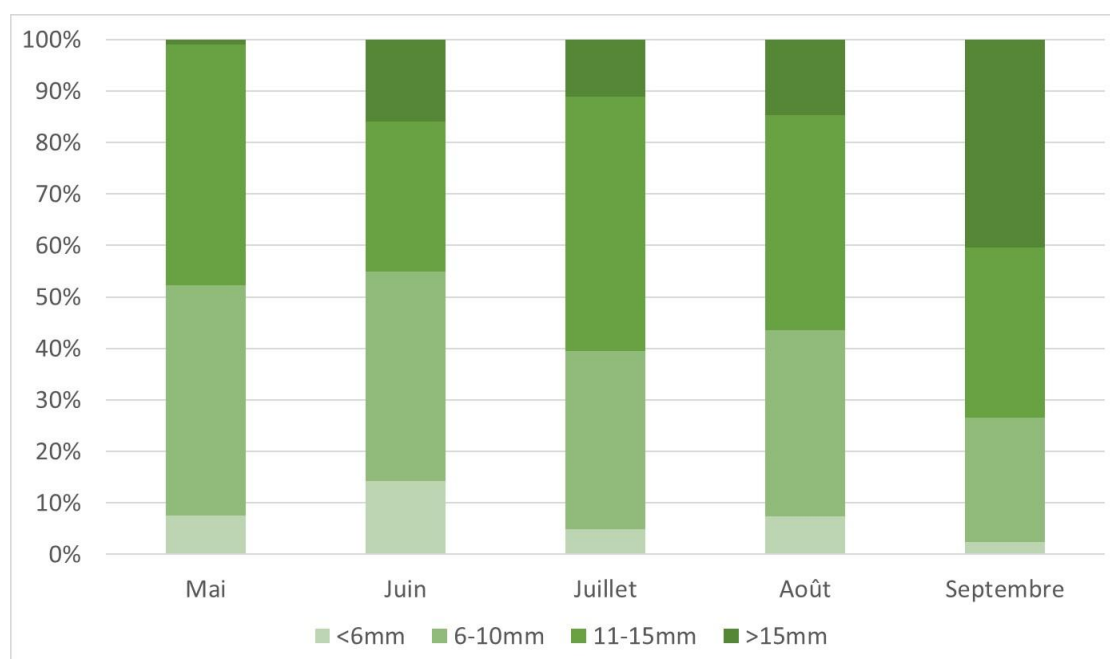


Figure 5 : Cinétique cumulée de capture des larves de taupins à cycles longs par classe de taille sur la durée totale d'observation.

Description de la figure 5

La figure 5 montre une évolution croissante au cours de la période mai – septembre dans l'horizon 0-20 cm du sol des fréquences de larves âgées dont la taille est supérieure à 15 mm susceptible de faire des dégâts dans les tubercules mûres.

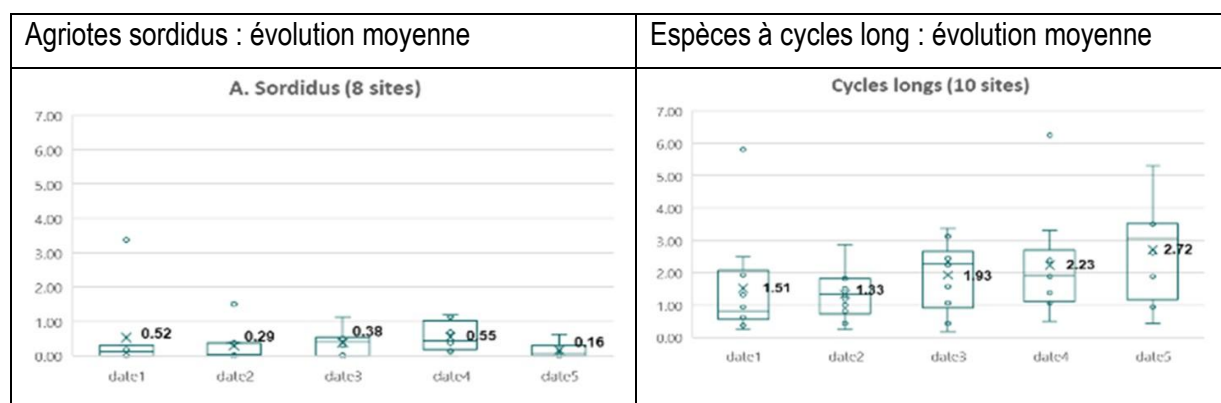
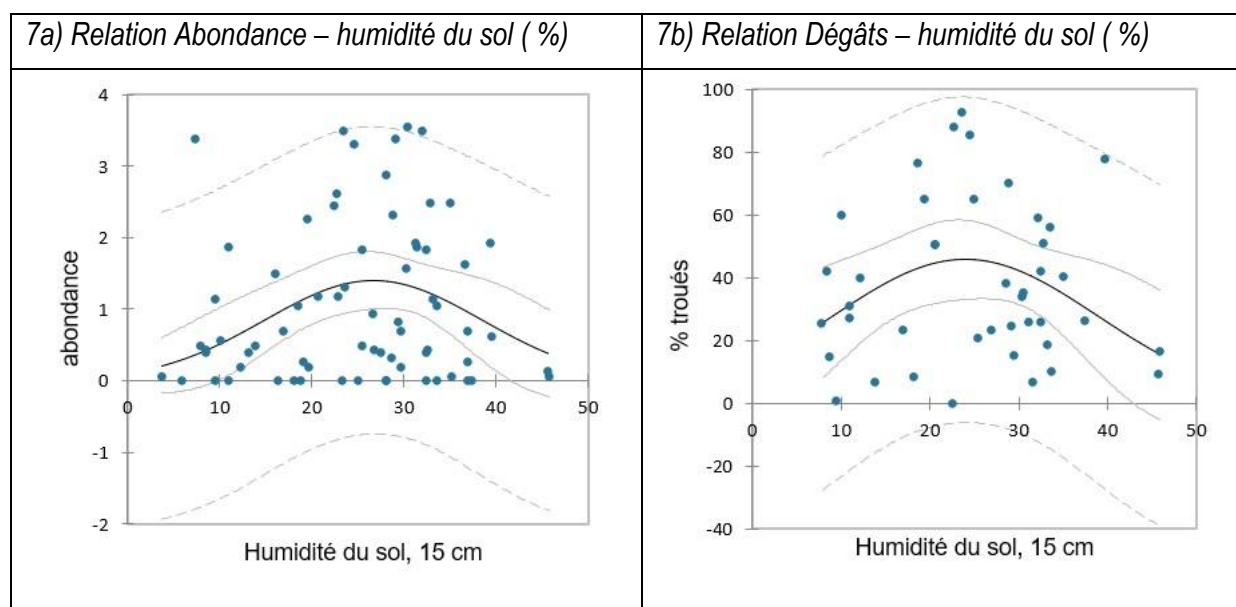


Figure 6 : Evolution de l'abondance larvaire par année et par site (nombre de larves/tri de sol) pour les différentes dates de notations date1 (J+30), date2 (J+60), date3 (J+87), date4 (J+115) et date5 (J+130). Les espèces ayant un long cycle de vie comprennent *Agriotes sputator*, *A. lineatus*, *A. obscurus*.

Pour *Agriotes sordidus*, aucune augmentation réelle des populations dans la butte en cours du cycle de la culture n'est observée (figure 6). En revanche pour les espèces à cycles longs, l'abondance larvaire augmente régulièrement, la relation entre l'abondance mesurée en date1 (30 jours après plantation - 30JAP) et l'abondance cumulée à la fin du cycle de culture (date 5 -130JAP) était significative ($r = 0.861$; $p < 0.01$).

3.2.3. Impact du climat sur l'abondance larvaire et les dégâts de taupins

L'analyse des conditions climatiques en cours de culture n'a pas permis de démontrer de manière claire leur impact sur l'évolution des dégâts ou de l'abondance larvaire. Les conditions de températures dans cette étude n'ont pas eu d'impact sur les deux indicateurs. Seuls les résultats obtenus sur l'humidité du sol sont détaillés (Figures 7).



Figures 7 : Abondance larvaire et dégâts en fonction de l'humidité du sol (%) à 15 cm de profondeur le jour de l'observation (courbes -----95 % Intervalle de confiance, - - - - - 95 % Intervalle de prédiction)



Description de la figure 7

La figure 7 représente la relation entre l'humidité du sol mesurée à 15 cm de profondeur et deux variables observées : l'abondance larvaire et le niveau de dégâts.

L'axe horizontal correspond à l'humidité du sol (en %). L'axe vertical indique, selon les graphiques ou les courbes, soit l'abondance larvaire, soit l'intensité des dégâts. La figure peut comporter une ou deux séries de courbes distinguant ces deux variables.

Pour chaque relation, une courbe principale illustre la tendance moyenne des observations en fonction de l'humidité du sol. Cette courbe met en évidence l'évolution globale (augmentation, diminution ou relation non linéaire) des variables étudiées.

Deux types de bandes ou lignes encadrent cette courbe :

- des lignes continues délimitent l'intervalle de confiance à 95 %, représentant la zone dans laquelle la valeur moyenne estimée est susceptible de se situer ;
- des lignes en tirets délimitent l'intervalle de prédiction à 95 %, plus large, correspondant à la dispersion attendue des observations individuelles autour de la courbe moyenne.

La largeur de ces intervalles varie le long de l'axe des abscisses, traduisant des niveaux d'incertitude différents selon les valeurs d'humidité du sol.

L'ensemble permet d'apprécier visuellement :

- la forme de la relation entre humidité du sol et variables biologiques,
- le niveau d'incertitude associé à l'estimation de cette relation,
- la variabilité attendue des observations individuelles.

La relation entre humidité du sol à 15 cm de profondeur et abondance larvaire (figure 7a) **n'est pas linéaire** (elle est en forme de cloche). Lorsque l'humidité est comprise entre 15 et 30 %, les niveaux d'abondance larvaire sont les plus élevés en deçà et au-delà l'abondance larvaire est plus faible.

La relation entre humidité du sol à 15 cm de profondeur et les dégâts sur tubercules (figure 7b) n'est pas linéaire non plus, elle suit l'évolution de la présence de larves dans l'horizon du sol. Les niveaux de dégâts sont élevés entre 20 et 30 % d'humidité du sol, et reste plus faibles dans des sols plus secs ou plus humides.

3.2.4. Évolution des dégâts sur les tubercules

Les dégâts mesurés sur les tubercules étaient importants dès 87 jours après plantation et évoluaient peu après la date de défanage (Figures 8).

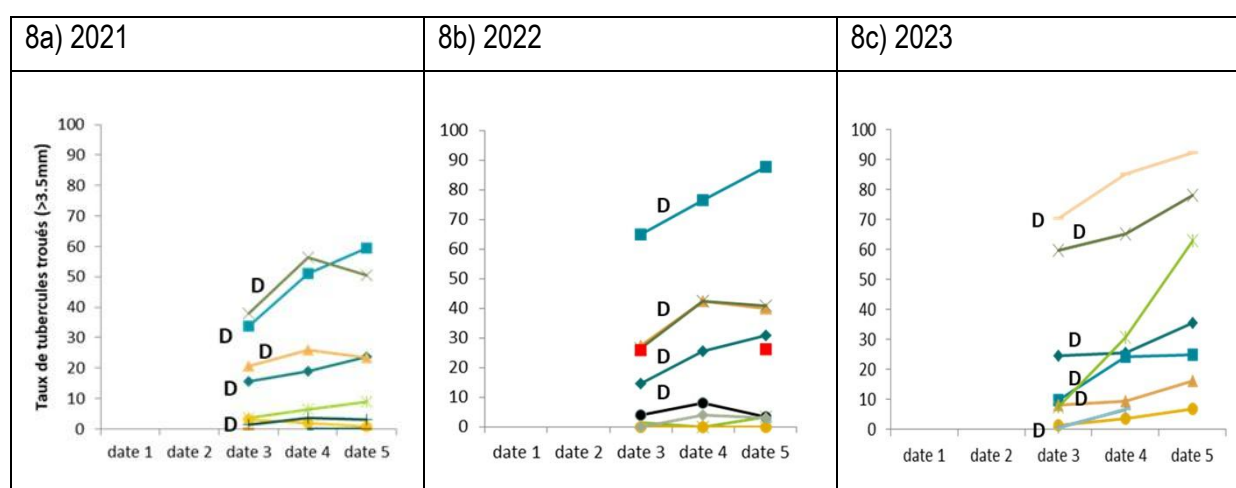


Figure 8 : Evolution des dégâts par site/année (fréquence de tubercules troués, %), D = positionnement du défanage par rapport à la date d'observation date1 (J+30), date2 (J+60), date3 (J+87), date4 (J+115) et date5 (J+130) pour les années 8a) 2021, 8b) 2022 et 8c) 2023



Description de la figure 8

La figure 8 est composée de trois sous-parties correspondant à trois années distinctes (2021, 2022 et 2023). Dans chaque sous-partie, plusieurs séries de données illustrent l'évolution des dégâts pour différents sites expérimentaux.

L'axe horizontal représente une succession de dates d'observation exprimées en jours après une date de référence : J+30, J+60, J+87, J+115 et J+130. Ces points correspondent à des moments clés du suivi au cours de la campagne. L'axe vertical indique la fréquence de tubercules présentant des dégâts, exprimée en pourcentage.

Pour chaque site, une courbe ou une série de points relie les valeurs observées aux différentes dates, permettant de visualiser l'évolution temporelle des dégâts. Les sites sont distingués par des couleurs, des symboles ou des styles de lignes différents.

Un repère spécifique, noté « D », indique pour chaque série le positionnement du défanage par rapport aux dates d'observation. Ce repère permet de situer visuellement cet événement dans la chronologie des mesures.

Les principales informations accessibles visuellement sont :

- la progression des dégâts au fil du temps pour chaque site ;
- les différences d'intensité des dégâts entre sites à une même date ;
- les écarts entre années, visibles en comparant les trois sous-figures ;
- la position relative du défanage par rapport à l'évolution des dégâts.

La figure permet ainsi d'identifier des tendances temporelles (augmentation, stabilisation ou variation des dégâts), de comparer les dynamiques entre sites et d'apprécier les variations interannuelles.

Les figures 8 (a, b et c) ne montrent pas de manière flagrante l'effet du défanage sur l'augmentation des dégâts. Les dégâts sont souvent élevés avant le défanage qui a généralement eu lieu après la date 3 (87 jours après plantation). Une forte relation ($r = 0.98$) entre les dégâts à la date 3 (87 JAP) et les dégâts finaux (130 JAP) est observé (non montré ici).

3.2.5. Relation entre abondance larvaire et dégâts

Aucune relation forte n'a été trouvée entre l'abondance larvaire et les dégâts au cours du cycle de la culture, bien que des tendances plus marquées aient été observées entre l'abondance cumulée à date-5 et les dégâts à la même date (Figure 9). Cela suggère que l'abondance larvaire en début de cycle de culture de pomme de terre qui est très corrélée à l'abondance larvaire en fin de cycle pourrait prédire les dégâts à la récolte.

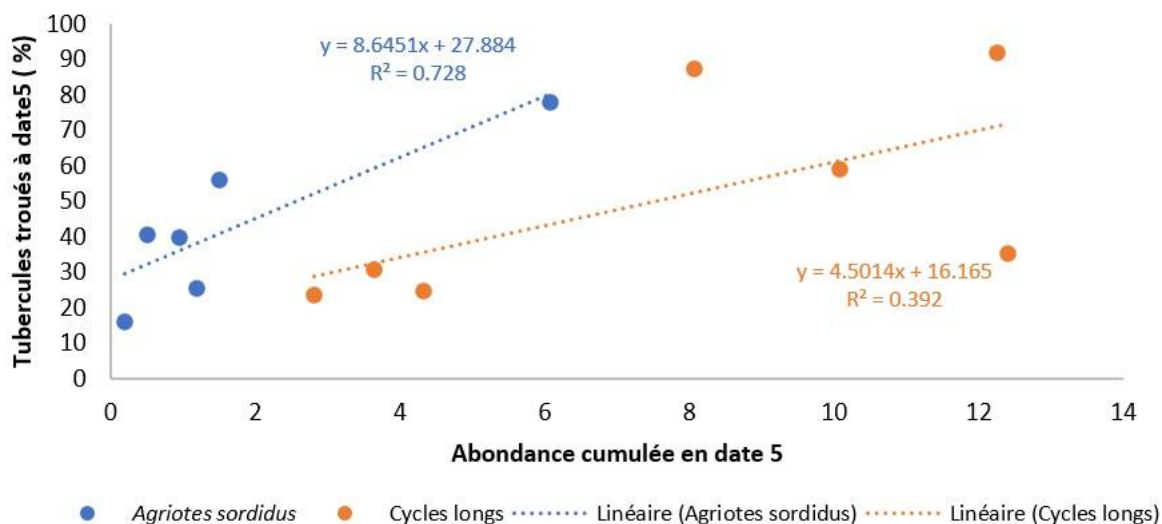


Figure 9 : Relation entre abondance larvaire et dégâts en cumulé à date 5 (J+130) par type d'espèces. Les espèces ayant un long cycle de vie comprennent A. sputator, A. lineatus, A. obscurus



Description de la figure 9

La figure présente la relation entre l'abondance larvaire et le niveau de dégâts cumulés mesurés à la date J+130 (date 5), en distinguant les observations selon le type d'espèces.

L'axe horizontal correspond à l'abondance larvaire, exprimée sous forme quantitative (nombre ou densité de larves). L'axe vertical indique le niveau de dégâts cumulés, mesuré comme la proportion ou le nombre de tubercules endommagés.

Les données sont représentées sous forme de points, chaque point correspondant à une observation (site ou parcelle). Les points sont différenciés selon le type d'espèces, généralement par des codes visuels distincts (couleurs ou symboles).

Deux groupes d'espèces sont distingués :

- les espèces à cycle de vie long (incluant *Agriotes sputator*, *A. lineatus* et *A. obscurus*) ;
- les autres espèces (par exemple à cycle plus court), représentées séparément.

Une ou plusieurs courbes de tendance peuvent être associées à ces groupes, illustrant la relation moyenne entre abondance larvaire et dégâts. Ces courbes permettent d'apprécier la forme de la relation (linéaire ou non linéaire) et les différences éventuelles entre types d'espèces.

Les éléments visuels permettent de percevoir :

- la corrélation entre abondance larvaire et niveau de dégâts ;
- les différences de relation selon le type d'espèces ;
- la dispersion des observations autour de la tendance moyenne, traduisant la variabilité des situations.

Dans l'ensemble, la figure met en évidence le lien entre pression larvaire et intensité des dégâts, ainsi que le rôle du type d'espèces dans cette relation.

La figure 9 montre une belle relation entre l'abondance larvaire et les dégâts à la date 5 soit 130 jours après plantation quelles que soient les espèces de taupins considérées et ce malgré des effectifs plutôt faibles.

Pour conclure, les données collectées sur trois ans apportent des éléments sur le comportement des taupins, mais restent insuffisantes pour identifier précisément l'influence du climat sur leur abondance et les dégâts.

L'abondance mesurée en début de culture permet toutefois d'anticiper celle en fin de cycle, et semble liée aux conditions climatiques du printemps précédent (température favorable, pluviométrie défavorable). Les dégâts en fin de culture sont également liés à l'abondance des larves. Le défanage n'a pas montré d'effet clair, des dégâts étant déjà présents avant son intervention. Ces résultats suggèrent d'adapter les stratégies de protection tout au long du cycle, et pas uniquement à la plantation.

3.2.6. Etudes complémentaires sur les outils d'étude de la diversité des populations de taupins

Sur les deux années d'enquêtes, la moitié des larves de taupins récupérées appartiennent au genre *Agriotes*. Sur les tris de sol effectués en avril sur les parcelles enquêtées, une moitié des larves n'appartient pas au genre *Agriotes*. Ces genres non-*Agriotes* sont à l'inverse peu présents sur les prélèvements en lien avec les dégâts (larves prélevées durant la culture de la pomme de terre ou en frigos) où le genre *Agriotes* prédomine. La signification biologique de ces espèces / genres de taupins identifiés reste à préciser.

L'analyse ADN barcod a permis d'identifier les échantillons non-*Agriotes* des parcelles enquêtées comme appartenant principalement à l'espèce *Athous bicolor* (41 % des non-*Agriotes* tout secteur confondu), *Adrastus rachiifer* (35 %), *Hemicrepidius hirtus* (4 %) et *H. niger* (2 %) et *Athous campyloides* (18 %). Au niveau régional, les 3 espèces majoritaires non-*Agriotes* ont été identifiées sur les 2 secteurs de Bretagne analysés, en région Centre et Sud, ainsi que sur le secteur Nord, sauf pour *Athous bicolor*.



non détecté dans cette région, mais le faible échantillonnage peut expliquer cette absence de détection (Figure 10).

En cours de culture de pomme de terre, des prélèvements réalisés sur 3 parcelles expérimentales (Le Faou, Sizun, Saint-Laurent-les-Églises-87) ont montré qu'en moyenne 87 % des individus prélevés ($N = 222$) durant la période de culture de la pomme de terre appartenaient au genre *Agriotes*, pour seulement 13 % de populations non-*Agriotes*. Les non-*Agriotes* prélevés sur le site le Faou correspondaient principalement à *Athous campyloides*, tandis qu'à Sizun les non-*Agriotes* étaient principalement identifiés comme *Adrastus rachifer*. Sur le site de Saint-Laurent-les-Églises, aucun échantillon non-*Agriotes* n'a été détecté. Sur les réseaux des parcelles en pomme de terre caractérisé, les identifications morphologiques ont indiqué aussi une forte majorité d'*Agriotes*.

Les identifications réalisées sur plus de 300 individus de taupins prélevés par Bretagne-Plants Innovation chez des producteurs de plants après récolte de pomme de terre, dans des bennes et dans des bâtiments de stockage, ont révélé aussi une prépondérance d'*Agriotes* ($> 95\%$ *A. lineatus* et *A. sputator*), et très peu de *H. hirtus* ($> 5\%$).

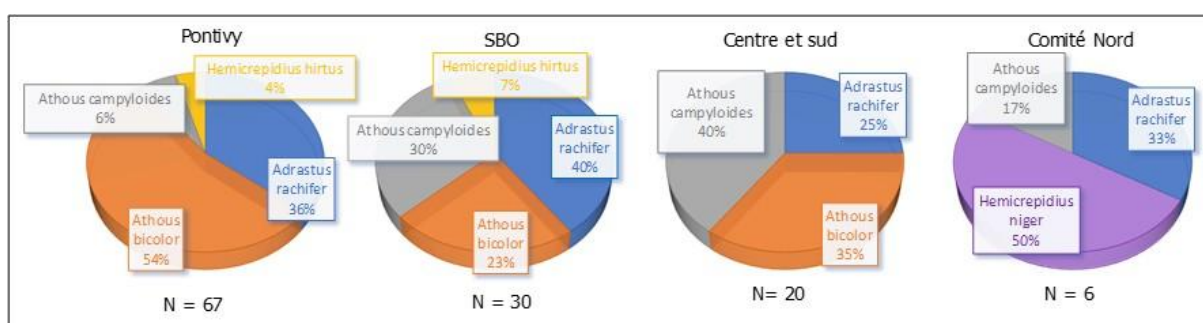


Figure 10 : Répartition des espèces de taupins non *Agriotes* caractérisé à l'aide d'ADN barcoding dans les tris de sol effectués au printemps sur les 2 années d'enquêtes (2021 et 2022)

Description de la figure 10

La figure est un diagramme circulaire représentant la distribution des espèces de taupins n'appartenant pas au genre *Agriotes*. Le cercle est divisé en segments, chacun correspondant à une espèce distincte identifiée dans les échantillons.

La taille de chaque segment est proportionnelle à la fréquence relative de l'espèce dans l'ensemble des individus analysés. Les segments sont différenciés visuellement par des couleurs ou des motifs, permettant de distinguer les différentes espèces.

L'organisation visuelle met en évidence :

- un nombre variable de segments correspondant au niveau de diversité spécifique observé ;
- des segments de tailles contrastées, reflétant des différences d'abondance entre espèces.

Certaines espèces occupent une part importante du diagramme, indiquant une présence dominante au sein des échantillons, tandis que d'autres sont représentées par des segments plus réduits, traduisant une occurrence plus faible.

L'ensemble du cercle représente la totalité des individus non-*Agriotes* identifiés sur les deux années d'étude. La figure ne détaille pas la répartition annuelle mais propose une vision globale cumulée.

Les informations accessibles visuellement sont :

- la richesse spécifique des taupins non-*Agriotes*,
- la contribution relative de chaque espèce à l'ensemble des observations,
- le degré de dominance ou d'équilibre entre espèces au sein du groupe étudié.



3.3. Développement de solutions innovantes et durables pour la prévention et la maîtrise des dégâts

3.3.1. Protéger les tubercules de pommes de terre, en évitant ou esquivant les attaques de taupins

Pour les essais en micro-parcelles, les taux de dégâts sur les pommes de terre observés dans les témoins variaient fortement (de moins de 5 % à plus de 90 % de tubercules troués). Parmi les solutions testées, les champignons entomopathogènes *Metarhizium anisopliae* et *Metarhizium brunneum* ont montré une efficacité moyenne de 30 à 41 %, améliorée par des doses plus élevées. La solution commerciale Attracap®, basée sur un mécanisme "Attract & Kill", a réduit les attaques de 37 à 75 % en conditions modérées. Les souches de *Beauveria bassiana* (ATCC74040, NPP111B005, PPRI5339) ont présenté des efficacités variables, de 16 à 47 % selon la dose et le mode d'application. Les nématodes entomopathogènes n'ont pas encore montré de résultats concluants faute de conditions expérimentales favorables.

Concernant les substances naturelles, des extraits de piments et de moutarde ont atteint 32 % d'efficacité, tandis que des extraits d'ail ont permis des réductions de 18 à 28 % des dégâts. Les stratégies d'appâts à base de blé ou d'orge ont donné des résultats inégaux : jusqu'à 29 % d'efficacité avec des semences traitées à la cyperméthrine, mais des effets moindres sans traitement. Enfin, certains amendements (chitine, algues, bore, cyanamide calcique) ont montré sur peu d'essais des effets limités (7 à 27 %).

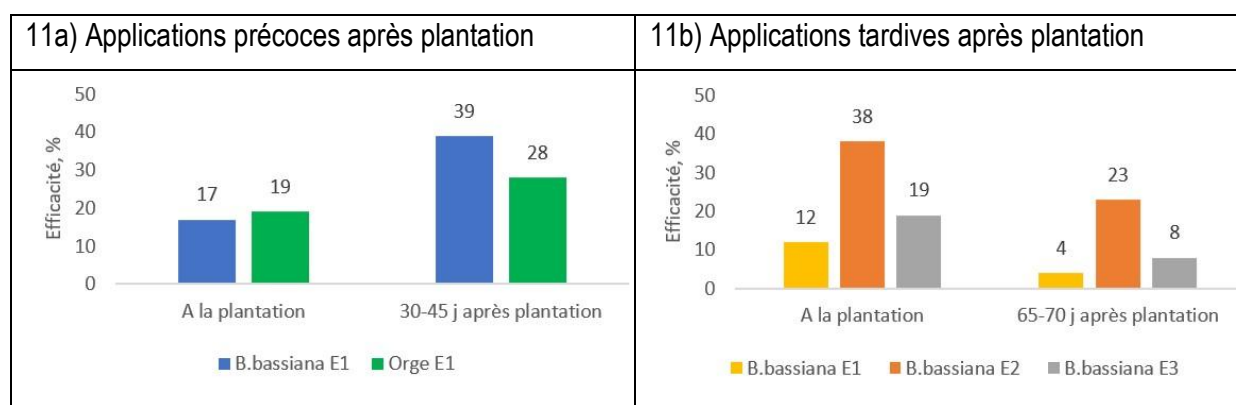


Figure 11 : Efficacité de diverses solutions de protection selon la date d'application

La figure 11a montre de meilleurs résultats lorsque les applications 30 à 45 jours après plantation d'orge traitée (+9 points d'efficacité) ou de *Beauveria bassiana* ATCC74040 (+21 points). Dans la figure 11b, l'application des traitements à base de *Beauveria bassiana* réalisée 65-70 jours post plantation engendre des résultats très inférieurs à ceux réalisés à la plantation (de -8 à -15 points). Ces résultats confirment la nécessité de prendre en compte le positionnement temporel des solutions pour une efficacité optimale.

3.3.2. Appétence de la plante cible – sensibilité variétale

Essais au champ : Les résultats ont montré une hiérarchisation nette des variétés : les plus sensibles (ex. Monalisa) présentaient environ trois fois plus de dégâts que les plus tolérantes (ex. Charlotte). Une variété intermédiaire, Spunta, montrait de nombreuses morsures mais peu de galeries profondes — les larves semblaient attirées mais peu enclines à s'y nourrir durablement. Ces observations confirment les appréciations empiriques des experts et suggèrent une différence d'appétences entre variétés (Figure 12).

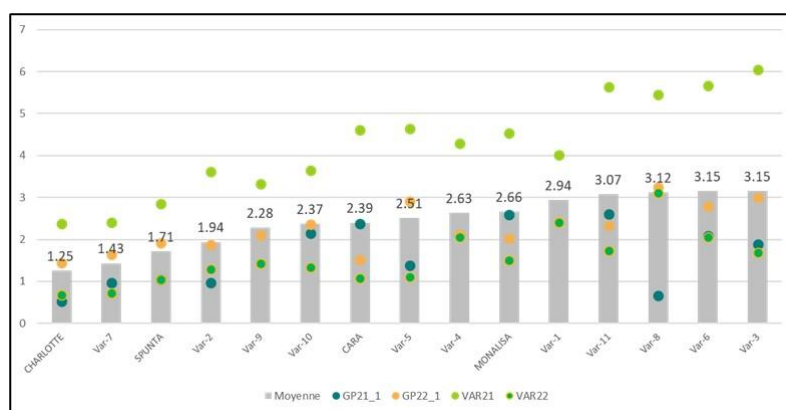


Figure 12 : Essais d'évaluation de variété de pommes de terre au champ – synthèse de 4 essais 2021-2022. Indice de gravité prenant en compte les morsures et dégâts profonds. Les points ronds et colorés représentent les expériences individuelles. Les barres grises représentent les moyennes de 4 expériences distinctes pour chacune des variétés testées dans six blocs randomisés.

Essais au laboratoire : 65 composés organiques volatils (COV) ont été identifiés à deux stades de développement des tubercules (78 et 124 jours après plantation). Les analyses ont montré des différences de profils odorants entre variétés uniquement au stade le plus avancé, mais l'effet du stade physiologique restait plus marqué que celui de la variété. Les tubercules au stade le plus avancé, plus sensibles aux attaques de taupins, présentaient un profil plus diversifié que ceux du stade plus précoce. Aucune différence qualitative n'a été observée entre variétés, mais certaines différences quantitatives ont été mises en évidence. Les tubercules Charlotte émettaient moins de 2-undécanone et de benzaldéhyde que Monalisa, tandis que Monalisa produisait davantage de 6-méthyl-5-hepten-2-one et de 2-butoxyéthanol. À l'inverse, Charlotte émettait davantage de nonadécane.

Trois composés majeurs (1-Octen-3-ol, Nonanal, 2-Phenoxyéthanol) ont ensuite été testés séparément : un seul, à forte concentration, a montré un pouvoir attractif significatif ($p=0.027$). Cependant, la variabilité des lots entre années rend difficile toute conclusion définitive. Ces travaux se poursuivent, notamment sur d'autres signaux potentiels (dioxyde de carbone, glycoalcaloïdes, sucres réducteurs,...).

Lors des études en olfactomètre à double voie, les larves (*A. lineatus* et *A. obscurus*) se sont orientées préférentiellement vers la variété Spunta lors des duels Charlotte/Spunta et Monalisa/Spunta, confirmant son attractivité élevée. Cependant, l'évaluation de leur nuisibilité (consommation réelle sur tubercule) a montré une perte de poids significative uniquement pour les tubercules de Monalisa, indiquant que cette variété est non seulement attractive mais aussi consommée, tandis que Charlotte et Spunta subissent peu de dégâts profonds. En parallèle, les taupins nourris avec Monalisa présentaient une taille significativement supérieure à ceux nourris avec Spunta ou Charlotte, confirmant le rôle favorable de cette variété sensible dans le développement du ravageur, observations en lien avec les dégâts en parcelle d'essais.

3.3.3. Mieux comprendre et limiter les dégâts de taupins : rôle du climat, des cultures et du biocontrôle

Les suivis quotidiens (mars à juin) sur 3 ans ont montré que l'activité des adultes est favorisée par la hausse des températures lors de journées humides après une période de nuits froides (Figure 13). Les espèces dominantes détectées dans les zones des études (Pas-de-Calais) sont *A. sputator*, *A. obscurus* et *A. gallicus*.

Concernant les stratégies préventives combinant le *Metarhizium brunneum* avec des cultures / couverts précédant les pommes de terre, les résultats montrent une réduction notable des dégâts sur la culture



de pomme de terre suivante. Toutefois, certaines cultures précédant la pomme de terre (maïs, blé, prairies) augmentent les risques de dégâts, sauf en présence de *Metarhizium brunneum* appliqués en préventif.

Les expériences visant à démontrer la ponte des taupins et le développement des juvéniles éclos sur différents couverts végétaux ont montré que certaines espèces (sarrasin et moutarde brune) réduisaient la ponte des adultes et/ou augmentaient la mortalité des juvéniles de taupins, par rapport au ray-grass (témoin) (Figure 14). Ces observations devront toutefois être vérifiées au champ avec des dispositifs adaptés.

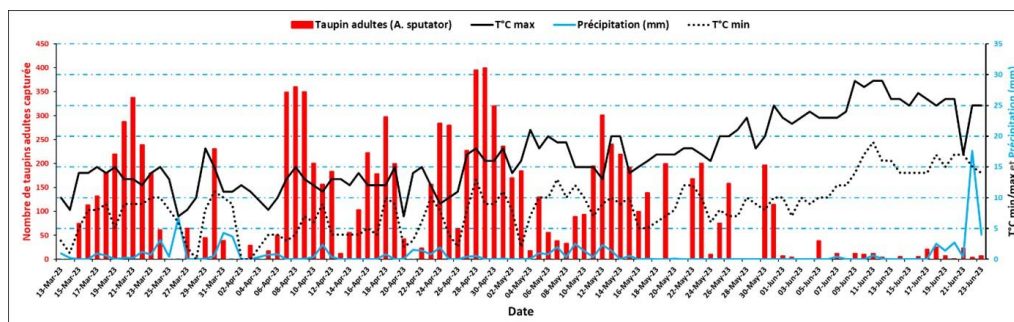


Figure 13 : Relation climat (T°C min. : courbe noire pointillée, max. : courbe noire continue, humidité du sol : courbe bleue) et vol de taupins adulte *Agriotes sputator* (barres rouges) à Achicourt (62) entre début mars et fin juin 2023

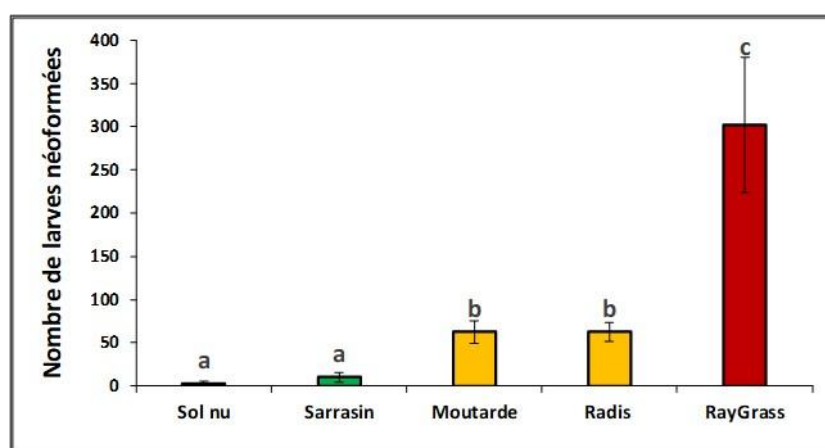


Figure 14 : Effets de sol nu, sarrasin, moutarde brune, radis fourrager et ray-grass, sur le développement des larves après la ponte des adultes en tunnel en 2023. Les barres avec la même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes ($\alpha = 5\%$).

4. Discussion

Les résultats du projet TAUPIC confirment la multi-factorialité du risque taupin en culture de pomme de terre. Les analyses issues des enquêtes parcellaires et des suivis en sites pilotes montrent que les caractéristiques pédologiques (pH, matière organique) et certaines conditions climatiques influencent significativement les dégâts, en accord avec les travaux de Poggi *et al.* (2018) et Hermann *et al.* (2013). Le rôle du travail du sol et de l'historique cultural, notamment la présence de prairies, est également confirmé (Le Cointe *et al.*, 2023), soulignant l'importance des pratiques agronomiques dans la dynamique de populations larvaires.

Cependant, la mesure de l'infestation reste un point critique : la faible corrélation entre abondance larvaire et dégâts observés dans nos analyses rejoint les observations de Horton (2006), qui souligne la



difficulté à relier les comptages larvaires aux niveaux de dommages. Cette limite appelle à une amélioration des méthodes d'échantillonnage et à l'intégration de variables indirectes (paysage, rotation, climat) dans les modèles prédictifs, comme proposé par Roche *et al.* (2023).

Concernant les solutions de biocontrôle, les essais en micro-parcelles montrent des efficacités variables (0–45 %), dépendantes des contextes et du positionnement des applications. Les champignons entomopathogènes (*Metarhizium brunneum*, *Beauveria bassiana*) apparaissent prometteurs, notamment en association avec des couverts végétaux, mais leur performance reste insuffisante en cas d'infestations fortes, ce qui corrobore les conclusions de Poggi *et al.* (2021). Les substances naturelles et les stratégies appâts présentent des effets limités et nécessitent des optimisations (choix des formulations, timing d'application).

La sensibilité variétale constitue un levier prometteur : les essais au champ et en laboratoire confirment des différences significatives entre variétés, avec *Monalisa* particulièrement vulnérable et *Charlotte* plus tolérante. Ces observations sont cohérentes avec les hypothèses sur l'influence des composés organiques volatils (COV), bien que nos analyses n'aient pas permis d'établir un lien direct, suggérant l'implication d'autres facteurs biochimiques (CO₂, glycoalcaloïdes) (Todd *et al.*, 2012).

Enfin, les études en conditions contrôlées apportent des éléments nouveaux sur la biologie des taupins et ouvrent des perspectives pour des stratégies préventives basées sur la perturbation de la ponte ou la réduction de la survie larvinaire via des couverts végétaux spécifiques.

5. Conclusion

Le projet TAUPIC (2020–2024) a permis de :

- hiérarchiser les facteurs de risque et développer des modèles explicatifs intégrant des variables pédoclimatiques et culturelles ;
- caractériser la diversité spécifique des taupins et mettre au point des outils innovants (barcoding ADN, élevage, olfactométrie) pour la recherche et l'épidémiosurveillance ;
- évaluer des leviers alternatifs (biocontrôle, variétés, couverts végétaux) dont certains montrent un potentiel intéressant mais nécessitent des optimisations pour une efficacité robuste ;
- confirmer la sensibilité variétale de pomme de terre comme axe stratégique pour la sélection et la conception de systèmes de culture moins attractifs.

Ces résultats constituent un socle pour la protection intégrée des cultures de pomme de terre contre les taupins. Toutefois, la variabilité spatio-temporelle des infestations et la complexité des interactions sol-climat-culture imposent de poursuivre les travaux pour :

- améliorer la précision des modèles prédictifs ;
- optimiser les protocoles d'application des biocontrôles et leur intégration dans des stratégies combinées ;
- approfondir la compréhension des mécanismes d'attractivité variétale pour orienter la sélection.

En somme, TAUPIC ouvre la voie à une gestion durable et multifactorielle des taupins, conciliant efficacité agronomique et respect des contraintes environnementales. Ces travaux feront l'objet d'un approfondissement et d'une valorisation dans le cadre du projet PARSADA-TaupiFAST2 (2025 – 2029), garantissant la continuité des recherches et le développement d'outils innovants pour la protection intégrée des cultures.



6. Recommandations

À la lumière des résultats du projet TAUPIC et des limites identifiées, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour la recherche, le développement et la pratique agricole :

6.1. Amélioration des outils de prévision

- Renforcer les modèles prédictifs en intégrant des variables paysagères, des données climatiques fines et des indicateurs indirects de risque (historique cultural, rotations).
- Standardiser les méthodes d'échantillonnage larvaire pour obtenir des signaux plus robustes, en s'inspirant des approches développées pour le maïs (Roche *et al.*, 2023).

6.2. Optimisation des stratégies de biocontrôle

- Tester des applications pluriannuelles des champignons entomopathogènes (*Metarhizium*, *Beauveria*) et leur association avec des couverts végétaux et/ou amendements.
- Affiner le positionnement temporel des traitements pour maximiser l'efficacité.
- Poursuivre les recherches sur les nématodes entomopathogènes et leurs extraits bactériens pour améliorer leur performance.

6.3. Gestion agronomique et rotation

- Limiter les prairies récentes dans les rotations avant pomme de terre ou prévoir des leviers compensatoires (travail du sol, couverts).
- Favoriser des pratiques culturales réduisant la survie larvaire, comme le labour stratégique ou l'utilisation de plantes de service à effet répulsif en bandes tampons.

6.4. Sélection variétale et attractivité

- Intégrer la sensibilité variétale dans les choix de plantation : privilégier les variétés tolérantes (*Charlotte*) dans les zones à risque.
- Approfondir l'étude des composés organiques volatils (COV) et autres signaux chimiques pour orienter la sélection vers des variétés moins attractives.

6.5. Approche intégrée et formation

- Combiner plusieurs leviers (biocontrôle, variétés, pratiques culturales) dans des stratégies intégrées adaptées au contexte local.
- Renforcer la formation des producteurs et techniciens sur la reconnaissance des facteurs de risque et l'utilisation des outils de prévision.

Ethique

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 :

B. NGALA : <https://orcid.org/0000-0002-1790-591X>

S. POGGI : <https://orcid.org/0000-0003-3051-5091>

R. LE COINTE : <https://orcid.org/0000-0001-8130-7538>

Jérémy CIGNA : <https://orcid.org/0000-0002-1219-7096>

Yves Le HINGRAT : <https://orcid.org/0000-0002-26212541>

Contributions des auteurs

Bruno NGALA et Florian MANCEAU : Pilotage des essais en condition contrôlée.

Ronan Le Cointe et Sylvain POGGI : Pilotage d'enquête parcellaires et analyses de donnée issue des enquêtes

Philippe LARROUDÉ : Pilotage des essais lutte contre les taupins aux champs, suivi du réseau des parcelles et analyses

Jérémy CIGNA : Caractérisation de la diversité de taupins à l'aide d'un outil moléculaire

Amandine MOLLET : Suivi d'un réseau des 4 parcelles en pomme de terre

Philippe DOLO : Caractérisations de la sensibilité variétale de pommes de terre aux champs

François VERHEGGEN : Caractérisations de composés organique volatiles (COVs) dans les tubercules de pomme de terre

Yves Le HINGRAT : Pilotage du projet TAUPIC

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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

Remerciements aux partenaires et personnes impliquées dans la mise en place et le suivi des travaux, aux techniciens et producteurs ayant contribué aux enquêtes ou à l'évaluation de solutions.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a bénéficié du concours financier du ministère de l'agriculture via le compte d'affectation spéciale « Développement agricole et rural » dans le cadre de l'appel à projets Recherche Technologique 2020.

Références bibliographiques

Chacon-Hurtado A, Ruhland F., Boullis A., Verheggen F. (2023). Potato cultivar susceptibility to wireworms: feeding behaviour, fitness and semiochemical-based host selection *Entomologia Generalis*, Volume 43, Issue 6, 1193–1201. <https://doi.org/10.1127/entomologia/2023/2168>



Hermann, A., Brunner, N., Hann, P., Wrbka, T., Kromp, B., & B. (2013). Correlations between wireworm damages in potato fields and landscape structure at different scales. *Journal of Pest Science*, 86, 41–51. <https://doi.org/10.1007/s10340-012-0444-z>

Hebert, P. D., Cywinska, A., Ball, S. L., & deWaard, J. R. (2003). Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings. Biological sciences*, 270(1512), 313–321. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2218>

Horton, D. R. (2006). Quantitative relationship between potato tuber damage and counts of Pacific coast wireworm (Coleoptera: Elateridae) in baits: Seasonal effects. *Journal of the Entomological Society of British Columbia*, 103, 37–48.

Kuhar, T. P., & Speese, J. (2009). *Scouting for wireworms before planting vegetables*. Virginia Cooperative Extension, Virginia State University. (Document 2906-1329).

Larroudé, P. (2015). Espèces de taupins : Une cartographie est désormais disponible. *Perspectives Agricoles*, 427, 46–49.

Le Cointe, R., Larroudé, P., Thibord, J.-B., Lehmus, J., Ogier, J.-C., Mahéo, F., Malet, M., Dolo, P., Ngala, B., Plantegenest, M., Joubert, S., Mollet, A., & Poggi, S. (2023a). État des lieux des connaissances sur les taupins (Coléoptères : Elatérédés) et des stratégies alternatives aux pesticides pour la gestion des dégâts. *Innovations Agronomiques*, 89, 78–90. <https://doi.org/10.17180/ciag-2023-vol89-art07>

Le Cointe, R., Plantegenest, M., & Poggi, S. (2023b). Wireworm management in conservation agriculture. *Arthropod-Plant Interactions*, 17, 421–427. <https://doi.org/10.1007/s11829-023-09966-9>

Poggi, S., Le Cointe, R., Lehmus, J., Plantegenest, M., & Furlan, L. (2021a). Alternative strategies for controlling wireworms in field crops: A review. *Agriculture*, 11, 436. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050436>

Mahéo, F., Lehmus, J., Larroudé, P., Le Cointe, R., (2020). Un outil moléculaire simple et abordable pour identifier les larves de taupins du genre *Agriotes*. *Le Cahier des Techniques de l'Inra* 2020 102.

Poggi, S., Le Cointe, R., Riou, J.-B., Larroudé, P., Thibord, J.-B., & Plantegenest, M. (2018). Relative influence of climate and agroenvironmental factors on wireworm damage risk in maize crops. *Journal of Pest Science*, 91, 585–599. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0951-7>

Poggi, S., Sargent, M., Mammeri, Y., Plantegenest, M., Le Cointe, R., & Bourhis, Y. (2021b). Dynamic role of grasslands as sources of soil-dwelling insect pests: New insights from *in silico* experiments for pest management strategies. *Ecological Modelling*, 440, 109378. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109378>

Roche, J., Plantegenest, M., Larroudé, P., Thibord, J.-B., Le Ronan, C., & Poggi, S. (2023). A decision support system based on Bayesian modelling for pest management: Application to wireworm risk assessment in maize fields. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100162. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100162>

Kabaluk, T. J., Young, B. M. S., Doreau, A. M., & Mackovic, C. R. (2012). A simple computation-based approach for measuring the carbon dioxide production of respiring biological samples in passively ventilated chambers. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 145, 175–180. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2012.01324.x>

Pour citer cet article : Bruno NGALA, Ronan LE COINTE, Philippe LARROUDÉ, Florian MANCEAU, Jérémy CIGNA, Sylvain POGGI, Amandine MOLLET, Philippe DOLO, François VERHEGGEN & Yves LE HINGRAT, 2026 - Prévion du risque de dégâts causés par les taupins sur les pommes de terre, et stratégies de lutte durables. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art10>



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.



Diversité, pathogénicité et origine des espèces de Botryosphaeriaceae dans les noyeraies en France

Adeline PICOT¹, Flora PENSEC¹, Yohana LALOUM², Aude MORONVALLE², Marie-Neige HEBRARD³, Cyrielle MASSON⁴, Marie BELAIR¹, Agnès VERHAEGHE²

¹ Univ Brest, INRAE, Laboratoire Universitaire de Biodiversité et Écologie Microbienne, F-29280 Plouzané, France

² Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, Centre opérationnel de Lanxade, 24130 Prigonrieux, France

³ Station Expérimentale de Creysse, Perrical 46600 Creysse, France

⁴ Station d'expérimentation Nucicole Rhône Alpes, 38160 Chatte, France

Correspondance : cmasson@senura.com

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art11>

Résumé

Depuis 2015, une recrudescence de dégâts sur fruits, de chancres et de mortalités d'arbres est constatée dans la noyeraie française. Les Botryosphaeriaceae sont des champignons connus, notamment outre-Atlantique, pour leur participation à ces symptômes. Pour répondre à l'inquiétude de la profession, le projet vise à caractériser les espèces en présence ; et, face à la difficulté de reconnaissance des symptômes au terrain, à développer des outils de détection spécifiques et rapides. Des prélèvements de fruits et rameaux dans les deux principaux bassins de production ont permis de caractériser le pathobiome associé aux symptômes et d'obtenir 1 534 isolats fongiques, dont 70 % appartiennent à sept espèces, parmi lesquelles *Botryosphaeria dothidea* et *Neofusicoccum parvum*. L'origine de ces espèces ubiquistes est probablement locale, ces populations étant génétiquement proches de celles isolées de vignobles français. Après confirmation de leur pathogénicité, un outil basé sur de la PCR multiplexe, a été développé pour les détecter. Cette étude suggère l'implication d'un complexe fongique dans les symptômes observés.

Mots-clés : Botryosphaeriaceae, nécrose, fruit, rameau, pathogénicité, identification, PCR multiplexe

Abstract: Diversity, pathogenicity and origin of Botryosphaeriaceae species in French walnut orchards

Since 2015, there has been an increase in fruit damage, cankers, and tree mortality in French walnut orchards. Botryosphaeriaceae fungi are known, particularly in North America, for their role in causing these symptoms. In response to producer concerns, the project aims to characterize the fungal species associated and, given the difficulty of recognizing symptoms in the field, to develop specific and rapid detection tools. Samples of fruit and twigs from the two main production areas enabled the characterization of the pathobiome of symptomatic tissues and yielded 1,534 fungal isolates, 70 % of which belong to seven species, including *Botryosphaeria dothidea* and *Neofusicoccum parvum*. The origin of these ubiquitous species is probably local since these populations are genetically close to those isolated from French vineyards. After confirming their pathogenicity, a multiplex PCR-based tool was developed to detect them. This study suggests that a fungal complex is involved in the symptoms observed.



1. Contexte du projet

La soudaine recrudescence d'observations du syndrome du dépérissement à partir de 2015 dans les noyeraies françaises, constitue une problématique d'importance pour la filière nucicole et dont l'émergence serait notamment en lien avec le réchauffement climatique. Le dépérissement correspond à une dégradation de la santé de l'arbre conduisant à une perte de vigueur, une mortalité accrue et une baisse de rendement (Laloum *et al.*, 2022). Les symptômes sur bois apparaissent sous la forme de chancres (atteignant aussi bien les jeunes brindilles que les branches), de dessèchements ou encore de nécroses apicales. Les symptômes sur fruits se traduisent, quant à eux, par des nécroses sur les brous à l'aspect huileux ou desséché mais en cas de fortes attaques, la nécrose peut atteindre le cerneau. En lien avec ces premières constations, des champignons de la famille des Botryosphaeriaceae et du genre *Diaporthe* ont été isolés à partir d'échantillons symptomatiques prélevés dans les parcelles françaises (Laloum *et al.*, 2022). L'identification de ces espèces pathogènes associées à la description des symptômes ont permis d'orienter le diagnostic vers la maladie du dépérissement du noyer, également appelée « Botryosphaeria/Phomopsis canker and blight disease », maladie particulièrement étudiée en Californie du fait de son impact dans les noyeraies (Moral *et al.*, 2019). Dans ce contexte, les objectifs de nos travaux de recherche visaient à i) identifier et caractériser les espèces responsables de ces symptômes selon les organes affectés (par des approches culturale et de métabarcoding); définir leur niveau de pathogénicité sur fruits et bois, en conditions naturelles et contrôlées ii) étudier leur répartition géographique en France et investiguer leur origine; et iii) mettre au point des outils de détection spécifiques et rapides par analyse moléculaire (séquençage haut-débit, PCR multiplex), innovants, fiables et validés sur le terrain, pour être transférables aux laboratoires spécialisés et équipés.

2. Identification des Botryosphaeriaceae responsables de dépérissements

2.1. Identification et caractérisation des espèces de Botryosphaeriaceae dans les noyeraies françaises

La sélection des parcelles a été réalisée dans les deux principaux bassins de production en France et s'est portée sur des parcelles implantées essentiellement avec la variété Franquette, majoritaire sur le territoire français. Les six parcelles du bassin sud-ouest ont été sélectionnées, à la suite des travaux de recherche réalisés par la Station Expérimentale de Creysse en 2019, où la présence de Botryosphaeriaceae avait été constatée. Quatre parcelles sont implantées avec la variété Franquette et les deux autres avec la variété Serr. Les six parcelles du bassin sud-est ont, quant à elles, été choisies en ciblant celles présentant des symptômes s'apparentant à ceux causés par Botryosphaeriaceae (Moral *et al.*, 2019). Elles sont toutes implantées avec la variété Franquette.

Trois campagnes de prélèvements ont été réalisées en septembre 2020, mai 2021 et août 2021 sur les douze parcelles. Elles comptabilisent 420 échantillons collectés dont des fruits prélevés en septembre 2020 et août 2021 et des rameaux échantillonnés uniquement en mai 2021.

Durant la première campagne de prélèvements, en septembre 2020, les tissus de cinq noix symptomatiques de chaque parcelle ont été mis en culture en triplicat par des approches de microbiologie. La stratégie d'échantillonnage a évolué lors des deux campagnes 2021 : pour chacune des douze parcelles du projet, douze organes végétaux symptomatiques et trois asymptomatiques sont sélectionnés afin de comparer les communautés fongiques présentes dans ces deux types d'échantillons.

La première approche a consisté en une mise en culture de fragments de brous de noix et de rameaux désinfectés, sur un milieu de culture en boîte de Petri afin d'isoler les champignons émanant de ces échantillons : c'est une approche dite culture-dépendante couplant des techniques de microbiologie et



de biologie moléculaire. Nous avons fait le choix de ne pas nous concentrer uniquement sur des isolats des champignons de la famille des Botryosphaeriaceae afin d'avoir une meilleure compréhension du pathobiome associé au dépérissement du noyer, qui représente l'ensemble des microorganismes associés à un état de santé réduit de la plante, qu'ils soient directement pathogènes ou non.

Cette technique a permis l'obtention de 1 534 isolats fongiques qui ont ensuite été caractérisés par observation macroscopique puis par identification moléculaire via le séquençage d'un gène adapté. Au total, 70 % des isolats fongiques appartiennent à sept espèces majoritaires : *Botryosphaeria dothidea* (n=134) et *Neofusicoccum parvum* (n=213), appartenant à la famille des Botryosphaeriaceae, *Colletotrichum godetiae* (n=198), *Colletotrichum fioriniae* (n=32), *Diaporthe eres* (n=70), *Fusarium juglandicola* (n=190) et *Fusarium solani* (n=57) (Figure 1). Seules ces espèces sont représentées dans la suite des résultats.

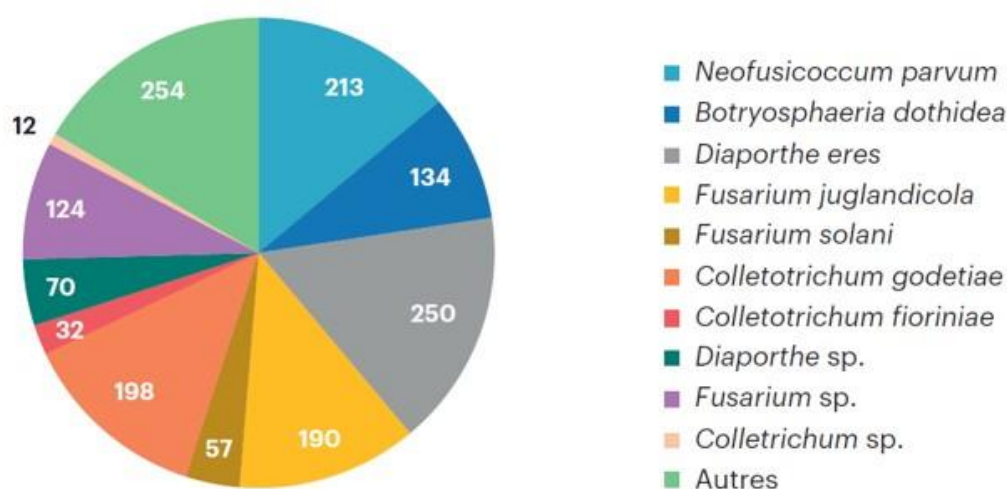


Figure 1 : Espèces fongiques isolées de noix et rameaux symptomatiques

Description de la figure

Parmi les 1 534 isolats fongiques, au total, 70 % des isolats fongiques appartiennent à sept espèces majoritaires : *Botryosphaeria dothidea* (n=134) et *Neofusicoccum parvum* (n=213), appartenant à la famille des Botryosphaeriaceae, *Colletotrichum godetiae* (n=198), *Colletotrichum fioriniae* (n=32), *Diaporthe eres* (n=70), *Fusarium juglandicola* (n=190) et *Fusarium solani* (n=57). Ont également été isolées, d'autres espèces du genre *Diaporthe*, *Fusarium* et *Colletotrichum* et 254 isolats minoritaires classés dans la catégorie « Autres ».

La phase suivante avait pour objectif de déterminer la prévalence de ces sept espèces sur chacune des trois campagnes, c'est-à-dire le ratio d'organes infectés par une espèce sur le nombre total d'organes étudiés (Figure 2 A à C).

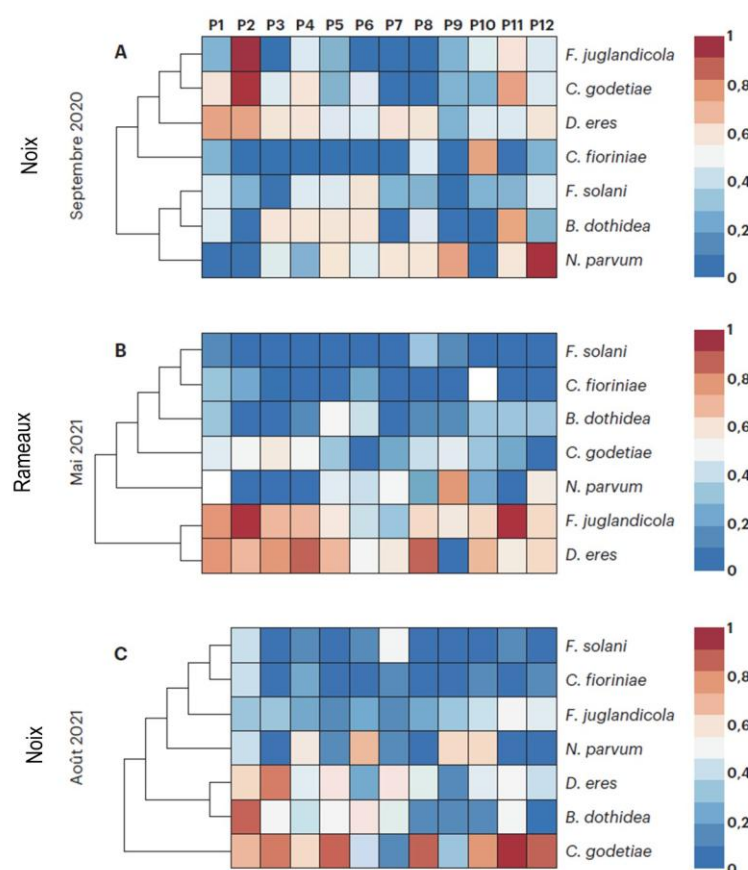


Figure 2 : Prévalence des principales espèces isolées dans les organes symptomatiques (nombre d'organes infectés par une espèce/nombre total d'organes) dans chacune des parcelles pour les noix prélevées en septembre 2020 (A) et août 2021 (C) ainsi que dans les rameaux prélevés en mai 2021 (B). P1 à P12 représentent le nom des parcelles

Description de la figure

Cette heatmap met en évidence une présence différenciée des espèces selon le type d'organe touché : les espèces *N. parvum*, *B. dothidea*, *C. godetiae* ainsi que *D. eres* sont présentes dans les échantillons de noix symptomatiques de quasiment toutes les parcelles (Figures 2A et 2C), tandis que les rameaux symptomatiques sont, quant à eux, dominés par la présence de *D. eres* et *F. juglandicola* (Figure 2B). En revanche, la localisation géographique des parcelles

dans un bassin de production à l'est ou à l'ouest de la France n'a pas influencé le profil de contamination des organes.

Malgré une sélection d'échantillons présentant des symptômes similaires, les organes infectés sont caractérisés par des profils de communautés fongiques très diversifiés (Figure 2 A à C). Cette étude met en évidence une présence différenciée des espèces selon le type d'organe touché : les espèces *N. parvum*, *B. dothidea*, *C. godetiae* ainsi que *D. eres* sont présentes dans les échantillons de noix symptomatiques de quasiment toutes les parcelles (Figures 2A et 2C), tandis que les rameaux symptomatiques sont, quant à eux, dominés par la présence de *D. eres* et *F. juglandicola* (Figure 2B). En revanche, la localisation géographique des parcelles dans un bassin de production à l'est ou à l'ouest de la France n'a pas influencé le profil de contamination des organes.

Par ailleurs, nous avons observé que *B. dothidea*, *N. parvum*, *C. godetiae*, *C. fioriniae*, *D. eres* et *F. juglandicola* pouvaient être isolées à partir d'organes asymptomatiques, confirmant ainsi le caractère de pathogène latent de ces champignons. Cette méthode culture-dépendante permet d'identifier rapidement, et avec une précision souvent à l'espèce, les isolats fongiques de matériels végétaux symptomatiques. Cependant, elle ne permet d'identifier que les espèces cultivables sur milieu de culture et capables d'être compétitives vis-à-vis des autres organismes présents dans le tissu végétal mis en culture. La description du pathobiome peut donc être parcellaire et il est recommandé d'utiliser des méthodes complémentaires pour améliorer la compréhension et l'identification des organismes associés aux symptômes observés, comme décrit dans le paragraphe 3.1 relatif aux approches par métabarcoding. Cette méthode permet, à partir de l'extraction de l'ADN total d'un échantillon, de cibler un groupe d'intérêt (ici les champignons) et d'en séquencer l'ensemble des séquences afin de les identifier sans passer par des étapes de mise en culture. De surcroît, afin de vérifier le caractère pathogène des isolats obtenus, il convient de réaliser des tests de pathogénicité, décrits dans le paragraphe suivant.



2.2. Tests de pathogénicité des espèces de Botryosphaeriaceae

2.2.1 Tests sur plants de noyer

Parmi l'ensemble des 1 534 isolats identifiés dans le cadre du projet, 134 ont été identifiés comme appartenant à l'espèce *B. dothidea* et 213 à l'espèce *N. parvum*. Dans la mesure où le projet CARIBOU s'intéressait uniquement à la famille des Botryosphaeriaceae, les tests de pathogénicité ont donc été réalisés avec ces deux seules espèces de cette famille isolées dans les deux principaux bassins de production, tout en tenant compte de leur variabilité intraspécifique (3 isolats par espèce).

Tout d'abord, des tests de pathogénicité ont été effectués en serre, sur des plants de noyers de deux ans (porte greffe : *Juglans regia*, variété Franquette maintenus à 25 °C). Les inoculations artificielles ont été réalisées sur les rameaux de l'année nouvellement formés et encore verts. La pathogénicité des espèces a été évaluée en procédant à des inoculations artificielles sur douze rameaux indépendants. Les rameaux ont été inoculés avec une seule et même espèce fongique. L'épiderme du rameau est désinfecté (éthanol 70 %), blessé puis mis en contact avec un plug de mycélium de l'espèce fongique étudiée qui est maintenu en place avec du parafilm. Les longueurs des nécroses internes ont été mesurées dix jours après inoculation. Douze rameaux témoins non inoculés ont complété le plan expérimental de l'essai. Enfin, pour chacun des essais, la vérification des postulats de Koch comprenant une mise en culture des tissus infectés a bien confirmé la présence des champignons pathogènes préalablement inoculés.

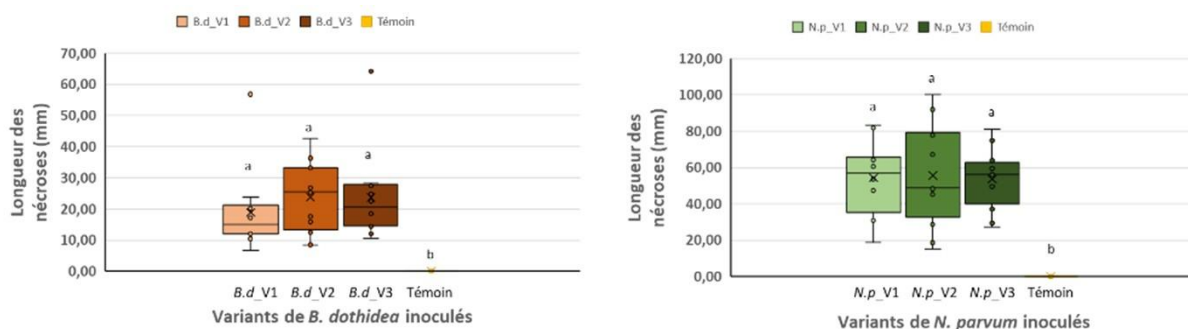


Figure 3 : Évaluation de la pathogénicité de trois isolats de *B. dothidea* (Bd_V1 ; Bd_V2 ; Bd_V3 ; à gauche) et de *N. parvum* (Np_V1 ; Np_V2 ; Np_V3 ; à droite). Les box-plots représentent la répartition des tailles des nécroses observées sur les rameaux inoculés en fonction des modalités. Les valeurs représentent les médianes $\pm$ quartiles mesurés à partir des douze répétitions biologiques de chaque modalité. Les différences significatives sont indiquées par une lettre (p.valeur < 0,05 ; test de Kruskal-Wallis suivi d'un test de Wilcoxon).

Description de la figure

Aucune différence significative n'est observée entre la taille des nécroses provoquées par les différents isolats d'une même espèce (comparaison intraspécifique). De plus, *N. parvum* induit des longueurs de nécrose significativement plus grandes que celles de *B. dothidea* ($53,6 \pm 4,7$ mm versus $23,7 \pm 4,1$ mm, respectivement), aucune nécrose n'a été observée chez les témoins non inoculés.

D'après les résultats de la Figure 3, aucune différence significative n'est observée entre la taille des nécroses provoquées par les différents isolats d'une même espèce (comparaison intraspécifique). De plus, *N. parvum* induit des longueurs de nécrose significativement plus grande que celles de *B. dothidea* ($53,6 \pm 4,7$ mm versus $23,7 \pm 4,1$ mm, respectivement). Dans les conditions de cette expérimentation, une différence de comportement existe entre les deux espèces : l'espèce *N. parvum* présente un comportement plus agressif et semblerait avoir un mode de colonisation *in planta* plus rapide que celui de *B. dothidea*. En conclusion, cet essai confirme que les espèces *B. dothidea* et *N. parvum* sont pathogènes sur noyer en provoquant des symptômes de dépérissement dont des nécroses externes et internes associées à la dégradation des tissus vasculaires et de la moelle des rameaux.

2.2.2. Tests de pathogénicité en parcelles expérimentales de noyers dans le sud-est et sud-ouest

Des essais de pathogénicité ont également été conduits sur des parcelles expérimentales localisées à la SENuRA et à la Station Expérimentale de Creysse sur des arbres de la variété Franquette. Les inoculations artificielles ont été réalisées sur du bois d'un an aoûté, réparties sur dix arbres indépendants (Figure 4).



Figure 4 : Photographies illustrant le matériel végétal lors des différentes étapes du protocole d'inoculation artificielle sur les rameaux de noyers en parcelle expérimentale. a : Boîtes de Petri contenant les cultures des champignon inoculés b : identification des rameaux ; c et d : réalisation d'un trou dans le rameau à l'aide d'une perceuse ; e et f : inoculation artificielle avec un plug de mycélium ; g : parafilm recouvrant le point d'inoculation ; h : vue d'ensemble des rameaux inoculés. Crédit Photo, photo a Station Expérimentale de Creysse, photos b à h SENuRA

Description de la figure

Après avoir préparé des boîtes de Petri contenant les isolats fongiques à inoculer, les rameaux de noyers ont été sélectionnés au champ puis leur surface a été désinfectée avec de l'éthanol à 70 %. Les rameaux ont été percés avec une mèche désinfectée de 6 mm de diamètre avant d'insérer un plug de mycélium dans le trou percé, lequel fut recouvert d'une couche de vaseline elle-même protégée par du parafilm pour prévenir toute contamination extérieure.

Avant toute manipulation, la surface des rameaux a été désinfectée avec de l'éthanol à 70 %. Les rameaux ont été percés avec une mèche désinfectée de 6 mm de diamètre avant d'insérer un plug de mycélium dans le trou percé, lequel fut recouvert d'une couche de vaseline elle-même protégée par du parafilm pour prévenir toute contamination extérieure. Le développement des nécroses fut suivi durant toute la durée de l'essai, d'avril à juin 2022, pendant 6 semaines pour le sud-est et 7 semaines pour le sud-ouest (Figure 4). À la fin des essais, les rameaux inoculés ont été prélevés, écorcés puis coupés longitudinalement afin de mesurer la longueur des nécroses observées.

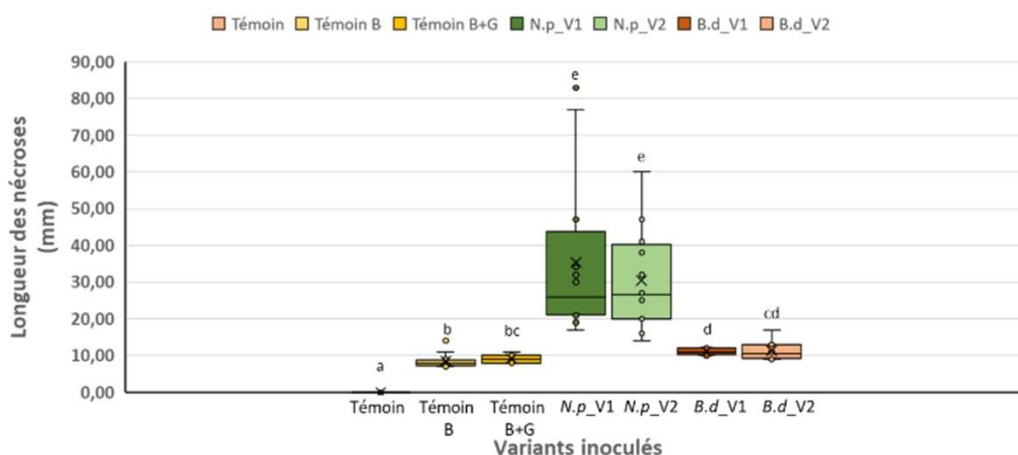


Figure 5 : Évaluation de la pathogénicité des isolats de *B. dothidea* (Bd_V1 ; Bd_V2) et de *N. parvum* (Np_V1 ; Np_V2) isolés dans le sud-est. Les box-plots représentent la répartition des tailles des nécroses observées sur les rameaux inoculés au champ en fonction des modalités. Les valeurs représentent les médianes $\pm$ quartiles mesurés à partir des douze répétitions biologiques de chaque modalité. Témoin correspond à un rameau non percé, Témoin B correspond à un rameau percé non inoculé et Témoin B+G correspond à un rameau percé et inoculé avec un plug de gélose. Les différences significatives sont indiquées par une lettre (p-value < 0,05 ; test de Kruskal-Wallis suivi d'un test de Wilcoxon).

Description de la figure

Dans l'expérimentation du sud-est de la France, l'agressivité de *N. parvum* est supérieure à celle de *B. dothidea*, cette espèce cause des nécroses dans les rameaux de l'ordre de 30 à 40 mm en moyenne. L'agressivité de *B. dothidea* est plus limitée (nécroses de l'ordre de 10mm) et l'un des deux isolats de cette espèce ne se distingue pas du témoin inoculé avec de la gélose.

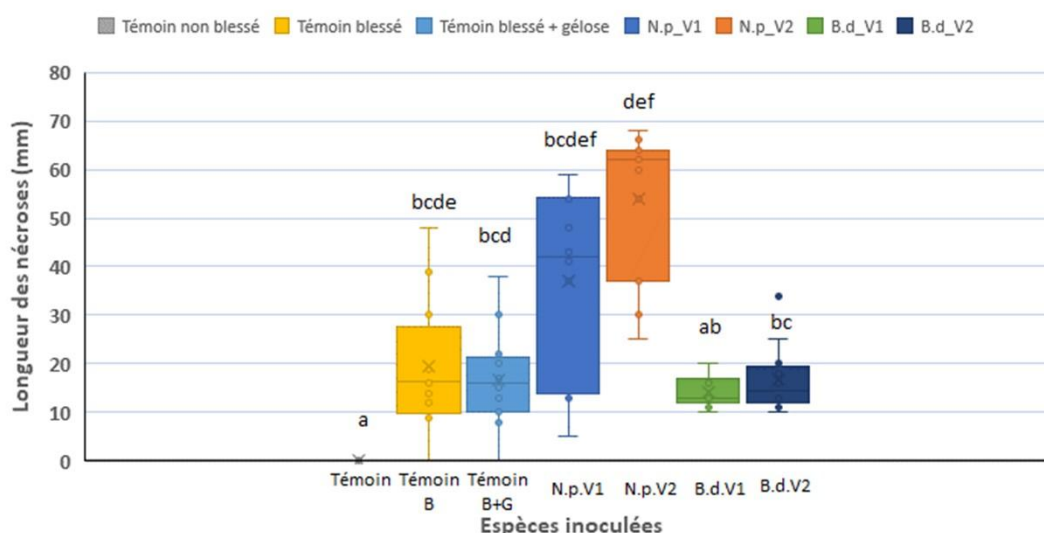


Figure 6 : Évaluation de la pathogénicité des isolats de *B. dothidea* (Bd_V1 ; Bd_V2) et de *N. parvum* (Np_V1 ; Np_V2) isolés dans le sud-ouest. Les box-plots représentent la répartition des tailles des nécroses observées sur les rameaux inoculés en fonction des modalités. Les valeurs représentent les médianes $\pm$ quartiles mesurés à partir des douze répétitions biologiques de chaque modalité. Témoin correspond à un rameau non percé, Témoin B correspond à un rameau percé non inoculé et Témoin B+G correspond à un rameau percé et inoculé avec un plug de gélose. Les différences significatives sont indiquées par une lettre (p-value < 0,05 ; test de Kruskal-Wallis suivi d'un test Siegel et Castellan).

**Description de la figure**

Dans l'expérimentation du Sud-Ouest de la France, l'agressivité de *N. parvum* et de *B. dothidea* ne se distingue pas statistiquement de celle des témoins blessés.

Comme observé lors des essais en serre, la pathogénicité des espèces *B. dothidea* et *N. parvum* est confirmée pour l'ensemble des isolats testés et pour les deux bassins de production. Quel que soit le bassin, on constate là encore que les isolats de *N. parvum* présentent une agressivité supérieure à celles de *B. dothidea* (Figures 5 et 6). De plus, il n'y a pas de différence significative entre les isolats de chacune des espèces. Notons toutefois que les variabilités plus importantes dans les tests en vergers, lesquels sont soumis aux conditions environnementales.

2.3. Evaluation de la variabilité intraspécifique des *Botryosphaeriaceae*

Nous avons montré que ces champignons, représentés quasi-exclusivement par deux espèces (*N. parvum* et *B. dothidea*), contribuaient, en partie, aux symptômes causés sur rameaux et sur brous dans les noyeraies en France. Par ailleurs, *N. parvum* et *B. dothidea* sont également associées au dépérissement d'autres hôtes ligneux en France, en particulier la vigne depuis de nombreuses années et est également prédominante dans les noyeraies d'autres pays à climat méditerranéen, à commencer par la Californie et l'Espagne. Nous avons donc fait le choix d'étudier la génétique des populations de ces espèces. Les objectifs de cette étude étaient donc (i) d'étudier la diversité génétique et le mode de reproduction majeur des populations de *B. dothidea* et *N. parvum* isolées de noyers en France, (ii) de s'intéresser aux facteurs influençant la structure de ces populations, et (iii) de comparer les populations de *N. parvum* issues de noyers français avec d'autres populations provenant de divers hôtes (amandier, noyer, vigne) et zones géographiques (Californie, Espagne, France) afin de mieux comprendre l'origine des contaminations des noyers français par cette espèce agressive.

Pour ce faire, une collection de 133 isolats de *B. dothidea* et de 156 isolats de *N. parvum* obtenue à l'aide de la mise en culture des échantillons environnementaux prélevés en 2020 et 2021 a été utilisée afin de réaliser un génotypage par le séquençage de régions microsatellites. La recherche de régions microsatellites dans le génome de chacune des espèces, le design des amorces, l'amplification des séquences, le séquençage et enfin l'obtention des génotypes ont été réalisés à la Plateforme Génome Transcriptome de Bordeaux. La définition des populations a été basée sur l'origine des isolats (Sud-Est et Sud-Ouest de la France).

A partir de la collection d'isolats obtenue de noyers français, l'étude de la diversité et de la structure des populations de *N. parvum* et *B. dothidea* a mis en évidence leur mode de reproduction majoritairement clonal. En outre, la similitude génétique entre les populations de notre collection, indépendamment du type de tissu et de la présence de symptômes, soutient l'hypothèse selon laquelle ces agents pathogènes peuvent se déplacer entre les fruits et les rameaux et présenter des caractéristiques de pathogènes latents.

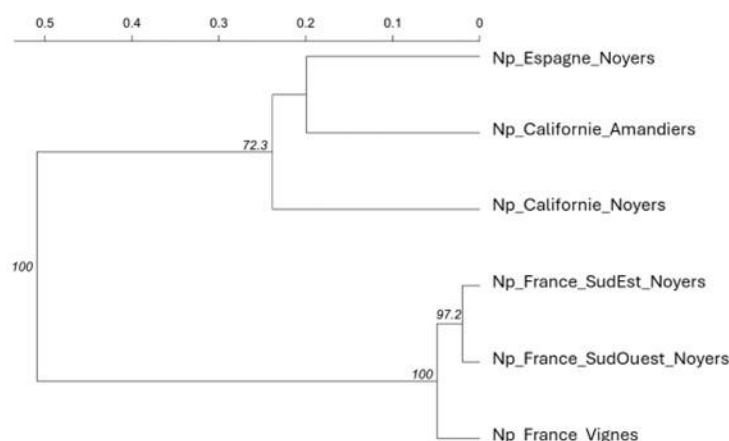


Figure 7 : Dendrogramme basé sur les distances génétiques de Nei, différenciant les populations de *N. parvum* (Np) issues de différents pays et plantes

Description de la figure

Dans ce dendrogramme comparant les distances génétiques entre différentes populations d'isolats de *N. Parvum*, il apparaît 2 clusters. Le premier est composé des populations de noyeraies espagnoles et californiennes ainsi que d'amandiers californiens et le second est composé des populations des noyeraies du sud-est et du sud-ouest de la France ainsi que des vignobles français.

Nous avons ensuite exploré l'origine de l'introduction de *N. parvum* sur noyers en comparant la population française à d'autres populations issues d'autres hôtes ou d'autres pays. Ceci a révélé une forte proximité génétique de la population des noyeraies françaises avec des isolats provenant de vignes françaises, à la différence des populations californiennes ou espagnoles (Figure 7). Ceci qui indique une origine probablement plutôt géographique que par transfert de matériel végétal.

3. Développement d'outils de détection moléculaire

3.1. Evaluation du métabarcoding comme outil de diagnostic de l'état sanitaire des noyers

À la suite des analyses culture-dépendantes, des analyses culture-indépendantes basées sur du séquençage métabarcoding ont été réalisées, permettant de séquencer la région ITS (Internal Transcribed Spacer) de l'ensemble des agents pathogènes fongiques et d'obtenir une vision complémentaire du pathobiome associé au dépérissement des noyers. *In fine*, l'objectif de cette approche consiste à identifier et à déterminer l'abondance relative des espèces fongiques présentes dans un échantillon donné.

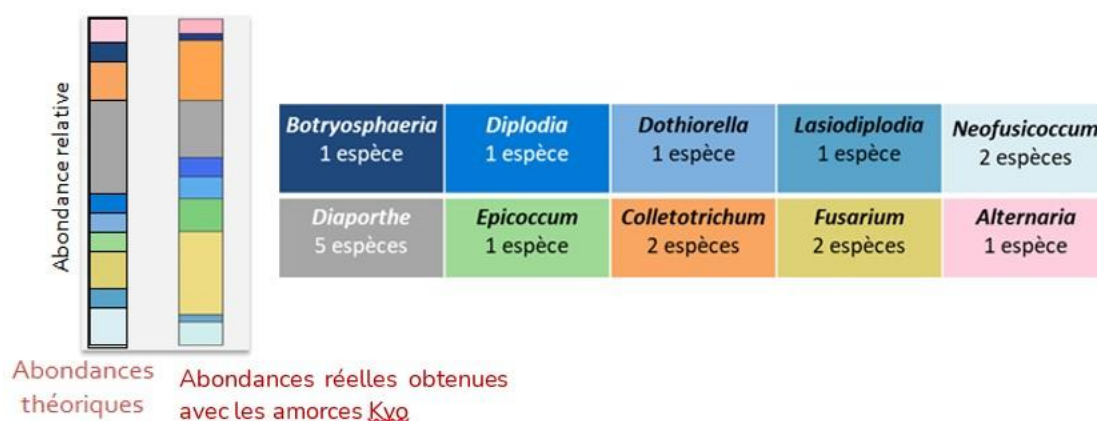


Figure 8 : Abondance relative théorique et obtenue avec les amorces ITS3/ITS4_KYO1. Le tableau indique l'abondance des espèces dans le mélange composite.

Description de la figure

La comparaison des abondances théoriques et réelles dans des échantillons constitués d'ADN de 1 espèce de *Botryosphaeria*, 1 espèce de *Diplodia*, 1 espèce de *Dothiorella*, 1 espèce de *Lasiodiplodia*, 2 espèces de *Neofusicoccum*, 5 espèces de *Diaporthe*, 1 espèce d'*Epicoccum*, 2 espèces de *Colletotrichum*, 2 espèces de *Fusarium* et 1 espèce d'*Alternaria* a permis de valider la pertinence de l'utilisation des amorces ITS3/ITS4_KYO1.

Nous avons dans un premier temps développé la méthode afin de s'assurer de la capacité à amplifier et séquencer les amplicons correspondant aux genres majeurs associés au dépérissement du noyer (Belair et al., 2023). La méthode développée, basée sur le séquençage de la région ITS2 à l'aide des amorces ITS3/ITS4_KYO1 identifiées dans la littérature, a été testée sur des pools d'ADN de concentrations connues et a permis d'identifier et d'estimer, de manière fiable, l'abondance de la plupart des espèces fongiques associées au dépérissement du noyer (Figure 8).

L'analyse par métabarcoding des échantillons de noix et rameaux symptomatiques récoltés en 2020 et 2021 a révélé des résultats intéressants et complémentaires de l'approche culture-dépendante. L'analyse des séquences a confirmé la présence des principaux genres phytopathogènes dans les échantillons symptomatiques (P1 à P12) : *Botryosphaeria*, *Neofusicoccum*, *Diaporthe*, *Fusarium* et *Colletotrichum*. En accord avec l'approche culturale, les rameaux sont dominés par les genres *Diaporthe* et *Fusarium* tandis que les brous sont dominés par le genre *Colletotrichum*, suivi de près par les genres *Neofusicoccum* et *Botryosphaeria*. De plus, d'autres genres tels que *Gibellulopsis* (marron clair), *Aureobasidium* (bleu foncé) et *Vishniacozyma* (marron foncé) ont été détectés avec une abondance non négligeable (c'est-à-dire figurant dans le top 15 des noix symptomatiques) tandis que le genre *Boeremia* (corail) était également bien représenté dans certaines parcelles pour les rameaux (Figure 11). Le genre *Gibellulopsis* n'a pas encore été décrit comme associé au noyer dans la littérature scientifique. En outre, les profils d'abondance sont très variables selon les parcelles, comme cela a été observé via l'analyse culture-dépendante.

Les méthodes culture-dépendante et culture-indépendante sont donc deux approches complémentaires permettant de caractériser le pathobiome d'une culture. Mieux connaître les agents pathogènes permet de mieux appréhender les complexes fongiques et d'étudier les facteurs déclenchants de la maladie (pratiques culturales, facteurs pédoclimatiques...).

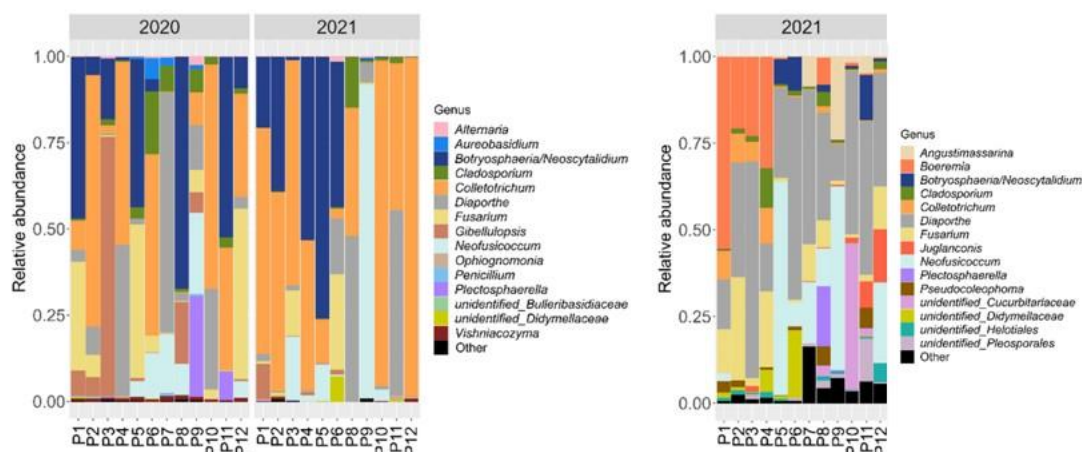


Figure 9 : Abondance relative des différents genres fongiques après séquençage par métabarcoding de l'ITS2 à partir des échantillons symptomatiques de noix (figure de gauche) et de rameaux (figure de droite) prélevées dans 12 parcelles (P1 à P12).

Description de la figure

Ces histogrammes confirment la présence des principaux genres phytopathogènes dans les échantillons symptomatiques (P1 à P12) : *Botryosphaeria*, *Neofusicoccum*, *Diaporthe*, *Fusarium* et *Colletotrichum*. Les rameaux sont dominés par les genres *Diaporthe* et *Fusarium* tandis que les brous sont dominés par le genre *Colletotrichum*, et les genres *Neofusicoccum* et *Botryosphaeria*. De plus, d'autres genres tels que *Gibellulopsis* (marron clair), *Aureobasidium* (bleu foncé) et *Vishniacozyma* (marron foncé) ont été détectés avec une abondance non négligeable (c'est-à-dire figurant dans le top 15 des noix symptomatiques) tandis que le genre *Boeremia* (corail) était également bien représenté dans certaines parcelles pour les rameaux. En outre, les profils d'abondance sont très variables selon les parcelles.

3.2. Développement d'un outil transférable de PCR ou PCR multiplexe sur les espèces les plus fréquentes

Toutefois, les analyses de la méthode culture-indépendante sont chronophages et coûteuses, ce qui peut être limitant pour un diagnostic immédiat de l'état sanitaire d'une parcelle. C'est pourquoi, un outil de diagnostic plus rapide, basé sur de la PCR multiplexe avec contrôle interne d'amplification, a été développé (Picot *et al.*, 2024). À la différence du métabarcoding, cet outil apporte des informations qualitatives de type présence/absence de l'espèce étudiée. Il est pour le moment développé pour les espèces majoritaires appartenant à la famille des Botryosphaeriaceae, à savoir *N. parvum* et *B. dothidea*. Nous avons validé la performance de notre méthode en évaluant :

1. son inclusivité, c'est-à-dire en confirmant l'amplification à partir d'un panel de onze isolats de *N. parvum* et *B. dothidea*
2. son exclusivité, c'est-à-dire en confirmant l'absence d'amplification sur 20 espèces autres que *N. parvum* et *B. dothidea* associées au noyer (*N. mediterraneum*, *Diplodia seriata*, *Lasiodiplodia theobromae*, *Dothiorella omnivora*, *Colletotrichum godetiae*, *C. fiorinae*, *Diaporthe eres*, *Dia. foeniculina*, *Dia. novem*, *Dia. rudis*, *Dia. amygdali*, *Fusarium solani* species complex, *F. juglandicola*, *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *Alternaria alternata*, *Epicoccum nigrum*, *Boeremia exigua*, *Juglanconis juglandina* et *Didymellaceae* sp).
3. sa sensibilité (0.1 pg d'ADN pour *N. parvum* et 0.01 pg d'ADN pour *B. dothidea*)
4. son applicabilité sur des échantillons de noix et de rameaux symptomatiques et asymptomatiques

Les amorces développées et les conditions de leur utilisation sont disponibles dans l'article cité et permettent leur utilisation en routine.



4. Conclusions

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes spécifiquement intéressés à la famille des Botryosphaeriaceae. Or, l'étude de plus de 300 échantillons symptomatiques prélevés à l'échelle nationale a confirmé la présence d'une communauté fongique comprenant des espèces endophytes mais également pathogènes dont les espèces *B. dothidea* et *N. parvum* appartenant à la famille des Botryosphaeriaceae. Cette pathogénicité a été confirmée lors d'inoculations au verger. L'ensemble des espèces pathogènes identifiées soulève la question du rôle de ces communautés fongiques dans l'expression des dépérissements. La poursuite de ces travaux consistera à déterminer quel sont les facteurs déclenchant la maladie et quels sont les complexes fongiques associés aux dépérissements. Les avancées dans le cadre du projet CARIBOU, en particulier le développement de méthodes de diagnostic basées sur le metabarcoding pour l'état sanitaire des noyers, et les outils de détection seront valorisés dans le projet CASDAR MAGIC (2022-2025) pour l'identification et la caractérisation de ces espèces mais devront être élargis aux autres groupes de pathogènes non pris en compte dans ce projet.

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.

ORCID des auteurs

A. PICOT : <https://orcid.org/0000-0001-9740-560X>

F. PENSEC : <https://orcid.org/0000-0002-5378-2929>

M. BELAIR : <https://orcid.org/0000-0001-5702-9603>

Y. LALOUM : <https://orcid.org/0000-0002-1631-0789>

C. MASSON : <https://orcid.org/0000-0002-8567-6055>

Contributions des auteurs

Yohana LALOUM : obtention des financements, administration du projet, supervision, mise en œuvre des essais, analyses statistiques, interprétation et rédaction

Marie-Neige HEBRARD, Cyrielle MASSON, Adeline PICOT, Flora PENSEC : obtention des financements, supervision, mise en œuvre des essais, analyses statistiques, interprétation et rédaction

Marie BELAIR, Aude MORONVALLE : mise en œuvre des essais, analyses statistiques, interprétation et rédaction

Agnès VERHAEGHE : obtention des financements, supervision



Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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 l'ensemble des stagiaires et collaborateurs qui ont contribué à ce travail, à savoir : Abdoul Karim DEMBELE, Kouakou AMANI, Mélodie LANGLARD, Julian DETAIN, X ; ainsi que l'ensemble des nuciculteurs qui ont accueilli les équipes sur leurs parcelles pour les prélèvements.

Déclaration de soutien financier

Ce travail, réalisé dans le cadre du projet CARIBOU, a été financé par le ministère français de l'Agriculture et de l'Alimentation dans le cadre des fonds CASDAR (AAP RT 2020, projet CARIBOU coordonné par le CTIFL). Ce projet a également été financé par la Région Bretagne (bourse ARED n°1797, projet SHERWOOD) ainsi que par le ministère français de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (École doctorale CDE EGAAL 2020).

Références bibliographiques

Belair, M., Pensec, F., Jany, J., Floch, G. L., & Picot, A. (2023). Profiling Walnut Fungal Pathobiome Associated with Walnut Dieback Using Community-Targeted DNA Metabarcoding. *Plants*, 12(12), 2383. <https://doi.org/10.3390/plants12122383>

Belair, M., Picot, A., Masson, C., Hébrard, M., Debled, M., Moronvalle, A., Richard, B., Tréguer, S., Morvant, L., Henri-Sanvoisin, A., Floch, G. L., & Pensec, F. (2025). Etiology and Epidemiology of Branch Dieback and Fruit Blight and Necrosis of English Walnut in France. *Plant Disease*. <https://doi.org/10.1094/pdis-07-25-1494-re>

Laloum, Y., Verhaegue, A., Moronvalle, A., Masson, C., Hébrard, M.-N., Pensec, F., Picot, A., & Belair, M. (2022). Projet CARIBOU : élaner la recherche pour cerner le dépérissement du noyer. *Infos-Ctifl*, 386, 48.

Moral, J., Morgan, D., Trapero, A., & Michailides, T. J. (2019). Ecology and epidemiology of diseases of nut crops and olives caused by Botryosphaeriaceae fungi in California and Spain. *Plant Disease*, 103, 1809-1827. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-19-0622-FE>

Picot, A., Prévost, C., Belair, M., Coton, E., & Pensec F. (2024). Development of a multiplex PCR assay to detect *Neofusicoccum parvum* and *Botryosphaeria dothidea* in walnut. *Current Microbiology*. 29;81(12):432. <https://doi.org/10.1007/s00284-024-03954-9>

Pour citer cet article : Cyrielle MASSON, Adeline PICOT, Flora PENSEC, Yohana LALOUM, Aude MORONVALLE, Marie-Neige HEBRARD, Marie BELAIR & Agnès VERHAEGHE, 2026 - Diversité, pathogénicité et origine des espèces de Botryosphaeriaceae dans les noyeraies en France. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol112-art11>



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.



Haies réunionnaises : biodiversité, services écosystémiques et pratiques de plantation

François VAN-MEERHAEGHE¹, Solenn BOURIEL¹

¹ EPLEFPA FORMA'TERRA, Saint-Paul, France

Correspondance : francois.van-meerhaeghe@educagri.fr ; solenn.bouriel@educagri.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art12>

Résumé

Les haies de l'île de La Réunion constituent des éléments clés du paysage et jouent un rôle majeur dans le maintien de la biodiversité locale. Ces aménagements linéaires, lorsqu'ils sont composés d'espèces indigènes ou endémiques, offrent une grande diversité de services écosystémiques, allant de la protection contre le vent et l'érosion à la fourniture de ressources mellifères et fruitières. Les travaux présentés dans cet article décrivent les fonctions écologiques des haies, les critères de choix des espèces, les modalités pratiques de plantation ainsi que les recommandations pour leur entretien. La diversité des strates végétales et la gestion adaptée des espèces envahissantes permettent de maximiser la biodiversité et la résilience des haies, tout en valorisant les jardins et les exploitations agricoles. Cet exemple fournit un cadre pour concilier aménagement paysager, production et préservation écologique dans les contextes tropicaux.

Mots-clés : haies, biodiversité, services écosystémiques, espèces indigènes, agroécologie, La Réunion

Abstract: Réunion Island hedgerows: biodiversity, ecosystem services, and planting practices

Hedgerows on Reunion Island are key landscape elements and play a major role in maintaining local biodiversity. When composed of native or endemic species, these linear plantings provide a wide range of ecosystem services, including protection against wind and soil erosion, as well as the provision of nectar, pollen, and fruit resources. This article presents the ecological functions of hedgerows, criteria for species selection, practical guidelines for planting, and recommendations for their maintenance. Managing plant strata diversity and controlling invasive species enhances both biodiversity and the resilience of hedgerows, while adding value to gardens and agricultural systems. This example offers a framework for integrating landscape management, production, and ecological conservation in tropical contexts.

Keywords: hedgerows, biodiversity, ecosystem services, native species, agroecology, Réunion Island

1. Introduction

Les haies, éléments linéaires de la végétation, jouent un rôle essentiel dans la structuration des paysages agricoles et urbains. Elles sont particulièrement importantes en raison de leur capacité à maintenir la biodiversité locale, à protéger les sols contre l'érosion et à offrir des ressources pour la faune et l'agriculture (Wolton, 2015 ; [Montgomery et al., 2020](#)). Cependant, la composition des haies réunionnaises est souvent dominée par des espèces exotiques envahissantes, ce qui compromet leur efficacité écologique.

La gestion des haies en intégrant des espèces indigènes ou endémiques permet de restaurer leur fonction écologique et de renforcer les services écosystémiques qu'elles offrent. Ces services incluent la régulation du climat local, la filtration de l'air et de l'eau, la pollinisation, la lutte biologique, ainsi que la fourniture de produits alimentaires et médicinaux (Garibaldi et al., 2013 ; Boinot et al., 2023).



En conséquence, la plantation et l'entretien adaptés des haies constituent une stratégie clé pour concilier production agricole, valorisation paysagère et conservation de la biodiversité.

Les observations présentées s'appuient en partie sur les travaux menés dans le cadre du projet AGRO HAIE+ (2019–2023), dédié à l'implantation et à la restauration de haies agroécologiques à La Réunion. Dans ce cadre, 1 400 plants endémiques ou indigènes ont été implantés sur l'exploitation agricole de Forma'terra, pour un objectif initial de 1 200 plants, soit un taux de réalisation supérieur à 100 %. L'ensemble des aménagements représente 1 000 mètres linéaires de haies.

Le contenu intègre également les enseignements issus de différentes interventions menées au sein de l'établissement de l'EPLFPA Forma'terra, ainsi que des travaux réalisés par l'ARMEFLHOR (Association Réunionnaise pour la Modernisation de l'Économie Fruitière, Légumière et Horticole), notamment dans le cadre d'un travail collaboratif mené pour le projet DEPHY Expé STOP – Systèmes de cultures tropicaux zéro pesticide de synthèse (2018–2023).

Ainsi, l'ensemble de ces travaux constitue le socle empirique sur lequel reposent les observations et les recommandations développées dans cet article.

2. Les services rendus par les haies

Les haies réunionnaises assurent un ensemble de fonctions écologiques, agronomiques, paysagères et socio-économiques particulièrement stratégiques dans un contexte insulaire tropical soumis aux alizés, aux épisodes cycloniques et à une forte pression d'espèces exotiques envahissantes. Elles constituent des infrastructures agroécologiques multifonctionnelles contribuant à la résilience des exploitations et à la préservation des ressources naturelles.

En premier lieu, les haies remplissent une fonction de protection mécanique en agissant comme brise-vent, notamment dans les zones exposées aux alizés pouvant atteindre 60 à 80 km·h⁻¹. En réduisant la vitesse du vent et les turbulences près du sol, elles protègent efficacement les cultures sensibles telles que les bananeraies, les pitayas, les vergers et les systèmes maraîchers. Des observations ont montré qu'après un épisode cyclonique, des haies couchées ont pu être redressées et restaurées par une taille manuelle adaptée, sans dommages structurels persistants, illustrant leur capacité de résilience face aux événements climatiques extrêmes.

Les haies jouent également un rôle majeur dans la lutte contre l'érosion et la limitation du ruissellement. Grâce à leurs systèmes racinaires, elles stabilisent les sols, en particulier sur les terrains pentus caractéristiques de La Réunion (cirques, ravines, anciennes pentes sucrières). L'érosion hydrique peut atteindre en moyenne jusqu'à 1 cm de sol par an dans les systèmes mécanisés, une perte quasiment irréversible à l'échelle humaine. Lors des pluies tropicales intenses, les haies ralentissent le ruissellement, favorisent l'infiltration de l'eau, réduisent l'atterrissement vers les ravines et le lagon et contribuent à la stabilité des talus ainsi qu'à la limitation des accumulations de terre en bordure de parcelles (Permalab, 2025).

Associées à des bandes enherbées, les haies exercent une fonction de filtration naturelle de l'air et de l'eau. Sur certaines exploitations dépourvues de fossés, elles jouent un rôle central dans la gestion de l'eau et participent à l'atténuation des excès thermiques.

Sur le plan écologique, les haies constituent des habitats et des corridors favorisant le déplacement, l'alimentation et la reproduction de nombreuses espèces. Elles accueillent des auxiliaires de culture tels que coccinelles, syrphes, araignées et reptiles, ainsi qu'une avifaune diversifiée. Parmi les espèces indigènes observées figurent l'Oiseau-lunettes gris (*Zosterops borbonicus*), la Salangane des Mascareignes (*Aerodramus francicus*) et la Tourterelle malgache (*Nesoenas picturatus*). Concernant l'avifaune exotique, on observe le Bulbul orphée (*Pycnonotus jocosus*), le Foudi de Madagascar



(*Foudia madagascariensis*), le Martin triste (*Acridotheres tristis*), le Moineau domestique (*Passer domesticus*) ainsi que le Pigeon domestique (*Columba livia*).

En renforçant la connectivité écologique, notamment lorsqu'elles remplacent des espèces exotiques envahissantes par des espèces indigènes ou endémiques, les haies contribuent à la cohérence écologique du territoire inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO « Pitons, cirques et remparts de l'île de La Réunion ».

Les haies constituent également une ressource mellifère importante. Elles fournissent nectar et pollen aux insectes pollinisateurs, notamment lors des périodes de faible floraison des cultures. Parmi les espèces à fort intérêt mellifère figurent le benjoin (*Terminalia bentzoë*), le bois d'arnette (*Dodonaea viscosa*), le bois de Judas (*Cossinia pinnata*), le latanier rouge (*Latania lontaroides*), le palmiste blanc (*Dictyosperma album*) et la patte-poule (*Vepris lanceolata*), assurant une ressource étalée dans le temps favorable à l'apiculture réunionnaise (Parc national de La Réunion & ARMEFLHOR, 2024).

La restauration des haies participe par ailleurs à la lutte contre les espèces exotiques envahissantes telles que le Tamarin de l'Inde (*Pithecellobium dulce*), le Cassis ou faux mimosa (*Leucaena leucocephala*) et la Fataque (*Megathyrus maximus*), dont les niveaux d'envahissement sont respectivement classés 3, 5 et 4 par le Conservatoire Botanique National Mascarin. Leur remplacement par des espèces indigènes ou endémiques contribue à la préservation de la biodiversité locale et au respect des engagements liés au classement UNESCO.

Les haies jouent également un rôle clé dans la conservation des ressources génétiques locales. Elles peuvent s'inscrire dans des dispositifs de collecte de semences et abriter des espèces protégées, telles que celles listées par l'arrêté ministériel du 27 octobre 2017, qui fixe la liste des plantes indigènes et endémiques protégées à La Réunion. Des espèces telles que le benjoin (*Terminalia bentzoë*), le bois de pintade (*Coptosperma borbonica*), le bois de sable (*Indigofera amoylum*), le latanier rouge (*Latania lontaroides*) et le palmiste blanc (*Dictyosperma album*) sont classées en danger ou en danger critique et bénéficient d'un statut de protection, leur intégration en haie contribuant à leur sauvegarde.

Sur le plan agronomique, les haies contribuent à l'amélioration de la qualité des sols en renforçant leur fertilité biologique. Elles participent également à la protection des ravines et du lagon, qui constituent des enjeux environnementaux majeurs pour le territoire réunionnais. En réduisant la vitesse du vent et en créant des zones d'ombrage partiel, elles favorisent la diminution de l'évapotranspiration, le maintien de l'humidité des sols ainsi que la régulation du microclimat, en particulier dans les zones chaudes et sèches. À plus long terme, l'utilisation d'espèces indigènes issues de la forêt semi-sèche pourrait permettre de limiter les besoins en eau des haies elles-mêmes.

Les haies constituent par ailleurs un habitat favorable à la faune auxiliaire. Dès 2020, une forte présence de coccinelles a été observée dans les nouvelles haies implantés. Cet organisme représentait toutefois le seul bioindicateur relevé au cours de la première année de suivi. En 2021, le taux de présence annuel a augmenté de manière significative sur ces haies, avant de diminuer en 2022. Parallèlement, la présence des araignées a globalement progressé au fil des années (Graindorge R. et al., 2024).

D'autres groupes, tels que les pollinisateurs (notamment les syrphes et les abeilles), ont également été observés, bien que leur présence se révèle variable selon les années. Les syrphes ont été détectés de manière relativement régulière, tandis que les abeilles présentent une occurrence plus ponctuelle. Les momies de pucerons, indicatrices de parasitisme, ont quant à elles été peu observées sur le site (Graindorge et al., 2024).

Enfin, les arthropodes capturés appartiennent majoritairement à quelques ordres dominants, en particulier les diptères, suivis des lépidoptères et des hémiptères. Néanmoins, les variations interannuelles observées soulignent l'influence des conditions environnementales et des pratiques agricoles sur la dynamique de ces communautés (Graindorge et al., 2024).



Au-delà de ces fonctions écologiques et agronomiques, les haies assurent une protection visuelle des parcelles en limitant leur visibilité depuis l'extérieur et en contribuant à réduire les risques de vols de fruits et légumes. Elles participent également à la structuration et à la valorisation des paysages ruraux et périurbains, en apportant ombre, fraîcheur et qualité esthétique, et en permettant la reconstitution d'allées historiques de domaines créoles utilisant par exemple le cocotier (*Cocos nucifera*) ou le palmiste blanc (*Dictyosperma album*).

Enfin, les haies remplissent une fonction socio-économique en valorisant les bordures et zones non exploitées. Elles participent également à la production de plantes à usage parfum, aromatique et médicinal (PAPAM), la pharmacopée réunionnaise comprenant 34 plantes inscrites à la pharmacopée française. Des espèces telles que le benjoin (*Terminalia bentzoë*), le bois d'olive noir (*Olea europaea*), le bois d'arnette (*Dodonaea viscosa*), le bois de Judas (*Cossinia pinnata*) ou la patte-poule (*Vepris lanceolata*) sont reconnues pour leurs usages diurétiques, antiseptiques, anti-inflammatoires ou fébrifuges selon les savoirs traditionnels (Association pour les Plantes Aromatiques et Médicinales de La Réunion, 2025). Certaines essences peuvent également être valorisées pour la production de bois d'œuvre ou d'artisanat. À ce titre, le benjoin est historiquement recherché pour la qualité de son bois, notamment son grain et sa teinte (Parc national de La Réunion & ARMEFLHOR, 2024). Cela est possible lorsque sa gestion favorise sa hauteur et son développement. Dans le cadre des aménagements réalisés sur le site, le choix des espèces s'est orienté vers des formations arbustives de hauteur modérée, afin de faciliter la gestion des haies et de limiter les effets d'ombrage sur les cultures adjacentes. La valorisation économique de ces plantations n'a toutefois pas été développée à ce stade.

Enfin, les haies constituent un support pédagogique pertinent pour l'enseignement agricole et les actions de sensibilisation à la biodiversité, en offrant un terrain d'observation concret des interactions écologiques.

3. Principes de conception des haies

La conception d'une haie efficace repose sur une sélection rigoureuse des espèces et sur une organisation végétale cohérente, adaptées aux objectifs agronomiques, écologiques et paysagers recherchés.

Le choix des espèces doit avant tout privilégier des plantes indigènes, endémiques ou protégées, adaptées aux conditions pédoclimatiques locales. Les végétaux retenus doivent présenter un intérêt mellifère afin de soutenir les pollinisateurs, notamment en période de disette. Leur port et leur architecture doivent permettre une organisation structurée et fonctionnelle de la haie, tandis que leur hauteur doit rester compatible avec les cultures voisines afin d'éviter un ombrage excessif. Les espèces sélectionnées doivent également démontrer une bonne résistance au vent et à la sécheresse, tout en étant faciles à entretenir et capables de tolérer la taille. Selon les objectifs poursuivis, elles peuvent aussi offrir des propriétés médicinales, aromatiques, fourragères ou d'autres usages utilitaires. Enfin, la composition doit intégrer la notion de succession écologique, en associant des espèces pionnières, post-pionnières, nomades pionnières, nomades forestières, dryades et forestières, choisies en fonction de leur longévité et de leurs besoins en lumière.

Pour assurer une diversité fonctionnelle suffisante, il est conseillé de regrouper au minimum six espèces différentes. Les plantes sélectionnées doivent tolérer la taille ou bien jouer un rôle de remplissage durant les premières années. La gestion de la haie doit rester respectueuse de l'environnement, sans recours aux produits phytosanitaires. L'entretien repose plutôt sur l'utilisation d'un paillage organique, d'une épaisseur comprise entre 10 et 15 cm, qui limite la concurrence des adventices et maintient l'humidité du sol.

4. Recommandations pratiques de plantation

La mise en place d'une haie peut se faire en ligne simple ou en double ligne, disposée en quinconce ou angle droit (cf. Figure 1).

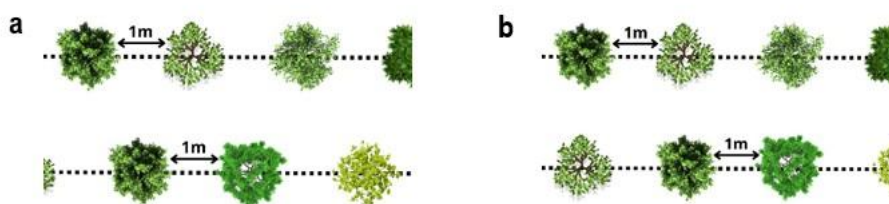


Figure 1 : Disposition de haie double ligne en quinconce (a) ou angle droit (b).

Description de la figure

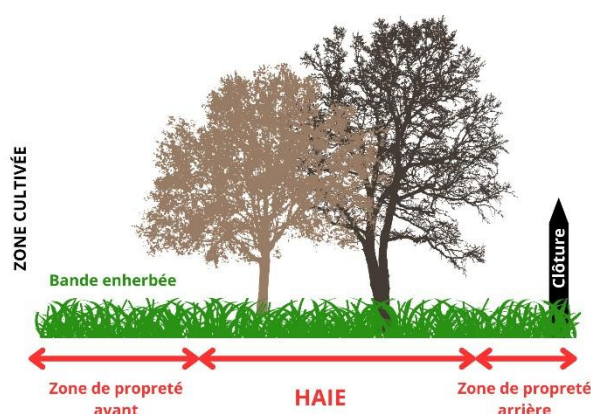
Le premier schéma présente sur deux lignes des arbres en quinconce de différentes espèces, sur une même ligne l'écart entre deux arbres est de 1 m.

Le second schéma présente sur deux lignes des arbres de différentes espèces, les deux lignes sont symétriques. Sur une même ligne, l'écart entre deux arbres est de 1 m.

Son implantation doit idéalement être perpendiculaire aux vents dominants et au sens de la pente, même si cette contrainte est parfois difficile à respecter dans les jardins. Les plants sont installés à un mètre d'intervalle, dans une tranchée continue ou dans des trous individuels. Lors de la plantation, il est recommandé d'apporter un mélange de compost et de terre végétale autour de la motte, puis de tasser légèrement le sol pour former une cuvette de rétention. Un arrosage copieux de l'ordre de 10 litres par plant doit être réalisé immédiatement après la mise en place, suivi de l'installation d'un système d'irrigation adapté. Enfin, un paillage organique d'environ 30 cm d'épaisseur, réparti sur un mètre autour de chaque plant, permet de favoriser la reprise et la croissance des végétaux.

5. Entretien d'une haie

L'entretien d'une haie débute dès la plantation et se poursuit tout au long de son cycle de vie. Trois zones principales nécessitent une attention particulière (cf. figure 2) : l'intérieur de la haie,



généralement paillé et maintenu propre à l'aide d'une houe ; la zone de propreté avant, située entre la parcelle et la haie, entretenue à la débroussailluse, à la tondeuse ou au gyrobroyeur, en veillant à ne pas endommager les pieds des plantes ; et enfin la zone de propreté arrière, souvent longée par une clôture, qui doit être dégagée manuellement, par exemple au sabre.

Figure 2 : Schéma des zones d'entretien d'une haie tout au long de son cycle de vie, coupe de face.

Description de la figure

Le schéma présente de gauche à droite les trois zones de haies décrites, d'abord la zone de propreté avant puis la zone de haie, avec les arbres, et enfin la zone de propreté arrière allant du houppier à la clôture.



L'entretien de la strate herbacée consiste à contrôler la végétation afin d'éviter qu'elle ne concurrence les jeunes plants. Cette gestion, réalisée au sabre, à la débroussailleuse ou à la tondeuse, permet d'obtenir un couvert herbacé homogène, par exemple à base de chiendent pied-de-poule (*Cynodon dactylon*) ou d'autres graminées indigènes. Les adventices problématiques comme le fatague (*Urochloa maxima*), classé envahissant de niveau 4 sur 5, doivent être arrachées avec leur racine puis laissées à sécher au soleil.

La strate ligneuse envahissante doit également être surveillée, car certaines espèces colonisatrices compromettent rapidement l'équilibre de la haie. Le cassi (*Leucaena leucocephala*), de niveau 5/5, le bois noir (*Albizia lebbbeck*, 4/5), le tamarin de l'Inde (*Pithecellobium dulce*, 3/5) ou encore le margosier (*Melia azedarach*, potentiellement envahissant), doivent être contrôlés par des interventions régulières, allant du désherbage mécanique au sciage ou à l'arrachage des jeunes ligneux.

La strate lianescente représente un autre risque, car une liane peut recouvrir la haie et provoquer la mortalité des plants, surtout lorsqu'elle utilise une clôture comme tuteur. Parmi les espèces problématiques figurent la liane papillon (*Hiptage benghalensis*, 5/5), la rose de bois (*Merremia tuberosa*, 3/5) et le pois mascate (*Mucuna pruriens*, 3/5). Leur élimination doit intervenir rapidement afin d'éviter l'étouffement de la haie.

L'entretien comprend également le remplacement des plants morts, en particulier dans les haies jeunes, ainsi que la gestion de la vigueur et de la hauteur des espèces implantées. Cette dernière opération est réalisée à l'aide de sécateurs ou de scies, en veillant à protéger les espèces moins compétitives comme le bois de Judas. La période de nidification, entre octobre et mi-novembre, doit être évitée afin de ne pas perturber l'avifaune.

Enfin, les abords de la haie doivent être entretenus pour prévenir l'enfrichement, limiter les risques d'accident liés aux pierres et faciliter l'utilisation des machines. Après un cyclone, des interventions spécifiques sont nécessaires, telles que la taille des branches cassées ou le redressement des plants couchés, les espèces indigènes montrant généralement une bonne capacité de résilience.

L'entretien d'une haie évolue au cours de son cycle de vie (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Croissance et entretien des haies selon l'âge.

Âge de la haie	Croissance et caractéristiques	Travaux à prévoir
0 – 6 mois	Plants petits et vulnérables aux adventices	Désherbages fréquents et paillages réguliers
6 – 12 mois	Croissance régulière des plants	Désherbages moins fréquents ; taille de formation (pincement) ; dernier apport de paillage
12 – 18 mois	Début de la fermeture en frondaison, moins de pénétration par le vent ; haie plus autonome	Entretien de la zone de propreté si nécessaire
18 – 36 mois	La haie devient de plus en plus indépendante	Entretien de la zone de propreté ; surveiller le percement de la frondaison par des espèces ligneuses et lianescentes envahissantes
A partir de 12 mois	Premières floraisons	Entretien de la zone de propreté si nécessaire
A partir de 24 mois	Les taxons les plus vigoureux recouvrent les autres ; floraisons régulières ; premières régénérations naturelles possibles	Taille des taxons les plus vigoureux
A partir de 36 mois	Les végétaux de la strate arborée poussent en hauteur	Entretien de la zone de propreté ; envisager une taille des arbres les plus hauts



La croissance de la strate herbacée et des espèces envahissantes dépend directement des précipitations.

Les observations de terrain montrent une forte variabilité saisonnière : durant la saison sèche (avril à octobre), la repousse des espèces exotiques envahissantes (EEE) reste modérée et l'entretien peut être espacé. En revanche, pendant la saison des pluies, la dynamique de croissance devient exponentielle, nécessitant parfois des interventions hebdomadaires afin d'éviter l'étouffement des jeunes plants.

La fréquence et l'intensité de la repousse des EEE constituent ainsi un indicateur opérationnel du niveau de stabilisation de la haie. Les haies les plus anciennes (plantées en 2018–2019) nécessitent aujourd'hui peu d'entretien, traduisant une autonomisation progressive liée à la fermeture de la frondaison. À l'inverse, les haies jeunes ou difficilement accessibles peuvent subir une pression élevée.

Un fort envahissement par les lianes, notamment *Cardiospermum halicacabum*, est observé dans les haies implantées en bordure de grillage, ces structures servant de support à la colonisation. Il apparaît donc préférable, lorsque cela est possible, d'éviter l'implantation immédiate le long des clôtures.

De manière générale, le maintien d'une bande enherbée d'environ deux mètres, entretenue par tonte régulière, retarde significativement la recolonisation des haies par les EEE et constitue une pratique de gestion efficace à long terme.

6. Exemple d'assortiment d'espèces

La composition des haies peut être adaptée en fonction des conditions écologiques de chaque zone de l'île. Le tableau 2 ci-dessous présente une suggestion de six espèces adaptées respectivement à la partie Ouest et à la partie Est.

Tableau 2 : Exemple d'assortiment composé de six espèces pour la partie Ouest et la partie Est de l'île.

Exemple pour l'Ouest	Exemple pour l'Est
Mahot tantan (<i>Dombeya acutangula</i> subsp <i>acutangula</i> les deux variétés <i>acutangula</i> ou <i>plamata</i>)	Palmiste rouge (<i>Acanthophoenix rubra</i>)
Palmiste blanc (<i>Dictyosperma album</i>)	Bois de gaulette (<i>Doratoxylon apetalum</i>)
Bois d'arnette (<i>Dodonea viscosa</i>)	Bois d'olive blanc (<i>Olea lancea</i>)
Bois de Judas (<i>Cossinia pinnata</i>)	Bois de joli cœur (<i>Pittosporum senacia</i>)
Bois rouge (<i>Elaeodendron orientale</i>)	Takamaka (<i>Calophyllum tacamahaca</i>)
Patte poule (<i>Vespris lanceolata</i>)	Petit natte (<i>Labourdonnaisia calophylloides</i>)

Ces assortiments peuvent être modulés selon les objectifs de la haie, la disponibilité des plants et les conditions spécifiques de chaque jardin ou exploitation.

L'assortiment de l'Ouest combine des espèces pionnières, mellifères, médicinales et à valeur économique. Le mahot tantan et le bois d'arnette, en tant qu'espèces pionnières, permettent de coloniser rapidement les zones ensoleillées et de stabiliser le sol. Des arbres plus imposants comme le bois de Judas et le bois rouge structurent la haie à long terme et participent à la conservation d'espèces rares. Les espèces mellifères favorisent la pollinisation et le maintien de la biodiversité locale, tandis que des plantes comme le palmiste blanc et la patte poule combinent intérêt économique et médicinal. La diversité des hauteurs, allant de 2,5 m pour le mahot tantan jusqu'à 20 m pour le palmiste blanc et le bois rouge, crée une haie stratifiée, efficace pour protéger contre le vent, fournir de l'ombre et offrir un habitat à la faune. L'exposition au soleil ou au mi-soleil de ces espèces correspond aux conditions locales de l'Ouest, garantissant leur bonne adaptation (Armefflor & Parc national de La Réunion, 2024).



Pour la partie Est, l'assortiment sélectionne des espèces adaptées à des zones plus humides ou mi-ensoleillées, tout en intégrant des fonctions écologiques, économiques et médicinales. Le bois de gaulette et le bois de joli cœur sont des espèces pionnières capables de stabiliser rapidement le sol. Les arbres comme le palmiste rouge et le takamaka apportent une structure à long terme à la haie. Les espèces mellifères et médicinales favorisent la biodiversité et les usages traditionnels, tandis que certaines espèces présentent un intérêt économique, comme le palmiste rouge (alimentaire) et le bois de gaulette (bois d'œuvre). La stratification des hauteurs, de 6 m pour le bois de joli cœur à 15 m pour le palmiste rouge, contribue à la protection contre le vent et à la création de microhabitats, tout en optimisant l'exposition solaire pour chaque espèce (Armefflor & Parc national de La Réunion, 2024).

7. Discussion

Dans le contexte de La Réunion, la pression exercée par les espèces exotiques envahissantes (EEE) constitue un facteur structurant dans la réussite et la pérennité des haies agroécologiques. Les observations réalisées sur plusieurs haies expérimentales permettent désormais d'objectiver cette pression à travers des indicateurs mesurables, notamment la fréquence des interventions d'entretien, la dynamique de recolonisation des adventices et les taux de mortalité des plants.

Le taux moyen de mortalité observé sur l'ensemble des haies étudiées 2 ans après leur plantation s'établit à environ 9–10 %, avec des variations comprises entre 3 % et 31 % selon les sites. Cette variabilité traduit l'influence combinée de facteurs environnementaux, techniques et biologiques. Malgré ces écarts, le niveau moyen de mortalité peut être considéré comme modéré au regard des contraintes pédoclimatiques tropicales (alternance saison sèche / saison des pluies, vents forts, sols superficiels ou rocheux) et des fortes pressions biotiques. Il témoigne d'une capacité globale de reprise satisfaisante des espèces indigènes et endémiques implantées.

L'analyse des causes de mortalité met en évidence une combinaison de facteurs abiotiques et biotiques. Le stress hydrique constitue un déterminant majeur, en particulier durant les premières semaines suivant la période de plantation. Les dysfonctionnements des systèmes d'irrigation (goutteurs déplacés, obstrués ou défaillants) amplifient cette contrainte. Les caractéristiques édaphiques, notamment la faible profondeur ou la forte pierrosité de certains sols, limitent l'ancrage racinaire et la disponibilité en eau. À ces facteurs s'ajoutent des causes anthropiques telles que les accidents lors des opérations d'entretien (coupes accidentelles, entailles des troncs) ainsi que des vols ponctuels de plants, en particulier pour certaines espèces à forte valeur patrimoniale.

La compétition interspécifique avec les EEE apparaît comme un facteur déterminant, surtout dans les haies jeunes dont la frondaison n'est pas encore fermée. Les espèces envahissantes à croissance rapide exercent une compétition pour la lumière, l'eau et les nutriments, pouvant ralentir la croissance des taxons indigènes voire entraîner leur dépérissement. Cette pression est particulièrement marquée en saison des pluies, période durant laquelle la croissance végétative est maximale.

Par ailleurs, la disparition progressive de certaines espèces pionnières, telles que *Dodonaea viscosa*, a été observée dans les haies les plus anciennes. Ce phénomène s'inscrit dans une dynamique de succession écologique classique. Les espèces pionnières, adaptées aux conditions initiales de forte luminosité et de stress environnemental, facilitent l'installation d'autres taxons en améliorant les conditions microclimatiques (ombrage, enrichissement organique). Toutefois, à mesure que la canopée se densifie et que la compétition pour la lumière s'intensifie, ces espèces héliophiles tendent à régresser au profit d'espèces plus tolérantes à l'ombrage ou à croissance plus compétitive. Cette évolution traduit une maturation progressive de la haie vers une structure plus stable et stratifiée.

Ainsi, les résultats observés confirment que la performance des haies agroécologiques en contexte insulaire tropical dépend d'une interaction dynamique entre sélection des espèces, gestion adaptative



et contrôle des EEE. La prise en compte de ces paramètres dans la conception et le suivi des haies conditionne leur résilience à moyen et long terme.

8. Conclusion

La plantation et la gestion des haies à La Réunion constituent une stratégie agroécologique structurante permettant de concilier production agricole, résilience climatique et conservation de la biodiversité. En favorisant l'utilisation d'espèces indigènes ou endémiques adaptées aux conditions pédoclimatiques locales, les haies assurent simultanément des fonctions de protection mécanique, de régulation hydrique, de soutien à la pollinisation, de régulation biologique et de conservation des ressources génétiques (Parc national de La Réunion, & ARMEFLHOR, 2024).

Leur efficacité repose sur une conception intégrant diversité spécifique, stratification végétale et gestion continue des espèces exotiques envahissantes. L'évaluation régulière de leur état écologique, à l'aide d'indicateurs structurels et fonctionnels, permet d'en garantir la durabilité.

Dans un contexte insulaire tropical soumis aux aléas climatiques et aux pressions biologiques, les haies apparaissent comme des infrastructures écologiques essentielles. Elles constituent un levier opérationnel de la transition agroécologique et un modèle transférable à d'autres territoires tropicaux confrontés à des enjeux similaires.

Ethique

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.

ORCID des auteurs

François VAN-MEERHAEGHE : <https://orcid.org/0009-0001-4150-5457>

Solenn BOURIEL : <https://orcid.org/0009-0003-6716-6574>

Contributions des auteurs

François VAN-MEERHAEGHE : conception du projet, coordination des différents travaux, relecture du manuscrit, validation scientifique.

Solenn BOURIEL : assemblage des informations et écriture 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 le Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire pour son soutien financier.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Projet AGRO HAIE+ : Reconception de haies indigènes au service de l'agroécosystème, financé par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire (AAP 2019 n°19AEA520684), pour la période du 1er septembre 2019 au 28 février 2023.

Références bibliographiques

Armefflor, & Parc national de La Réunion. (2024). *Plantes indigènes pour l'aménagement agricole à La Réunion : Palettes végétales selon les grandes zones bioclimatiques*. Projet GAIAR – Gestion agroécologique et innovante des friches par l'agroforesterie réunionnaise. <https://www.armefflor.fr/guide-technique/plantes-indigenes-pour-lamenagement-agricole-a-la-reunion-palettes-vegetales/>

Boinot, S., Alignier, A., Pétilion, J., Ridet, A., & Aviron, S. (2023). Hedgerows are more multifunctional in preserved bocage landscapes. *Ecological Indicators*, 154, 110689. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110689>

Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A., Kremen, C., Carvalheiro, L. G., Harder, L. D., Afik, O., Bartomeus, I., Benjamin, F., Boreux, V., Cariveau, D., Chacoff, N. P., Dudenhöffer, J. H., Freitas, B. M., Ghazoul, J., Greenleaf, S., ... Klein, A. M. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science (New York, N.Y.)*, 339(6127), 1608-1611. <https://doi.org/10.1126/science.1230200>

Graindorge R., Vanhuffel L., Clain C., de La Brière S., Delaunay J., Huat J., 2024. Co-conception et évaluation de systèmes de culture agroécologiques en milieu tropical. Retour d'expérience du projet DEPHY Expé ST0P - Systèmes de culture Tropicaux Zéro Pesticide de synthèse - 2018-2023 - Île de La Réunion. Saint-Pierre, La Réunion, 68 p.

Graindorge R., Bortoli C., Clain C., Huat J., Vanhuffel L., Delaunay J. (2024). Caractérisation de la biodiversité fonctionnelle de systèmes de culture diversifiés zéro pesticide de synthèse en milieu tropical : cas du projet DEPHY EXPE ST0P à La Réunion. *Innovations Agronomiques*, 98, 233–248.

Montgomery, I., Caruso, T., & Reid, N. (2020). Hedgerows as Ecosystems : Service Delivery, Management, and Restoration. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 51(Volume 51, 2020), 81-102. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-012120-100346>

Parc national de La Réunion, & ARMEFLHOR. (2024). *Guide haie agricole indigène à La Réunion*. ARMEFLHOR. <https://www.armefflor.fr/guide-technique/guide-haie-agricole-indigene-a-la-reunion/#>

Permalab, (2025). Présentation lors d'une présentation pour un séminaire «Haie, Nou't Patrimoine». PERMALAB. <https://permalab.fr/>

Wolton, R. J. (2015). Life in a Hedge. *British Wildlife*, 26(5), 306-317.

Pour citer cet article : François VAN-MEERHAE GHE & Solenn BOURIEL, 2026 - Haies réunionnaises : biodiversité, services écosystémiques et pratiques de plantation. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art12>



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.



Un centre de ressources numériques pour faciliter le partage et l'interopérabilité des données expérimentales dans la filière viticulture – œnologie

Xavier DELPUECH¹, Arnaud CHARLEROY² et Pascal NEVEU²

¹ Institut Français de la Vigne et du Vin, Le Grau-du-Roi, France

² INRAE UMR MISTEA, Montpellier, France

Correspondance : xavier.delpuech@vignevin.com

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art13>

Résumé

Les données générées par la recherche et le développement dans le secteur vitivinicole sont souvent caractérisées par leur complexité, leur hétérogénéité et leur dispersion entre une multitude d'acteurs. Cette fragmentation rend leur partage, leur croisement et leur réutilisation particulièrement difficiles. Pour appuyer la structuration et à la qualification des données selon les principes FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable, Réutilisable), le Centre de ressources Viti-Oeno a été mis en place dans le cadre du projet CASDAR VITIS DATA CROP. Cette application web regroupe un ensemble cohérent de ressources numériques de différentes natures : documents, vocabulaires contrôlés, ontologies, applications. L'ensemble des ressources est accessible en open-Access, à la fois pour les utilisateurs mais aussi pour les machines via une couche API Web. Le Centre de ressources est un outil au service d'une gestion de données plus efficiente et collaborative dans la communauté technique et scientifique vigne et vin. Les efforts de développement d'outils, de formation et d'animation doivent néanmoins se poursuivre pour favoriser l'adoption de l'outil.

Mots-clés : vigne, vin, partage de connaissances, vocabulaire contrôlé, ontologie, FAIR, application web

Abstract: A digital resource centre to facilitate the sharing and interoperability of experimental data in the viticulture and oenology sector

Data generated by research and development in the wine sector is often characterised by its complexity, heterogeneity and dispersion among a multitude of actors. This fragmentation makes it particularly difficult to share and reuse. To support the structuring and qualification of data according to FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), the Viti-Oeno Resource Centre was set up as part of the CASDAR VITIS DATA CROP project. This web app brings together a coherent set of digital resources of various kinds: documents, controlled vocabularies, ontologies, applications. All resources are accessible in open access, both for users and for machines via a Web API layer. This work lays the foundations for more efficient and collaborative data management in the technical and scientific wine and vine community. However, efforts to develop tools, training and outreach must continue to encourage adoption of the approach.

Keywords: grapevine, wine, knowledge sharing, controlled vocabulary, ontology, FAIR, web app

1. Introduction

L'agriculture, et en particulier la viticulture européenne, est confrontée à des défis majeurs liés au changement climatique, tels que les sécheresses, les canicules et l'émergence de nouvelles maladies. Parallèlement, une pression sociétale croissante exige la réduction du recours aux intrants phytosanitaires. Pour faire face à ces nombreux défis, les viticulteurs doivent faire évoluer leurs



systèmes de production en intégrant des nombreuses innovations comme les variétés résistantes aux maladies cryptogamiques (Dolet *et al.*, 2024) ou un recours accru aux biosolutions. Le déploiement de ces innovations nécessite une mobilisation rapide et efficace des connaissances pour caractériser leurs effets dans différents contextes de production et adapter les systèmes viticoles tout en conservant la typicité des vins produits.

Cependant, les données générées par la recherche et le développement dans le secteur vitivinicole sont souvent caractérisées par leur complexité, leur hétérogénéité et leur dispersion entre une multitude d'acteurs, allant des organismes de recherche publique comme INRAE, aux instituts techniques comme l'IFV, en passant par les chambres d'agriculture, les interprofessions et les professionnels. Cette fragmentation rend leur partage, leur croisement et leur réutilisation particulièrement difficiles, freinant ainsi l'émergence d'une véritable stratégie d'innovation dite "data-driven".

Face à ce constat, le projet VITIS DATA CROP (2021-2024), piloté par l'Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV) avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation dans le cadre d'un appel à projets CASDAR a été initié. Son objectif était de proposer un ensemble cohérent d'outils et de méthodes visant à améliorer l'interopérabilité, le partage et l'ouverture des données dans la filière vitivinicole, avec un focus sur l'innovation variétale. Le projet VITIS DATA CROP s'est articulé autour de trois actions complémentaires :

- action 1 : Harmonisation des données expérimentales ;
- action 2 : Déploiement d'outils de terrain pour l'acquisition de données interopérables ;
- action 3 : Acquisition de données participatives "viticulteurs" pour enrichir l'approche expérimentale.

Une des actions phares de ce projet a été la conception et la mise en œuvre du centre de ressources Viti-Oeno. Cette plateforme en ligne a été spécifiquement développée pour aider à la structuration et à la qualification des données selon les principes FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable, Réutilisable). Les principes FAIR permettent un partage de données efficace, avec notamment un accès par les machines afin d'automatiser l'analyse à grande échelle et l'intégration dans des systèmes d'information complexes. L'adoption rapide des technologies d'intelligence artificielle basées sur les modèles de langages renforce de plus en plus ce besoin.

Cet article présente l'approche méthodologique adoptée pour la conception du centre de ressources Viti-Oeno, les outils utilisés et la nature des ressources disponibles pour la communauté scientifique et technique vigne et vin.

2. Matériel et Méthodes

Le développement du Centre de ressources Viti-Oeno a reposé sur une démarche collaborative et l'exploitation de ressources et de technologies existantes (Charleroy *et al.*, 2023).

2.1. Une plateforme basée sur le logiciel open-source OpenSILEX

La plateforme du Centre de ressources Viti-Oeno a été développée en s'appuyant sur OpenSILEX, une suite logicielle open-source développée par INRAE UMR MISTEA, Montpellier (Neveu *et al.*, 2019). OpenSILEX est conçu pour construire des systèmes d'information intégrant les principes FAIR en s'appuyant sur une couche d'ontologies et les technologies du web sémantique. OpenSILEX a déjà été décliné en plusieurs implémentations pour des communautés scientifiques spécifiques, attestant de sa flexibilité et de sa robustesse.



2.2. Une approche de co-construction

Pour impliquer la communauté technique et scientifique, une démarche de co-construction a été adoptée, mise en œuvre au travers d'un séminaire "Partage et interopérabilité des données expérimentales vigne & vin" (19-20 janvier 2023, Montpellier). Ce séminaire a réuni plus de 50 participants, comprenant des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens, témoignant de l'actualité et de l'intérêt du sujet. Des ateliers spécifiques ont été organisés pour :

- i. Identifier les attentes et les besoins des futurs utilisateurs du Centre de ressources, en présentant une maquette de la plateforme. Les questions portaient sur les référentiels utilisés, les cas d'usage envisagés et les fonctionnalités les plus pertinentes ;
- ii. Concevoir de nouvelles ressources, en particulier un schéma de données descriptif du contexte expérimental au vignoble. Un schéma de données décrit l'organisation de la base de données d'un système d'information. Il est composé d'entités liées entre elles par des relations. Par exemple, une « parcelle » est une entité reliée à l'entité « exploitation ». Chaque entité est décrite par des attributs. Ce travail a permis d'identifier et de structurer les éléments nécessaires à une description fine et standardisée des expérimentations. ;
- iii. Partager les termes et vocabulaires en usage dans la communauté vitivinicole, afin de sensibiliser aux différences de terminologie et de commencer à définir un langage commun. Des sous-groupes de travail ont été formés pour collecter et partager des termes relatifs aux maladies, à l'agronomie, au contexte général, à la gestion technique et à l'œnologie et l'analyse sensorielle. Les vocabulaires sont les valeurs possibles des attributs des entités. Par exemple, les valeurs de l'attribut « variété » peuvent correspondre à une liste spécifique de variétés. Cette liste de variétés constitue un vocabulaire.

Les retours des participants ont souligné le besoin d'un outil regroupant des référentiels dispersés (matériel végétal, sols, échelles phénologiques, maladies) et le partage de protocoles. Une demande forte a été exprimée pour des fonctionnalités de traitement et d'analyse des données (visualisation, rapports, calculs d'indicateurs bioclimatiques, outils d'harmonisation).

2.3. Analyse de l'existant

Une analyse comparative approfondie a été menée sur plusieurs systèmes d'information existants en viticulture en France (SilexPorteGrefe, OSCAR (Miclot *et al.*, 2019)) ainsi que l'outil de collecte Adonis (Dumas *et al.*, 2016). Cette analyse a révélé que, bien que ces systèmes partagent souvent les mêmes entités (Personne, Projet, Expérience, Parcelle, etc.), les attributs utilisés pour décrire ces entités étaient généralement différents, et surtout, il n'existait pas de vocabulaires partagés. Par exemple, le même attribut pouvait être appelé « variété », « cépage » ou « greffon » selon le système, et les vocabulaires associées pouvaient également varier (exemple : « CARIGNAN B » vs « Carignan blanc »). Ce manque d'harmonisation et/ou d'alignement entre les vocabulaires utilisés constitue un frein majeur à l'interopérabilité des données.

En parallèle, des standards internationaux de gestion des données expérimentales en agronomie ont été examinés pour s'en inspirer, sans pour autant créer un nouveau standard inutilement. Les standards étudiés incluaient :

- ICASA (International Consortium for Agricultural Systems Applications) (White *et al.*, 2013) : un standard sous forme tabulaire pour décrire les paramètres et types de mesures des expériences agricoles ;
- MIAPPE (Minimal Information About Plant Phenotyping Experiment) (6) : un standard ouvert et partagé pour harmoniser les données des expériences de phénotypage végétal, incluant la



description générale de l'expérience, le plan expérimental et les conditions environnementales. MIAPPE est lui-même inspiré du modèle générique ISA ;

- ISA (Investigation-Study-Assay) (Sansone *et al.*, 2012) : Un modèle de données générique open source, structuré en « Investigation », « Study » et « Assay » pour décrire les métadonnées expérimentales.

Cette analyse a confirmé que la non-adoption des standards existants par la communauté scientifique et technique vitivinicole française était due à divers facteurs, notamment l'absence de vocabulaires traduits dans la langue native des expérimentateurs et le coût d'apprentissage perçu comme élevé.

3. Résultats

Le projet VITIS DATA CROP a abouti à la mise en œuvre du Centre de ressources Viti-Oeno, une plateforme web ouverte accessible en ligne à l'adresse <https://vitoeno.mistea.inrae.fr/resource/app/>. Ce centre a été conçu pour agréger, structurer et rendre accessibles diverses ressources numériques, facilitant ainsi la qualification des données selon les principes FAIR. Basé sur OpenSILEX, le centre utilise des technologies du web sémantique et offre un accès Web API (Application Programming Interface) pour l'interopérabilité machine-machine. Chaque ressource est identifiée de manière unique et permanente par un URI (Uniform Resource Identifier).

La stratégie de valorisation de ce centre a été axée sur une diffusion Web, visant à créer une audience et à animer la communauté scientifique et technique. Un suivi des visites a été mis en place, montrant un intérêt stable pour les ressources proposées, avec une moyenne de 80 visites mensuelles après un pic de 160 visites en juin 2023, à la suite d'une communication lors du congrès international de l'OIV (Charleroy *et al.*, 2023).

Les principaux contenus et réalisations du Centre de ressources Viti-Oeno et du projet sont détaillés ci-après (Figure 1) et détaillés par type de contenus dans la suite de l'article.

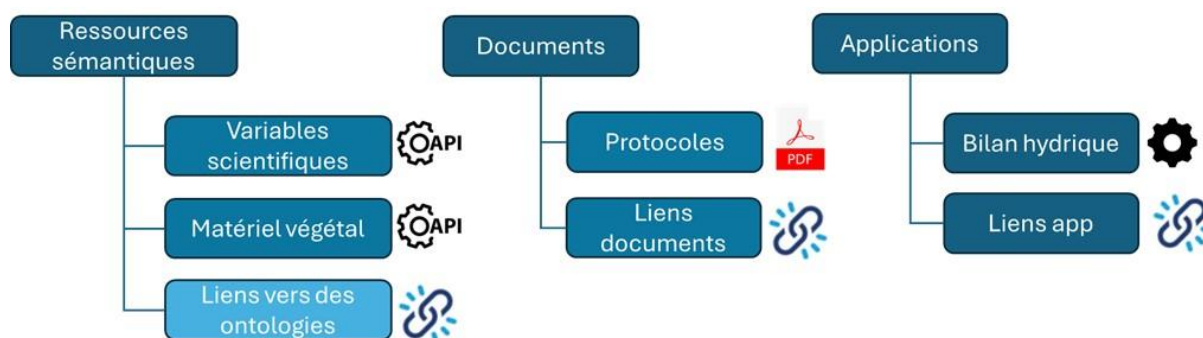


Figure 1 : Structuration du centre de ressources Viti-Oeno (<https://vitoeno.mistea.inrae.fr/resource/app/>). Certaines ressources sont intégrées à la base de données et accessibles via API, d'autres sont externes et accessibles via des liens internet.

Description de la figure

Schéma de structuration du Centre de Ressources selon les trois différents types de contenus disponibles : ressources sémantiques, documents et applications. Les ressources sémantiques contiennent des vocabulaires contrôlés (matériel végétal et variables scientifiques), accessibles via API. Des liens vers des ontologies sont proposés. Les documents contiennent essentiellement des protocoles, téléchargeables en PDF ou sous forme de liens. Enfin des applications sont référencées, soit intégrées à la plateforme, soit externes et dans ce cas des liens internet sont fournis.



3.1. Des documents : harmonisation des pratiques expérimentales

Le Centre de ressources Viti-Oeno propose une collection de documents, principalement sous forme de fichiers PDF, visant à harmoniser les méthodes de mesure et d'observation. Initialement, 18 protocoles expérimentaux et guides techniques ont été mis en ligne.

Parmi ces documents, le « Guide pour la description d'une expérimentation en vigne » a été co-écrit par des experts de l'IFV, de l'INRAE et de l'Institut Rhodanien dans le cadre du projet. Il est consultable en ligne à l'adresse https://vignevin.github.io/standard_guide/. Il a pour objectif de définir un ensemble d'éléments de description suffisamment précis pour faciliter la recherche, le croisement et la réutilisation des données expérimentales dans un contexte donné. Le guide s'adresse à la communauté technique et scientifique francophone, et couvre deux aspects principaux :

- le dispositif expérimental, décrivant les règles et procédures d'affectation des traitements aux unités expérimentales ;
- la description du contexte, incluant les caractéristiques de la parcelle (site d'expérimentation, date de plantation, densité, mode de conduite), du sol (type, profondeur) et de l'itinéraire technique (système de production, stratégies d'entretien du sol, etc.).

Pour chaque métadonnée, le guide spécifie sa définition, son type (texte, nombre, date), son format (par exemple AAAA-MM-JJ pour les dates) et le cas échéant les valeurs possibles (listes de choix ou vocabulaires contrôlés).

Ce standard est disponible en ligne via un répertoire GitHub sous licence ouverte CC0 1.0 Universal. Il est décliné en différentes formes, incluant une version sous format Excel pour faciliter son appropriation par les expérimentateurs.

Le travail de définition du schéma de données a identifié un ensemble d'entités clés pour décrire le contexte expérimental, telles que « Personne », « Projet », « Expérience », « Dispositif expérimental », « Facteur expérimental », « Annotation », « Exploitation », « Parcelle », « Sol » et « Gestion technique ». Ces entités sont interconnectées par des relations définies. Les attributs et vocabulaires associés sont spécifiques au contexte vitivinicole, même si les entités appartiennent au domaine générique de l'expérimentation agricole. Des exemples de vocabulaires ont été intégrés, comme pour le "système de production" pouvant prendre les valeurs "conventionnel", "agriculture biologique" ou "biodynamique".

Ce guide a notamment inspiré le projet VITILIENCE (<https://www.vignevin.com/vitilience/le-projet/>) pour la gestion des données de son réseau de démonstrateurs.

3.2. Des vocabulaires contrôlés

Lors du projet VITIS DATA CROP, un vocabulaire des ressources génétiques de la vigne et un vocabulaire des variables expérimentales ont été implémentés dans le Centre de ressources Viti-Oeno. A terme, d'autres vocabulaires viendront enrichir et coexister dans le Centre de ressources, avec la possibilité d'explicitier les alignements entre deux ou plusieurs vocabulaires, comme c'est déjà le cas pour les différentes échelles phénologiques de la vigne (Roussey *et al.*, 2021).

Consultable sur l'interface web utilisateur, la couche API du centre permet en outre un accès automatisé à ces références.

3.2.1. Ressources génétiques (matériel végétal)

Le centre fournit une liste de 171 espèces de vigne et de 6781 variétés, issues de la Base de données du Réseau Français des Conservatoires de Vigne (RFCV). Cette base regroupe les informations du CRB Vigne de Vassal-Montpellier et du RFCV, incluant 36 partenaires régionaux impliqués dans la sauvegarde des ressources génétiques.



Une liste de 1256 clones agréés ou ayant été agréés au Catalogue Français de Clones de vigne provient de la base de données GO2 de l'IFV.

Chacune de ces ressources génétiques est identifiée par un URI, assurant une référence unique et stable. Par exemple la variété Merlot a pour URI « rfcv:variety/326 » et son clone 346 l'URI « vignevin:clone/326-346 ». Le centre offre un accès convivial à ces références, qui peuvent être utilisées pour renseigner les attributs comme la variété ou le porte-greffe dans un jeu de données et rendre ce jeu de données exploitable par des communautés larges. A titre d'exemple, ces vocabulaires ont été mobilisés dans le jeu de données utilisé comme cas d'usage par le projet (Doligez *et al.*, 2024), et sont utilisés dans le cadre de différents projets.

3.2.2. Variables agronomiques et œnologiques :

Le centre référence 354 variables agronomiques et œnologiques, issues de la Vitis Ontology (Duchêne & Pommier, 2019). Cette ontologie décrit les variables phénotypiques permettant de caractériser les traits du végétal. En particulier elle inclut la liste des descripteurs proposés par l'OIV (Organisation Internationale de la Vigne et du Vin) (OIV, 2001). Elle est utilisée dans le cadre du projet STAR (Amardeilh *et al.*, 2025).

3.3. Des ontologies

Les ontologies jouent un rôle clé dans le Web Sémantique en définissant les concepts et leurs relations, offrant ainsi une base pour l'interopérabilité des données. Le Centre de ressources Viti-Oeno recense une dizaine d'ontologies pertinentes pour le domaine de la viticulture et de l'œnologie. Ces ontologies, en complément des vocabulaires, permettent de qualifier la donnée, d'assurer sa traçabilité et son interopérabilité, et ainsi de faciliter son partage et sa réutilisation.

Des ontologies complémentaires sont en cours de développement, notamment pour décrire l'ensemble des organes de la vigne (Grapevine Anatomy Ontology) dans le cadre du projet européen COST Intergrape.

3.4. Des applications : des outils pour l'expérimentateur

Le Centre de ressources Viti-Oeno propose également une liste d'applications utiles pour les chercheurs, les expérimentateurs, les étudiants et les professionnels. Il s'agissait de répondre à la demande exprimée lors du séminaire de disposer d'outils de traitement et d'analyse des données. Au total, 5 applications sont déjà disponibles ou référencées.

Un exemple est l'application WaLIS (Water Limitation Information System), un modèle de bilan hydrique du sol développé conjointement par INRAE et l'IFV (Delpuech, 2023). WaLIS simule le bilan hydrique en prenant en compte les données météorologiques du millésime et la dynamique de prélèvement en eau de la vigne, en lien avec le type de sol. Le projet VITIS DATA CROP a permis l'adaptation de cette application pour sa mise en ligne sur le centre de ressources, permettant ainsi aux utilisateurs de réaliser des simulations, d'obtenir des affichages graphiques et d'exporter les données (Figure 2). L'accès est libre et gratuit à cette application. Ce type d'outil est utilisé régulièrement en saison par des techniciens ou étudiants pour suivre l'évolution de la contrainte hydrique sur leurs vignobles.

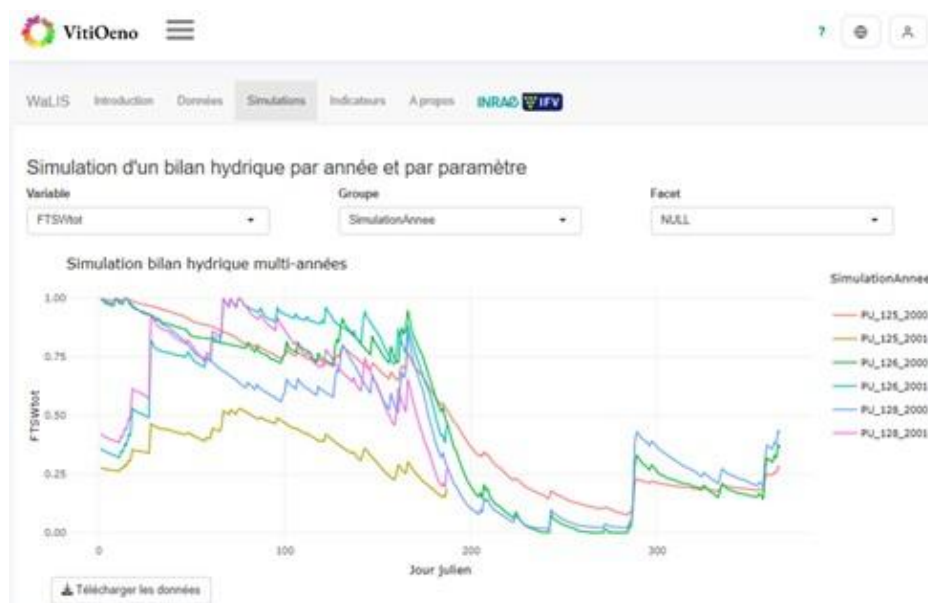


Figure 2 : Capture d'écran de l'application WaLIS sur le centre de ressources Viti-Oeno.

Description de la figure

Cette figure est une capture d'écran issue de l'application WaLIS. Elle illustre les dynamiques d'évolution de la teneur en eau du sol au cours du temps pour différentes simulations réalisées avec le modèle de bilan hydrique WaLIS. Les simulations sont représentées sous forme de courbes pour chaque année et situations de simulation. Des menus déroulants permettent à l'utilisateur de choisir la variable et les groupes à représenter sur le graphique.

3.5. Des liens utiles : vers des ressources externes interopérables

Enfin, la plateforme référence une dizaine de liens vers des ressources numériques externes jugées interopérables et pertinentes pour la communauté. Cette section vise à enrichir l'écosystème de données et d'outils disponibles pour les acteurs de la filière.

3.6. Accès API (Application Programming Interface) Web : interopérabilité machine-machine

Pour garantir une véritable interopérabilité des données, le Centre de ressources Viti-Oeno intègre une API Web. Cette API permet à des systèmes informatiques de requêter et d'échanger des informations avec le centre, facilitant ainsi les communications machine-machine. L'API implémente la version 1.2 de BrAPI (Breeding API), une spécification d'API standardisée pour la communication de données sur la sélection végétale (Selby *et al.*, 2019). BrAPI est un standard international qui vise à faciliter l'échange de données entre différentes plateformes de phénotypage et de sélection, renforçant ainsi la capacité du Centre de ressources Viti-Oeno à s'intégrer dans des infrastructures de données plus larges.

4. Discussion et Conclusion

Le Centre de ressources Viti-Oeno centralise, structure et rend accessibles des ressources numériques utiles à la communauté technique et scientifique en viticulture et œnologie. Ses ressources facilitent l'alignement sémantique et l'interopérabilité des données, afin d'éviter l'apparition de silos de données non-interopérables. La démarche de co-construction, à travers des séminaires et ateliers participatifs, a permis de proposer des contenus adaptés aux besoins des utilisateurs.

L'élaboration du « Guide pour la description d'une expérimentation en vigne » est un exemple concret de cette démarche. En définissant un ensemble structuré de métadonnées et de vocabulaires contrôlés,



il fournit un cadre standardisé pour la caractérisation des contextes expérimentaux. L'observation que les standards internationaux existants étaient peu adoptés par la communauté française souligne la pertinence d'une approche ancrée dans le contexte national, tout en restant compatible avec les grandes lignes directrices des standards internationaux.

Cependant, des défis persistent. L'un des principaux est le coût d'apprentissage et de mise en œuvre des standards pour les expérimentateurs. Les équipes, souvent sous pression de temps et de ressources, peuvent être réticentes à adopter de nouvelles pratiques. Pour lever ces freins, il est nécessaire de fournir des outils simples, intuitifs et facilement utilisables. Des supports tels que des modèles Excel standardisés (comme celui accompagnant le guide), des guides d'utilisation, tutoriels et des applications pour l'analyse et la visualisation des données sont nécessaires pour surmonter les réticences et maximiser l'adoption des bonnes pratiques. Le succès de cette appropriation repose aussi sur la démonstration de la valeur ajoutée concrète de ces outils, notamment en termes de gains de temps et de qualité des données pour l'analyse.

Les perspectives pour le Centre de ressources Viti-Oeno et l'ensemble des livrables de VITIS DATA CROP sont nombreuses. L'objectif est d'enrichir continuellement le contenu du centre, notamment en étendant les vocabulaires à d'autres domaines comme l'œnologie, la vinification et l'analyse sensorielle. Cet enrichissement s'appuie notamment sur de nouveaux projets, tels que le projet STAR (Amardeilh *et al.*, 2025). STAR s'appuie sur les acquis de VITIS DATA CROP pour renforcer et enrichir le centre et l'animation autour de l'interopérabilité des données, en élargissant la thématique aux biosolutions. L'animation d'une communauté active d'expérimentateurs et de professionnels autour de cette plateforme est essentielle pour sa pérennité et son développement. En particulier, un effort de communication vers les professionnels (fournisseurs de services mais aussi grand groupes producteurs) doit être réalisé. À terme, une internationalisation des standards et des ressources, notamment via des organisations comme OIV, pourrait renforcer l'impact de ce travail au-delà des frontières nationales.

En conclusion, le projet VITIS DATA CROP a permis d'enclencher une dynamique collective en sensibilisant et acculturant les expérimentateurs aux enjeux de l'interopérabilité des données. En proposant des outils concrets et des référentiels partagés, il jette les bases d'une gestion de données plus efficiente et collaborative dans la communauté technique et scientifique vigne et vin. Les efforts de développement d'outils, de formation et d'animation doivent néanmoins se poursuivre pour favoriser l'adoption de la démarche. *In fine*, une meilleure gestion des données permettra non seulement de répondre aux exigences des financeurs, mais aussi de fournir des données de meilleure qualité pour des analyses avancées (méta-analyses, IA), rendant la recherche plus efficiente et le secteur viticole plus résilient.

Ethique

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.

ORCID des auteurs

Xavier Delpuech <https://orcid.org/0000-0001-7278-3209>.

Arnaud Charleroy <https://orcid.org/0009-0009-7575-3617>

Pascal Neveu <https://orcid.org/0000-0003-4189-7793>



Contributions des auteurs

Conceptualisation, rédaction, révision et correction : Xavier Delpuech, Arnaud Charleroy et Pascal Neveu

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

Le centre de ressources est alimenté par le travail d'une communauté scientifique et technique riche et diverse, que nous remercions pour son implication et ses contributions, et en particulier : Eric Duchêne (Inrae), Cyril Pommier (Inrae), Thierry Lacombe (Institut Agro Montpellier), Catherine Roussey (Inrae), Nathalie Ollat (Inrae), Joseph Tran (Inrae), Vincent Dumas (Inrae), Jean-Yves Cahurel (IFV), Laure Gontier (IFV), Marion Claverie (IFV), Viviane Bécart (Institut Rhodanien), Romain Lacroix (Institut Rhodanien).

Déclaration de soutien financier

Ce travail a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation avec la contribution financière du Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural (CASDAR).

Références bibliographiques

- Amardeilh, F., Charleroy, A., Darnala, B., Delpuech, X., Roussey, C., & Salvi, F. (2025). Standardiser les données expérimentales pour faciliter l'innovation dans le domaine des bio solutions : Le projet CASDAR STAR. 8ème édition de l'Atelier INTégration de sources/masses de données hétérogènes et Ontologies, dans le domaine des sciences du VIVant et de l'Environnement (IN-OVIVE), adossé à la conférence Ingénierie des Connaissances @PFIA, 5p. <https://hal.inrae.fr/hal-05074927>
- Charleroy, A., Delpuech, X., & Neveu, P. (2023). Vitioeno, un centre de ressources numériques pour la production de données scientifiques FAIR. 44. *World Congress of Vine and Wine*, 68, 01030. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236801030>
- Delpuech, X. (2023, juin 21). *Une application R Shiny pour la simulation du bilan hydrique des sols viticoles (modèle WaLIS)* [Poster]. Rencontres R 2023. <https://rr2023.sciencesconf.org/464908>
- Dolet, M.-A., Paire, C., Cheriet, F., Geffroy, O., Le Fur, Y., Hannin, H., Samson, A., Caillé, S., Nougarede, S., Olivier, V., & Chervin, C. (2024). Resumption of the planting of grapevine varieties in France, referred to as « disease-resistant » : Original language of the article: English. *IVES Technical Reviews, vine and wine*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2024.8261>
- Doligez, A., Brault, C., & Bécart, V. (2024). *Phenotypic data of a grapevine bi-parental progeny for three experiments* (Version V1) [Jeu de données]. Recherche Data Gouv. <https://doi.org/10.57745/5QQTTN>
- Duchêne, E., & Pommier, C. (2019, mars). The Vitis Ontology: Sustainable and FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) for consistent and complete data description through biologist friendly ontologies. *The First Annual Meeting of COST Action CA17111 INTEGRAPPE 2019*. <https://hal.inrae.fr/hal-02947459>
- Dumas, V., Alletru, D., Bernard, A., Bernier, F., Bertin, P., Bodineau, G., Burger, P., Falchetto, L., & Jacques-Gustave, A. (2016). Adonis, un outil INRA d'acquisition de données. Premier bilan de son déploiement. *NOV'AE-Ingénierie et savoir-faire innovants*, (spécial Cahier des techniques), 138-147.
- Miclot, A.-S., Guimier, S., Delmotte, F., Fabre, F., I., M., Couture, C., & Deliere, L. (2019). Sustainable management of grapevine resistance. Detect the emergence of breakdown, of new diseases and adapt crop systems. *Innovations Agronomiques*, 77, 19-30. <https://doi.org/10.15454/8bbz-t493>



Neveu, P., Tireau, A., Hilgert, N., Nègre, V., Mineau-Cesari, J., Brichet, N., Chapuis, R., Sanchez, I., Pommier, C., Charnomordic, B., & others. (2019). Dealing with multi-source and multi-scale information in plant phenomics: The ontology-driven Phenotyping Hybrid Information System. *New Phytologist*, 221(1), 588-601.

OIV. (2001, avril 3). *2nd édition de la liste des descripteurs OIV pour les variétés et espèces de Vitis*. OIV.

Roussey, C., Delpuech, X., Raynal, M., Amardeilh, F., Bernard, S., Jonquet, C., & Noûs, C. (2021). Description sémantique des stades de développement phénologique des plantes, cas d'étude de la vigne. In M. Lefrançois (Ed.), *32èmes Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC 2021)* (p. 30-38). <https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-03260085>

Sansone, S.-A., Rocca-Serra, P., Field, D., Maguire, E., Taylor, C., Hofmann, O., Fang, H., Neumann, S., Tong, W., Amaral-Zettler, L., & others. (2012). Toward interoperable bioscience data. *Nature genetics*, 44(2), 121-126.

Selby, P., Abbeloos, R., Backlund, J. E., Basterrechea Salido, M., Bauchet, G., Benites-Alfaro, O. E., Birkett, C., Calaminos, V. C., Carceller, P., Cornut, G., Vasques Costa, B., Edwards, J. D., Finkers, R., Yanxin Gao, S., Ghaffar, M., Glaser, P., Guignon, V., Hok, P., Kilian, A., ... The BrAPI consortium. (2019). BrAPI—an application programming interface for plant breeding applications. *Bioinformatics*, 35(20), 4147-4155. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz190>

White, J. W., Hunt, L., Boote, K. J., Jones, J. W., Koo, J., Kim, S., Porter, C. H., Wilkens, P. W., & Hoogenboom, G. (2013). Integrated description of agricultural field experiments and production : The ICASA Version 2.0 data standards. *Computers and electronics in agriculture*, 96, 1-12.

Pour citer cet article : Xavier DELPUECH, Arnaud CHARLEROY & Pascal NEVEU, 2026 - Un centre de ressources numériques pour faciliter le partage et l'interopérabilité des données expérimentales dans la filière viticulture – œnologie. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art13>



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.



Détection des insectes ravageurs des grains dans les céréales :

1. Le potentiel de l'imagerie hyperspectrale

Marlène FAURE¹, Ryad BENDOULA², Faten AMMARI¹, Séverine MAUDEMAIN¹, Katell CREPON¹

¹ ARVALIS, Station expérimentale, Route de Malesherbes, 91720 BOIGNEVILLE

² ITAP – INRAE & Institut Agro Montpellier, 34060 Montpellier, France

Correspondance : m.faure@arvalis.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art14>

Résumé

La présence d'insectes dans les lots commercialisés est économiquement pénalisante pour les opérateurs. La détection rapide de la présence d'insectes présente un intérêt majeur. Le potentiel de l'imagerie hyperspectrale a été testé pour quantifier des adultes vivants ou morts et des larves de *Sitophilus. oryzae*, *Rhyzoperta. dominica* et *Tribolium. castaneum* dans des échantillons de blé et d'orge. Les erreurs de prédictions varient entre 0,7 et 3,96 insectes/kg pour les adultes vivants et sont supérieures à 5 insectes/kg pour les adultes morts. Pour les larves, les performances sont moins bonnes et variables selon les espèces : de 6,93 (*S. oryzae*) à 67,36 larves/kg (*R. dominica*). Un travail spécifique effectué sur des images d'insectes morts et vivants a montré une distinction possible avec une précision supérieure à 88 % pour les trois espèces.

Mots-clés : blé tendre, orge, *Sitophilus oryzae*, *Tribolium castaneum*, *Rhyzoperta dominica*, imagerie hyperspectrale

Abstract: Detection of grain pests in cereals: 1. The potential of hyperspectral imaging (HSI)

The presence of insects in commercial batches is economically detrimental to operators. Rapid detection of insects is therefore of major interest. The potential of the IHS has been tested to quantify live or dead adults and larvae of *S. oryzae*, *R. Dominica* and *T. castaneum* in wheat and barley samples. Prediction errors (SEP) range from 0.7 to 3.96 insects/kg for live adults and are greater than 5 insects/kg for dead adults. For larvae, performance is poorer and varies depending on the species: from 6.93 (*S. oryzae*) to 67.36 larvae/kg (*R. dominica*). Specific work carried out on images of dead and live insects shows a possible distinction with an accuracy of over 88 % for the three species.

Keywords: cereals, grain insects, detection, hyperspectral imaging

1. Introduction

La présence d'insectes ravageurs des grains dans les céréales est une préoccupation constante des opérateurs de stockage et de commercialisation des céréales, en France comme sur tous les continents. Les pertes quantitatives de récoltes pendant la phase de stockage font l'objet d'estimations très variables, et parfois contestées (Grolleaud, 2002 ; Kumar, 2017), en fonction des zones de stockage et de la technicité des opérateurs. Si les pertes en cours de stockage peuvent dépasser les 10 % dans les pays tropicaux ou subtropicaux (Gustavsson, 2011), dans les pays à climat tempéré, les pertes quantitatives sont faibles et l'impact des infestations est d'ordre qualitatif, en raison du rejet des marchandises contenant des insectes, quelle que soit leur forme et leur nombre (Codex Alimentarius, 1995).

La présence d'insectes ravageurs des grains dans les céréales stockées en Europe est documentée (Stejskal, 2015) et la proportion d'échantillons et/ou de silos infestés tend à s'accroître depuis les



premières données publiées. Par ailleurs, certaines espèces, comme le charançon des grains (*Sitophilus granarius*) refluent alors que d'autres, comme le capucin des grains (*Rhyzopertha dominica*) ou le charançon du riz (*Sitophilus oryzae*), classiquement considérées comme des espèces tropicales, sont plus fréquentes. Les travaux réalisés en France livrent des résultats similaires : une augmentation du nombre de lots infestés par au moins un insecte ravageur des grains (40 % en 2011 vs 73 % en 2025), une diminution relative de la présence de *S. granarius* et une augmentation de celle de *R. dominica* (Fleurat-Lessard, 1980 ; Leblanc *et al.*, 2014 ; Cabacos, 2025). Les hypothèses avancées pour expliquer ces évolutions d'espèces et l'augmentation globale des infestations sont d'ordre logistique (les insectes se disséminent principalement via les échanges de grains), technique (l'utilisation importante d'insecticides organophosphorés pourraient avoir « favorisé » *R. dominica*, plus résistant que *Sitophilus* à cette famille d'insecticides) ou climatique (le réchauffement favorise les espèces dites tropicales comme *R. dominica* ou *S. Oryzae*) (Adler *et al.*, 2022).

Face à cette augmentation du risque, la surveillance directe des infestations par piégeage ou détection par tamisage d'un échantillon est une nécessité pour mettre en place une lutte raisonnée contre ces ravageurs et maîtriser les infestations (Phillips & Throne, 2010). Le piégeage est la méthode de référence pour la surveillance des infestations des céréales stockées, mais ne peut être mis en œuvre que sur des lots stockés pendant plusieurs mois. Les pièges sont en effet dépourvus d'attractifs et les captures ne dépendent que des mouvements des insectes dans le grain. Un piégeage long augmente considérablement les chances de détecter une présence d'insectes dans le lot. De ce fait, le piégeage n'est pas adapté aux sites d'expédition et a fortiori aux sites portuaires dans lesquels les mouvements de grains sont nombreux et la durée de stockage courte. Ce fonctionnement rend ces sites particulièrement vulnérables aux infestations car le risque de contamination par un apport extérieur est grand alors que leur capacité à mettre en place une lutte curative est faible. Pour ces sites, la maîtrise des infestations va essentiellement reposer sur la détection et l'éviction, l'allotement ou le traitement des lots fortement contaminés à l'entrée du silo. Les méthodes actuellement mises en œuvre pour détecter les insectes à l'entrée des silos portuaires reposent sur un échantillonnage et une détection par tamisage. Ces méthodes ne permettent de détecter que de fortes infestations du fait de la faible quantité analysée (Jian *et al.*, 2014) en forme libre externe au grain, les larves dans les grains étant par nature indétectable visuellement. Or, si le risque de développement exponentiel est relativement limité sur les sites portuaires, en raison de durée de stockage courte, le risque financier est élevé car, en cas de détection d'insectes à l'expédition, le lot sera jugé non conforme, les contrats stipulant l'absence d'insectes vivants. C'est pourquoi la détection à réception des infestations même à des niveaux faibles est indispensable pour maîtriser le risque insectes dans les installations portuaires.

L'imagerie hyperspectrale (IHS) est une technique d'analyse non destructive combinant une analyse spatiale et une analyse spectrale. Peu d'études ont été conduites jusqu'à présent sur la détection des insectes par IHS dans les céréales. Singh *et al.* (2009) et Singh *et al.* (2010) ont démontré le potentiel de l'IHS proche infrarouge pour la détection des grains de blé endommagés par les insectes. Ridgway *et al.* (1998) ont également utilisé cette technologie pour détecter les infestations internes dans des grains de blé. Malgré le potentiel avéré de l'IHS, des recherches très limitées ont été rapportées, jusqu'à présent, sur les modèles de prédiction quantitative pour les céréales (Caporaso *et al.*, 2018). Dans notre cas d'étude, l'IHS présente l'intérêt, par rapport aux techniques de détection actuelle, de pouvoir être utilisée sur flux, et donc sur un échantillon de grande taille, réduisant ainsi l'erreur de prédiction liée à l'échantillonnage. Par ailleurs, contrairement au tamisage simple, elle pourrait également permettre de détecter les infestations encore au stade larvaire, cachées dans les grains, ce qui renforce considérablement la gestion du risque par les opérateurs.

L'objectif de ce projet est d'évaluer le potentiel de l'IHS pour détecter précocement des infestations faibles, y compris les formes larvaires à l'intérieur des grains, du blé et de l'orge par des insectes ravageurs des grains, sur des échantillons de grande taille (supérieure 1 kg) contrairement aux précédentes études dont les analyses ont été effectuées grain à grain (Singh *et al.*, 2010 ; Ridgway *et*



al., 1998). Les espèces choisies pour l'étude sont *S. oryzae*, *R. dominica* (ces deux espèces ayant des larves à l'intérieur des grains) et *T. castaneum*, du fait de leur présence avérée dans les céréales stockées en France. Outre la capacité de l'IHS à identifier et dénombrer la présence d'insectes, nous nous sommes attachés à déterminer la possibilité de distinguer les adultes morts (qui ne présentent pas de risque pour le lot) des adultes vivants dont la présence est refusée, et à vérifier l'adaptabilité de la technique aux installations de stockage, notamment concernant l'impact de la vitesse des tapis de manutention des grains sur la qualité de l'analyse par IHS.

2. Matériels et méthodes

2.1. Elevage d'insectes et tri des grains infestés

S. oryzae, *R. dominica* et *T. castaneum* utilisés pour constituer la base d'échantillons sont issus d'élevages réalisés à ARVALIS. Après avoir été élevés dans des lots de blé, les insectes adultes de *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum* et les formes larvaires de *T. castaneum* (externes aux grains) sont extraits des grains à l'aide de tamis à insectes à maille carré de 2 mm puis les morts sont extraits manuellement.

Pour obtenir une centaine de grains infestés par des larves de *S. oryzae* et *R. dominica*, du grain ayant servi à l'élevage de ces espèces a été récupéré. La séparation entre les grains sains et les grains infestés ou vides a été effectuée en exploitant leur différence de densité dans l'eau. Les grains infestés ou vides restent à la surface de l'eau alors que les grains sains coulent. Les grains surnageants ont été visuellement inspectés un à un afin d'éliminer les grains vides (après émergence d'un insecte) et de garder uniquement des grains contenant potentiellement une larve. Chaque grain possiblement infesté a ensuite été identifié en le plaçant dans un tube dont la position sur le portoir est connue (Figure 1) puis analysé par IHS (Figure 2). Afin de s'assurer de la présence de larves dans les grains, le portoir avec les tubes a été mis en incubation à 25°C et 70 % d'humidité relative pour que les larves puissent continuer leur cycle. Deux observations réalisées à 21 jours puis 46 jours après mise en incubation permettent de déterminer précisément quel grain était infesté. Après 46 jours d'incubation, les grains pour lesquels aucune émergence n'a été constatée ont été coupés afin de s'assurer de l'absence de larve à l'intérieur. Ces opérations ont été conduites sur blé et orge.

Afin de constituer une base d'échantillons avec différents niveaux d'infestations par des larves de *S. oryzae* et *R. dominica*, une plus grande quantité de grains infestés (plusieurs milliers) était nécessaire. La séparation des grains évidés des grains infestés par examen visuel n'était plus envisageable. Du grain issu d'élevage, et duquel les insectes adultes ont été extraits par tamisage, est d'abord trié par différence de densité dans l'eau pour en extraire les grains surnageants. Un échantillon d'une centaine de grains surnageants, supposés infestés, a été prélevé et la proportion de grains réellement infestés dans l'échantillon a été déterminée par dissection des grains. Le taux de grains infestés ainsi déterminé a permis de corriger le nombre de grains à mettre dans l'échantillon de grains sains pour atteindre la densité d'infestation en formes larvaires souhaitée. Par exemple, si le taux de grains infestés par une larve est déterminé à 68 % sur la base de l'échantillonnage, il faudra mettre 15 grains dans 1 kg pour atteindre la densité souhaitée de 10 larves par kg. Après analyse IHS, le niveau d'infestation des échantillons ainsi créés a été contrôlé a posteriori en plaçant l'échantillon infesté en incubation (25°C, 70 % d'HR) et en comptant le nombre d'adultes ayant émergé après 46 jours.

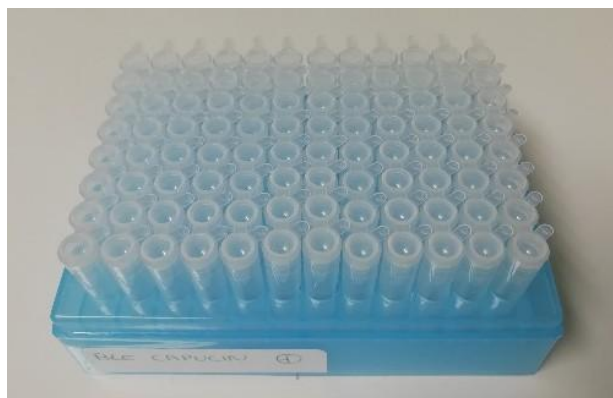


Figure 1 : Portoir avec les tubes contenant les grains probablement infestés par des larves, ARVALIS

Description de la figure

La photo représente un portoir de 8 lignes et 12 colonnes de tubes. Chaque tube contient un grain probablement infesté par une larve.

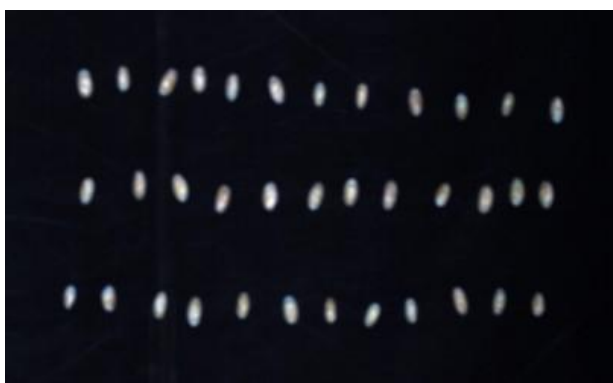


Figure 2 : Exemple d'image obtenue avec acquisition hyperspectrale de grains probablement infestés par des larves

Description de la figure

L'image représente 3 lignes de 12 grains de blé qui sont probablement infestés par des larves.

2.2. Création de la base d'échantillons

Afin de construire les modèles de détection et de quantification des insectes, il est nécessaire d'avoir des spectres propres à chaque modalité, c'est-à-dire à chaque combinaison céréale/espèce d'insectes/forme d'insectes (adultes vivants, adultes morts et larves). Des échantillons ont donc été créés spécifiquement. Pour chaque espèce d'insectes, 100 adultes vivants ont été analysés avec la caméra hyperspectrale puis placés au congélateur, permettant ainsi d'obtenir des images d'insectes morts. Des larves de *T. castaneum* ont été extraites de l'élevage et analysées avec l'appareil d'IHS. Concernant les espèces ayant des larves à l'intérieur des grains, en suivant la méthode expliquée en 2.1, des grains contenant probablement des larves ont été déterminés pour le blé et l'orge (blé : 104 grains pour *S. oryzae* et 309 grains pour *R. dominica*, orge : 132 grains pour *S. oryzae* et 93 grains pour *R. dominica*). Ces grains, identifiés individuellement, ont été analysés avec la caméra hyperspectrale. Il en résulte une base d'échantillons composée de 95 grains de blé et 34 grains d'orge contenant des larves de *S. oryzae* et de 286 grains de blé et 88 grains d'orge contenant des larves de *R. dominica*. De plus, des impuretés ont été extraites des échantillons de blé et d'orge (pailles, enveloppe de blé, graines étrangères...) afin d'être analysées avec l'appareil d'IHS.



Afin de tester la quantification des insectes, pour chaque modalité (céréale/espèce d'insectes/forme d'insectes), 72 échantillons ont été préparés correspondant à trois réplicas de 24 niveaux d'infestations. Pour les formes adultes, les 24 niveaux d'infestations sont les suivants : 1 insecte/5 kg, 1 insecte/4,5 kg, 1 insecte/4 kg, 1 insecte/3,5 kg, 1 insecte/3kg, 1 insecte/2,5 kg, 1 insecte/2 kg, 1 insecte/1,5 kg et de 0 à 15 insectes/kg par pas de 1 insecte. Pour les formes larvaires, les niveaux d'infestation ont été multipliés par 10. Chaque réplica a été considéré comme un échantillon individuel lors du test des modèles de quantification.

Les grains utilisés (blé et orge) pour la constitution des échantillons proviennent de la ferme de Boigneville (récolte 2022).

2.3. Appareil d'IHS et acquisition des images

L'ensemble des échantillons a été analysé avec la caméra hyperspectrale proche infrarouge SPECIM FX17 (SPECIM, Oulu, Finlande) couvrant une gamme spectrale allant de 900 à 1700nm. Les résolutions spectrale et spatiale sont respectivement d'environ 8 nm (224 bandes) et de 640 pixels. Le mode d'acquisition de la caméra étant linéaire, un convoyeur a été utilisé pour déplacer l'échantillon sous la caméra à une vitesse de 0.1 m/s et ainsi former l'image hyperspectrale. Un distributeur, placé au début du convoyeur, permet par vibration de distribuer les grains sur le tapis en monocouche. Deux rampes de lampes halogènes ont été fixées de chaque côté de la caméra de façon à assurer une intensité lumineuse uniforme sur toute la zone de mesure.

Afin d'évaluer l'impact de la vitesse du convoyeur sur la détection et la quantification des insectes, les échantillons correspondant à l'espèce *S. oryzae* adulte vivant dans le blé ont été également analysés avec une vitesse de tapis de 0.7 m/s.

2.4. Traitement des données

Matlab R2019a (The MathWorks Inc., Natick, USA) a été utilisé pour le traitement des données hyperspectrales. Pour toutes les images acquises, les pixels correspondant au tapis ont été supprimés en appliquant un seuil à la 75ème bande spectrale (1193 nm).

2.4.1. Distinctions des insectes adultes vivants et des insectes adultes morts

Des spectres d'insectes adultes vivants et morts ont été récupérés à partir des images hyperspectrales correspondantes et après suppression des pixels de tapis.

Dans un premier temps, une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée. Avant l'application de l'ACP, les spectres ont été préalablement lissés avec un filtre de Savitzky-Golay d'ordre 2 sur une fenêtre de 7 puis prétraité avec la méthode Standard Normal Variate (SNV) (Barnes *et al.*, 1989). La visualisation des données selon les premières composantes principales permet de voir rapidement si les insectes adultes vivants et morts forment des clusters.

Dans un second temps, pour chaque espèce d'insectes, un modèle de classification Support Vector Machine (SVM) a été développé pour essayer de distinguer les spectres d'adultes vivants et les spectres d'adultes morts. Le modèle a été construit à partir d'une base d'apprentissage comprenant 2/3 des données et une base de validation comprenant le tiers restant. La répartition des données a été faite en utilisant l'algorithme Duplex.

2.4.2. Détection et quantification des insectes

Les images hyperspectrales ont été traitées en 3 étapes résumées dans la figure 3.

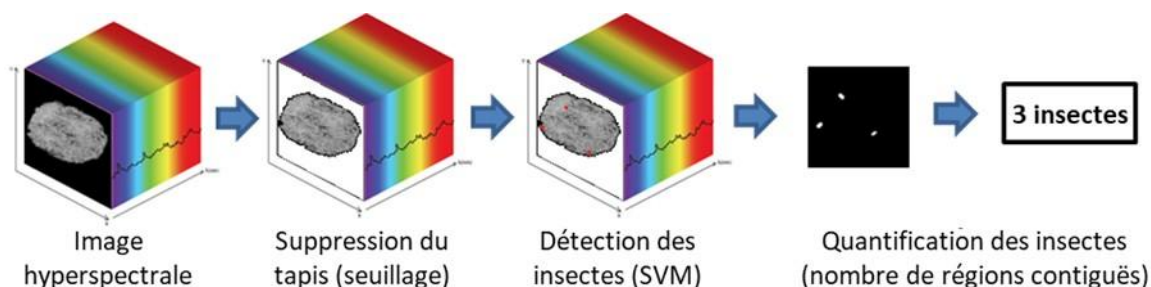


Figure 3 : Résumé de l'approche utilisée pour traiter les images hyperspectrales

Description de la figure

La figure illustre les 4 étapes de traitement des données :

- étape 1 : un cube hyperspectrale est visible correspondant à l'acquisition de grain sur un fond noir correspondant au tapis. Sous le cube, il est écrit : « Image hyperspectrale » ;
- étape 2 : le même cube hyperspectrale qu'à l'étape 1 mais avec un fond blanc pour illustrer la suppression du tapis. Sous le cube, il est écrit : « Suppression du tapis (seuillage) » ;
- étape 3 : le même cube hyperspectrale qu'à l'étape 2 mais avec 3 points rouges sur les grains représentant les insectes détectés. Sous le cube, il est écrit : « Détection des insectes (SVM) » ;
- étape 4 : image 2D binaire avec en noir le fond et en blanc les 3 zones de pixels correspondant aux insectes. De l'image binaire, il est en déduit que le nombre d'insectes est égal à 3. Sous l'illustration, il est écrit : « Quantification des insectes (nombre de régions contiguës) ».

La première étape est de supprimer les pixels de tapis afin de garder uniquement les pixels d'intérêt.

Après avoir supprimé l'arrière-plan, l'information spectrale est utilisée pour détecter les insectes. Pour chaque modalité, à partir des images hyperspectrales correspondantes à une espèce de céréale ou à une espèce d'insecte, un modèle de classification SVM a été construit pour classer les pixels restants comme grains ou insectes. Comme des impuretés sont souvent présentes dans les échantillons d'orge ou de blé, des spectres d'impuretés ont été ajoutés à la classe grains pour améliorer les performances de classification. Pour chaque modalité, le modèle a été construit à partir d'une base d'apprentissage comprenant 2/3 des données et une base de validation comprenant le tiers restant.

Différentes combinaisons de prétraitements mathématiques ont été testées afin de réduire les effets multiplicatifs et additifs, ainsi que la sélection des longueurs d'ondes les plus discriminantes avec la méthode SVM Recursive Feature Elimination (SVM-RFE, Yan K. *et al.*, 2015). SVM-RFE classe les longueurs d'onde de la moins discriminante à la plus discriminante en utilisant des critères dérivés des coefficients des modèles SVM.

Dans la dernière étape, l'information spatiale est utilisée pour quantifier les insectes. A partir des résultats du modèle de classification, une image binaire 2D a été créée : 0 pour les pixels labellisés tapis ou grain et 1 pour les pixels labellisés insecte. Pour quantifier le nombre final d'insectes dans l'échantillon, le nombre de régions contiguës dans l'image binaire 2D correspondante a été calculé.

Pour chaque modalité, le traitement des données IHS a été testé sur les images des échantillons avec les différents niveaux d'infestations. Pour chaque image d'échantillon, le nombre d'insectes quantifié par IHS a été comparé au nombre d'insectes introduits manuellement dans l'échantillon lors de la préparation. L'erreur standard de prédiction (SEP) a ainsi pu être calculée.

2.4.3. Impact de la vitesse du convoyeur

Le traitement des données IHS correspondant à la modalité *S. oryzae* /adulte vivant/blé a été réalisé pour les deux vitesses de convoyeur testées. Ainsi il est possible de comparer les résultats de quantification et les erreurs standard de prédiction afin d'évaluer l'impact de la vitesse.

3. Résultats

3.1. Distinctions des insectes adultes vivants et des insectes adultes morts

La visualisation des spectres selon la première et la deuxième composante de l'ACP est représentée sur la figure 4 pour chaque espèce d'insecte.

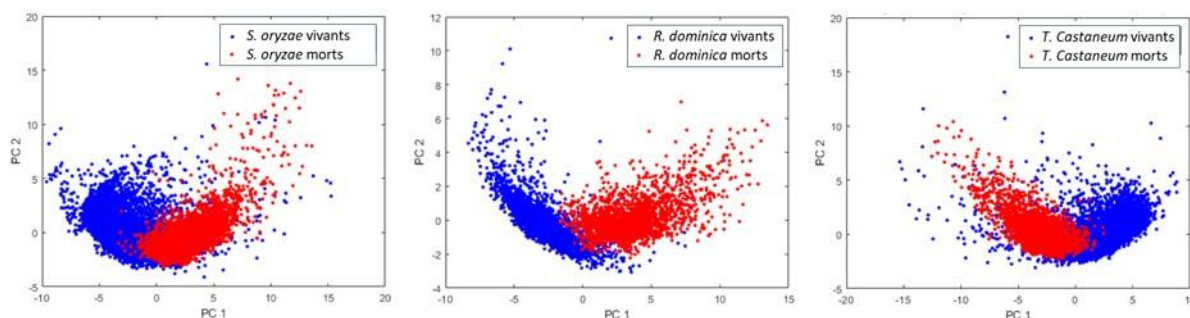


Figure 4 : Visualisation des spectres d'insectes adultes vivant (en bleu) et d'insectes adultes morts (en rouge) selon les deux premières composantes de l'ACP pour les 3 espèces étudiées : *S. oryzae* (à gauche), *R. dominica* (au milieu) et *T. castaneum* (à droite).

Description de la figure

La figure comporte trois graphiques (un par espèce d'insecte). Chaque graphique correspond à la projection sur deux axes des spectres des insectes vivants ou morts. Pour les graphiques correspondant à *S. oryzae* et *T. castaneum*, les nuages de points se chevauchent. Pour le graphique correspondant à *R. dominica*, les deux nuages de points sont distincts.

Pour les espèces *S. oryzae* et *T. castaneum*, les spectres d'adultes vivants et d'adultes morts ne forment pas de clusters. L'ACP ne permet pas de mettre en avant une distinction possible entre les morts et les vivants. En revanche, pour l'espèce *R. dominica*, deux clusters sont visibles. Il paraît possible de distinguer les spectres d'adultes vivants et d'adultes morts.

Les résultats des modèles de classification adultes vivants vs adultes morts sont représentés dans les tableaux 1, 2 et 3, sous forme de matrices de confusion.

Tableau 1 : Matrice de confusion obtenue après application du modèle de classification vivant vs mort pour l'espèce d'insectes *S. oryzae*

<i>S. ORYZAE</i>		Modèle de classification	
		VIVANTS	MORTS
Référence	VIVANTS	1274	148
	MORTS	178	1244

Tableau 2 : Matrice de confusion obtenue après application du modèle de classification vivant vs mort pour l'espèce d'insectes *R. dominica*

<i>R. DOMINICA</i>		Modèle de classification	
		VIVANTS	MORTS
Référence	VIVANTS	715	7
	MORTS	3	719



Tableau 3 : Matrice de confusion obtenue après application du modèle de classification vivant vs mort pour l'espèce d'insectes *T. castaneum*

<i>T. CASTANEUM</i>		Modèle de classification	
		VIVANTS	MORTS
Référence	VIVANTS	1444	26
	MORTS	14	1456

Respectivement pour les espèces *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*, 88,5 %, 99,3 % et 98,6 % des spectres sont bien classés.

3.2. Détection et quantification des insectes

Les performances de quantification des insectes dans le blé par IHS sont présentées dans le tableau 4. La valeur de SEP des adultes vivants de *S. oryzae* (0,7 insectes/kg) est plus faible que celles de *R. dominica* (1,57 insectes/kg) et *T. castaneum* (1,81 insectes/kg). Pour les adultes morts, les valeurs de SEP sont plus élevées que pour les adultes vivants mais sont similaires entre les espèces (5,01, 5,88 et 5,31 insectes/kg respectivement pour *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*). Concernant les formes larvaires, qu'elles soient internes aux grains ou externes, les performances sont moins bonnes que pour les insectes adultes. La valeur de SEP est particulièrement élevée pour *R. dominica* (67,35 larves/kg), alors que les SEP de *S. oryzae* et *T. castaneum* sont plus faibles (respectivement 6,93 larves/kg et 11,70 larves/kg).

Tableau 4 : Performances de la quantification des insectes dans le blé par IHS pour les espèces *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*, aux stades adultes vivants, adultes morts et formes larvaires.

BLE	ESPECE D'INSECTES		
	<i>S. oryzae</i>	<i>R. dominica</i>	<i>T. castaneum</i>
ADULTES VIVANTS			
SEP (insectes/kg)	0,7	1,57	1,81
ADULTES MORTS			
SEP (insectes/kg)	5,01	5,88	5,31
LARVES			
SEP (insectes/kg)	6,93	67,35	11,70

Pour l'orge, les performances de quantification par IHS sont globalement plus élevées que pour le blé (tableau 5). Les valeurs de SEP pour les adultes vivants varient de 1,22 à 3,96 insectes/kg suivant les espèces d'insectes. Comme pour le blé, les valeurs de SEP sont plus élevées pour les adultes morts que pour les adultes vivants. Concernant les formes larvaires, les performances de quantification ne sont pas satisfaisantes avec des valeurs de SEP élevées.

Tableau 5 : Performances de la quantification des insectes dans l'orge par IHS pour les espèces *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*, aux stades adultes vivants, adultes morts et formes larvaires.

ORGE	ESPECE D'INSECTES		
	<i>S. oryzae</i>	<i>R. dominica</i>	<i>T. castaneum</i>
ADULTES VIVANTS			
SEP (insectes/kg)	1,22	3,96	2,89
ADULTES MORTS			
SEP (insectes/kg)	6,32	4,9	6,16
LARVES			
SEP (insectes/kg)	39,80	Pas d'acquisitions	21,28

3.3. Impact de la vitesse du convoyeur

Les performances de la quantification du nombre d'adultes vivants de *S. oryzae* dans le blé, présentées précédemment sont obtenues avec une vitesse de 0.1 m/s. Les résultats de la quantification du nombre d'adultes vivants de *S. oryzae* dans le blé, avec une vitesse plus élevée (0,7 m/s), sont présentés en figure 5. Les *S. oryzae* sont soit non détectés soit sur-quantifiés.

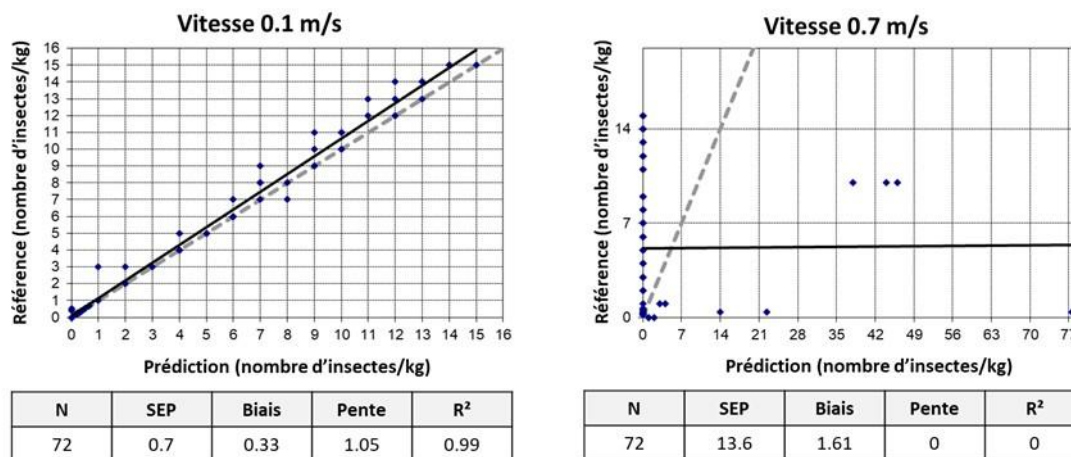


Figure 5 : Performances de quantification des insectes pour la modalité *S. oryzae*/adulte vivant/blé avec une vitesse de convoyeur de 0,1 m/s (à gauche) et une vitesse de 0,7 m/s (à droite)

Description de la figure

La figure montre une forte corrélation entre les prédictions (nombre d'insectes/kg) et les références (nombre d'insectes/kg) avec une vitesse de convoyeur de 0,1 m/s. Pour une vitesse de 0,7 m/s, la figure montre qu'il n'y a pas de corrélation entre les prédictions et les références.

4. Discussion

Les incertitudes obtenues pour la quantification des insectes par IHS doivent être appréciées au regard des incertitudes observées avec les méthodes de détection actuellement pratiquées lors des expéditions ou des réceptions de céréales. La méthode de détection normalisée consiste en une inspection minutieuse de l'échantillon à l'aide d'un tamisage, puis à placer l'échantillon en incubation et à renouveler l'inspection régulièrement pendant au moins 36 jours afin de détecter les formes cachées émergentes (ISO, 1986). Dans les faits, en raison de la durée de l'analyse de référence, les opérateurs ne pratiquent pas de recherche des formes cachées. La recherche se limite à un premier tamisage pour déterminer la présence d'insectes, morts et vivants dans l'échantillon. Au Canada, la détection est couramment pratiquée à l'aide d'un entonnoir de Berlese (Commission canadienne des grains, 2019). Jian *et al.* (2016) ont comparé les performances de détection de plusieurs méthodes utilisées par les opérateurs parmi lesquelles le tamisage, l'entonnoir de Berlese et le chauffage de l'échantillon au microonde (Jian, 2015). Il a montré que le tamisage permettait d'extraire de 60 % à 91 % des insectes de l'échantillon, les performances les plus basses concernant l'extraction des larves de *T. castaneum*. Des essais similaires réalisés à ARVALIS (non publiés), ont permis de déterminer que l'incertitude de mesure d'un tamisage, tel que pratiqué par les opérateurs en France, était de 1,6 pour la détermination du nombre de *S. Oryzae* adultes et 11,2 pour la détermination du nombre d'*O. surinamensis*, soit des erreurs de respectivement 0,8 et 5,8. Ces données ont été obtenus à l'aide de tests en simple aveugle, les échantillons préparés contenant 4 à 7 niveaux d'infestation selon l'espèce et 3 réplicas par niveau d'infestation et par espèce. Les performances sur d'autres espèces n'ont pas été étudiées et toutes ces études ont été effectuées sur des échantillons de blé tendre et avec des insectes adultes vivants. Pour



les situations directement comparables, les performances de quantification obtenues par IHS sont donc proches de celles obtenues à l'aide d'un simple tamisage, légèrement plus faibles cependant.

Toutefois, l'intérêt de l'analyse par IHS réside aussi dans sa capacité à être réalisée sur flux, ce qui permet d'analyser un échantillon de plus grande taille que ce qui peut se faire avec les méthodes de tamisage habituelles. Or, Jian *et al.* (2014) ont montré que l'accroissement de la taille de l'échantillon améliorerait très nettement les performances d'estimation de la densité d'insectes présent dans un lot. Ainsi, la performance totale de l'analyse par IHS, cumulant incertitude de l'échantillonnage et incertitude de la mesure, pourrait être meilleure que celle d'un tamisage grâce à cette possibilité de diminuer la part d'incertitude apportée par l'échantillonnage.

Dans cette étude, les erreurs de prédiction obtenues pour la quantification des insectes adultes morts sont plus élevées que celles obtenues pour les insectes adultes vivants. Il semble plus difficile de quantifier par IHS les insectes morts que les insectes vivants. Cette distinction pourrait s'expliquer par la différence de teneur en eau entre un insecte vivant et un insecte mort. Les longueurs d'ondes correspondant à l'humidité pourraient jouer un rôle dans la détermination des niveaux d'infestation (Ridgway et Chambers, 1996, Maguirang *et al.*, 2003, Paliwal *et al.*, 2004). Cependant, lors de travaux sur la différenciation par spectroscopie proche infrarouge de grains sains et de grains infestés par des larves de *S. Oryzae*, Maguirang *et al.* (2003) ont montré qu'un modèle de classification développé à partir de larves vivantes fonctionne également pour les larves mortes (de 86 % à 96 % de bonne classification) et inversement (de 92 % à 93 % de bonne classification), ce qui n'est pas en cohérence avec nos propres résultats. Ils en concluent qu'un modèle de classification peut être développé indifféremment à partir de larves vivantes ou mortes. Ce point mériterait d'être approfondi car il s'agit d'une information d'intérêt pour les opérateurs.

Concernant la détection des formes cachées, qui ne peut être effectuée par tamisage, nous obtenons une incertitude de la méthode IHS bien plus forte que pour les formes adultes. Il n'est pas surprenant que cette incertitude soit plus élevée, compte tenu du fait que, sous le terme « formes cachées », sont regroupés différents stades larvaires présentant des tailles très variables selon le stade et/ou l'espèce (Figure 6).

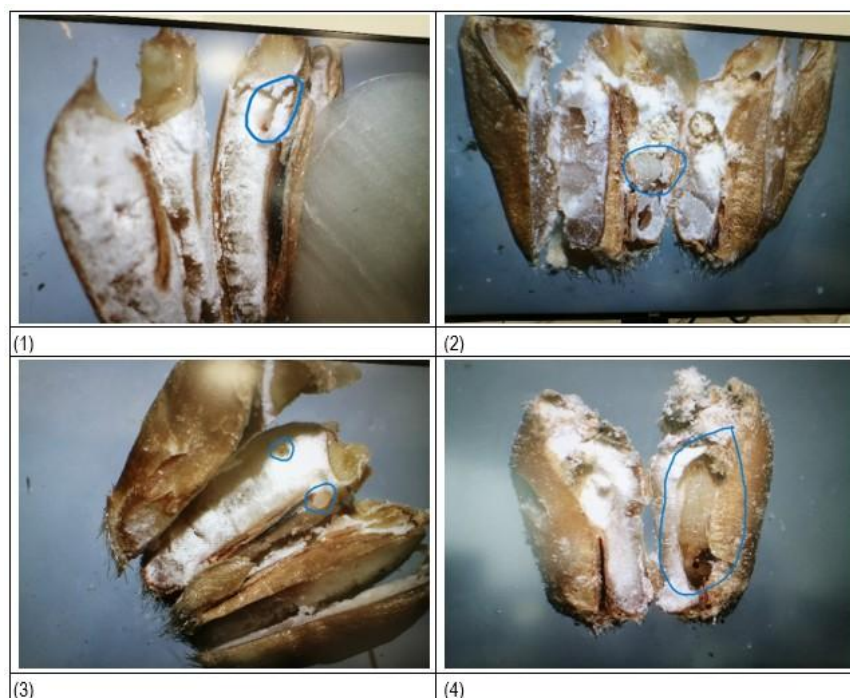


Figure 6 : Grains infestés par des jeunes larves de *R. dominica* (1), *S. Oryzae* (2), jeune larve et œuf (3) et nymphe (4), ARVALIS.

Description de la figure

La figure montre des photos de 4 grains de blé coupés. A l'intérieur des grains, un œuf, une jeune larve et/ou une nymphe sont visibles. La surface occupée par un œuf est très petite comparée à la surface de la coupe du grain. Les 3 jeunes larves visibles sont de tailles différentes mais représentent dans tous les cas une très faible surface du grain. La nymphe quant à elle occupe une grande partie de la surface du grain.

La taille de la forme larvaire a un impact sur la capacité de détection par spectroscopie proche infrarouge (Dowell *et al.*, 1998, Maguirang *et al.*, 2003, Paliwal *et al.*, 2004). Plus le stade de



développement de l'insecte est avancé, plus la précision de la détection est importante. En particulier, Dowell *et al.* (1998) ont montrés que la taille minimale détectable des larves dans des grains de blé individuels avec une marge d'erreur de 5 % est : 2,0 mm² pour *S. Oryzae* et 1.1 mm² pour *R. dominica*.

Il y a peu (voire pas) de données sur des incertitudes de quantification des formes cachées à l'aide de méthodes de détection rapide. La norme ISO 6639-4 (ISO, 2025) précise bien que la détermination des infestations cachées par flottation a tendance à sous-estimer le niveau réel d'infestation et que le résultat doit être considérée comme donnant une indication plus qualitative que quantitative. Quant aux déterminations par capteurs acoustiques, elles se présentent généralement sous une forme semi-quantitative par classes d'infestation. Compte tenu des incertitudes très importantes que nous avons obtenues, et de la difficulté à établir les données de référence sur le nombre réel de formes cachées présentes au moment de l'analyse IHS, il pourrait être judicieux pour la suite de travailler plutôt sur des modèles de classification plutôt que de quantification.

A la vitesse de 0,1 m/s, la cadence d'acquisition de la caméra a été réglée de façon à ne pas déformer les objets sur les images. Un pixel représente une surface d'environ 0,4 mm x 0,4 mm. A la vitesse de 0,7 m/s, même en utilisant la cadence d'acquisition maximale de la caméra, les objets sont déformés. Un pixel représente une surface d'environ 0,4 mm x 1,98 mm. La taille d'un *S. Oryzae* adulte est comprise entre 2,3 et 4mm. A une vitesse de 0,7 m/s, celui-ci représente très peu de pixels sur l'image rendant la détection plus difficile. De plus, l'information spatiale étant utilisée pour quantifier les insectes à partir de l'image 2D obtenue après classification, ces déformations peuvent expliquer les performances obtenues. En effet, avant de comptabiliser le nombre de régions contiguës, des techniques de morphologies mathématiques sont utilisées pour supprimer les objets détectés dont la forme ne correspond probablement pas à des insectes. La mise en place de ces techniques morphologiques est beaucoup plus compliquée lorsque les objets sont déformés. La distorsion observée sur les images à une vitesse de 0,7 m/s peut ainsi expliquer les mauvaises performances obtenues.

5. Conclusion

Les performances de quantification obtenues par IHS infrarouge sur blé et orge, pour les formes adultes, sont d'un niveau comparable aux performances des méthodes de quantification actuellement utilisées par les opérateurs. Les performances sur les formes larvaires sont dégradées par rapport aux formes adultes. Néanmoins, les méthodes de détections utilisées par les opérateurs ne permettent pas actuellement de détecter les formes larvaires. L'impact négatif de la vitesse du tapis sur les performances de l'analyse imposent cependant de reconsidérer l'utilisation de ce type d'appareil sur des bandes transporteuses des circuits de manutention, la vitesse de celles-ci atteignant 3 m/s. L'utilisation de cette méthode lors de l'agréage des lots pourrait nécessiter l'adaptation des pratiques d'échantillonnage à réception, afin de prélever des quantités plus importantes (pour réduire l'incertitude globale de l'analyse) et analyser sur flux un échantillon de grande taille, à une vitesse adaptée aux caméras IHS. Plusieurs points restent cependant à approfondir pour que cette méthode de détection puisse être adoptée par les opérateurs. Il faudrait pouvoir distinguer les adultes vivants des adultes morts. Ceci paraît envisageable au regard des premiers résultats obtenus, mais cela n'a pas été confirmé dans des échantillons qui contiendraient simultanément des insectes morts et vivants, compte tenu de notre méthodologie. Enfin, l'erreur obtenue pour la quantification des formes cachées ne permet pas une utilisation en routine de la méthode. Travailler en classification présence/absence pourrait être une solution, en déterminant toutefois le niveau de détection 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

Katell Crépon : <https://orcid.org/0000-0003-2509-6515>

Marlène FAURE : <https://orcid.org/0009-0002-9878-3906>

Ryad Bendoula : <https://orcid.org/0000-0002-2794-1252>

Contributions des auteurs

Marlène FAURE (curation des données, analyse formelle, méthodologie, rédaction – version originale)

Ryad BENDOULA (rédaction – révision et correction)

Faten AMARRI (supervision)

Séverine MAUDEMAIN (administration du projet, validation)

Katell CREPON (conceptualisation, fourniture de ressources, rédaction – révision et correction)

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas 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 Catherine Renaud (ARVALIS) pour la réalisation des élevages d'insectes, la préparation des échantillons et le dénombrement des émergences ainsi que Isabelle Roux (ARVALIS) pour l'acquisition des spectres.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a reçu le soutien financier du ministère de l'agriculture et de l'alimentation (CASDAR 21ART4027861). La responsabilité du ministère chargé de l'agriculture ne saurait être engagé

Références bibliographiques

Adler, C., Athanassiou, C., Carvalho, M.O., Emekci, M., Gvozdenac, S., Hamel, D., Riudavets, J., Stejskal, V., Trdan, S., & Trematerra, P. (2022). Changes in the distribution and pest risk of stored product insects in Europe due to global warming: Need for pan-European pest monitoring and improved food-safety. *Journal of Stored Products Research*, 97, 101977.

Barnes, R.J., Dhanoa, M.S., & Lister, S.J. (1989). Standard Normal Variate Transformation and De-Trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra. *Applied Spectroscopy*, 43, 772-777.
<https://doi.org/10.1366/0003702894202201>



Cabacos M. (2025). Un état des lieux inédit sur la présence d'insectes ravageurs au silo fermier : le risque est avéré pour certaines espèces largement installées sur le territoire français. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/medias/pdf/2025-06/Lettre_Stockage_Juin_2025_n27.pdf, consulté le 23/07/2025

Caporaso N., Whitworth M. B., & Fisk I. D. (2018). Near-Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging for non-destructive quality assessment of cereal grains. *Applied spectroscopy reviews*, 53, 667–687.

Codex Alimentarius. Stan 199–1995 Standard for wheat and durum wheat. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/proxy/en/>

Commission canadienne des grains (2019). Surveillance du grain entreposé à des fins de prévention des infestations par les insectes ravageurs. <https://www.grainscanada.gc.ca/fr/qualite-grains/gestion/gestion-prevenir-infestations/surveiller-infestations.html>. Consulté le 03/09/2025.

Dowell, F. E., Throne, J. E., & Baker, J. E. (1998). Automated Nondestructive Detection of Internal Insect Infestation of Wheat Kernels by Using Near-Infrared Reflectance Spectroscopy. *Journal Of Economic Entomology*, 91(4), 899-904. <https://doi.org/10.1093/jee/91.4.899>

Fleurat Lessard, F. (1980). Enquête sur l'état sanitaire des stocks des grains en France. 2 ème partie: les résultats. *Bulletin technique d'information du Ministère de l'Agriculture*, (349), 271-280.

Grolleaud, M. (2002). Post-harvest losses: discovering the full story. Overview of the phenomenon of losses during the post-harvest system. FAO, Rome, Italy <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ac301e>, consulté le 20/07/2025

Gustavsson, J.; Cederberg C., & Sonesson U. (2011). A global food losses and food waste. FAO, Rome, Italy <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i2697e>, consulté le 21/05/2025

International Standard Organisation (1986). ISO 6639-3:1986 : Céréales et légumineuses. Détermination de l'infestation cachée par les insectes. Partie 3 : méthode de référence.

International Standard Organisation (2025). ISO 6639-4 : 2025 : Céréales et légumineuses. Détermination de l'infestation cachée par les insectes. Partie 4 : méthodes rapides.

Jian, F., Doak, S., Jayas, D. S., Fields, P. G., & White, N. D. (2016). Comparison of insect detection efficiency by different detection methods. *Journal of stored products research*, 69, 138-142.

Jian, F., Jayas, D. S., & White, N. D. (2014). How many kilograms of grain per sample unit is big enough? Part II—Simulation of sampling from grain mass with different insect densities and distribution patterns. *Journal of stored products research*, 56, 67-80.

Jian, F., Jayas, D. S., Fields, P. G., & White, N. D. (2015). A new method to rapidly detect rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens), in stored grain. *Journal of Stored Products Research*, 63, 1-5.

Kumar, D., & Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods*, 6(1), 8.

Leblanc, M. P., Fuzeau, B., & Fleurat-Lessard, F. (2014). Influence of grain storage practices or kind of structure and pesticide use on insect presence in wheat bulks after a long-term storage: A multi-dimensional analysis. *IOBC-WPRS Bull*, 98, 403-420.

Maghirang E.B., Dowell F., Baker J., & Throne J.E. (2003). Automated detection of single wheat kernels containing live or dead insects using near infrared reflectance spectroscopy. *Transactions of the ASAE*, 46, 1277.

Paliwal J., Wang W., Symons S., & Karunakaran C. (2004). Insect species and infestation level determination in stored wheat using near-infrared spectroscopy. *Canadian Biosystems Engineering*, 46, 17e24.

Phillips, T.W., & Throne, J.E (2010). Biorational approaches to managing stored-product insects. *Annual Review Entomology*, 55, 375–397.

Rick, H., Marc, B., & Felix, R. (2014). APHLIS – Postharvest cereal losses in Sub-Saharan Africa, their estimation, assessment and reduction. *Joint Research Centre (European Commission)*. <https://doi.org/10.2788/19582>



Ridgway C., & Chambers J. (1996). Detection of external and internal insect infestation in wheat by near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of the Science Food and Agriculture*, 71, 251e264.

Ridgway C., & Chambers J. (1998). Detection of insects inside wheat kernels by nir imaging. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 6(1) 115-119.

Singh C.B., Jayas D.S., Paliwal J., & White N.D.G. (2009). Detection of insect-damaged wheat kernels using near-infrared hyperspectral imaging. *Journal of Stored Products Research*, 45, 151–158.

Singh C.B., Jayas D.S., Paliwal J., & White N.D.G. (2010). Identification of insect-damaged wheat kernels using short-wave near-infrared hyperspectral and digital colour imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73, 118–125.

Stejskal V., Hubert J., Aulicky R., & Kucerova Z. (2015). Overview of present and past and pest-associated risks in stored food and feed products: European perspective. *Journal of Stored Products Research*, 64, Part B, 122-132.

Yan K, & Zhang D (2015). Feature selection and analysis on correlated gas sensor data with recursive feature elimination. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 212: 353-363.

Pour citer cet article : Marlène FAURE, Ryad BENDOULA, Faten AMMARI, Séverine MAUDEMMAIN & Katell CREPON, 2026 - Détection des insectes ravageurs des grains dans les céréales : 1. Le potentiel de l'imagerie hyperspectrale. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art14>



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.



Détection des insectes ravageurs des grains dans les céréales : 2. Performances de la Spectroscopie en Proche Infrarouge (SPIR) pour détecter et quantifier des insectes

Marlène FAURE¹, Faten AMMARI, François CHAMBON², Séverine MAUDEMAIN, Katell CREPON¹

¹ ARVALIS, Station expérimentale, Route de Malesherbes, 91720 BOIGNEVILLE

² SCICA AGRORESO, 49 route d'Auxerre 89470 MONETEAU

Correspondance : m.faure@arvalis.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art15>

Résumé

La SPIR est présente dans les organismes stockeurs pour déterminer les critères contractuels. Son utilisation pour la détection rapide de la présence d'insectes a un intérêt majeur étant donnée la dépréciation de la valeur commerciale du lot de céréales infesté. Deux spectromètres ont été testés pour quantifier ou classer (présence/absence) des adultes vivants ou morts et des larves de *Sitophilus oryzae*, *Rhyzopertha dominica* et *Tribolium castaneum* dans des échantillons de blé et d'orge. Les meilleures performances de quantification sont obtenues avec le spectromètre permettant une analyse en ligne. Les valeurs de SECV varient entre 1.47 et 2.56 insectes/kg pour les adultes et entre 6.82 et 26.65 insectes/kg pour les larves. La présence d'insectes dans un échantillon est détectable avec une précision de 95 %.

Mots-clés : céréales, insectes des grains, détection, spectroscopie proche infrarouge

Abstract: Detection of grain pests in cereals: 2. Performance of Near-Infrared Spectroscopy for insect detection and quantification

SPIR is used in storage facilities to determine contractual criteria. Its use for rapid detection of insects is of major interest given the depreciation in commercial value of infested batches. Two spectrometers were tested to quantify or classify (presence/absence) live or dead adults and larvae of *Sitophilus oryzae*, *Rhyzopertha dominica* and *Tribolium castaneum* in wheat and barley samples. The best quantification performance was obtained with the spectrometer that allows online analysis. SECV values ranged from 1.47 to 2.56 insects/kg for adults and from 6.82 to 26.65 insects/kg for larvae. The presence of insects in a sample can be detected with 95 % accuracy.

Keywords: cereals, grain insects, detection, near-infrared spectroscopy

1. Introduction

La Spectroscopie en Proche Infrarouge (SPIR) est une technique de mesure rapide, fiable et peu onéreuse largement implantée dans le secteur céréalier (Du *et al.* 2022 ; Dowell *et al.* 2006). Chez les opérateurs de stockage, la SPIR est utilisée pour réaliser l'agrégage des lots, effectué à réception ou à expédition des céréales pour des critères contractuels comme la teneur en eau, la teneur en protéines ou la force boulangère (w). La totalité des appareils infrarouge utilisés en silo peuvent disposer de calibration sur la teneur en eau et la teneur en protéines. D'autres calibrations permettent de prédire des critères composites comme le temps de chute de Hagberg ; elles sont utilisées à réception des lots comme outil de classification (isolement des lots avec un temps de chute inférieure à 220 s). 80 % à 90 % des silos en France utilisent ce type de calibration (Chambon F., communication personnelle). Ces méthodes de mesure de la qualité sont considérées comme suffisamment fiables pour être utilisées



en routine dans les échanges commerciaux. Les contrats type reconnaissent leur utilisation (INCOGRAIN, 2021), leurs performances sont décrites (AFNOR, 2020), et les appareils associés à leurs calibrations sont reconnus par la métrologie légale conformément aux recommandations de l'organisation internationale de métrologie légale (OIML, 1984) et selon les dispositions en vigueur (JORF, 2010).

La présence d'insectes dans les lots de céréales est un élément majeur de dépréciation de la valeur commerciale du lot. En effet, pour être commercialisable, un lot doit être exempt d'insectes vivants de la marchandise (Syndicat de Paris, Codex Alimentarius). Leur détection peut entraîner le refus du lot. La présence de quelques insectes peut cependant être tolérée, les lots sont ainsi mis en marché avec la mention « infesté ». Le nombre d'insectes tolérés dans ce cas est faible (moins de 2 insectes dans l'échantillon prélevé pour agréage) (USDA, 2020).

Les méthodes actuellement mises en œuvre pour détecter les insectes à l'entrée des silos portuaires reposent sur un échantillonnage et une détection par tamisage. La norme ISO 6639 (2025) décrit les méthodes de détection des insectes dans les lots de grains. La méthode de référence consiste à séparer par tamisage les insectes adultes des grains puis à placer l'échantillon de grain en incubation pendant 42 à 56 jours pour accéder aux formes larvaires. Compte tenu de la durée d'incubation nécessaire, cette méthode n'est pas pratiquée couramment par les opérateurs qui se limitent à l'observation des adultes présents, ou non, dans l'extraction du tamis. Les méthodes rapides décrites dans cette norme sont : la détermination du dégagement de CO₂, la flottation des grains, l'analyse acoustique. Aucune n'est utilisée par les opérateurs, hormis la méthode acoustique pour laquelle une sonde a été développée (Tomasini, 2018) mais qui reste peu utilisée. La difficulté de mise en œuvre (durée d'analyse, contrainte réglementaire, sensibilité aux bruits externes, coût des appareils...) ou leur faible efficacité (détection de CO₂) expliquent en grande partie le peu de succès de ces méthodes rapides auprès des opérateurs (Dowell, 1998). Les méthodes de détection par tamisage pratiquées par les opérateurs nécessitent un échantillonnage préalable et ne permettent de détecter que de fortes infestations (Jian *et al.*, 2014 ; Wilkin & Fleurat-Lessard, 1990) de formes adultes avec un niveau d'incertitude acceptable.

L'utilisation de SPIR pour détecter ou quantifier les insectes présents dans un échantillon de céréales présenterait l'avantage, pour les opérateurs, d'utiliser un même appareil pour réaliser les principales analyses d'agrégage, rapidement et sans destruction de l'échantillon. De nombreux travaux ont été réalisés sur ce sujet (Johnson, 2020). L'identification des infestations par des formes adultes de charançons du riz (*Sitophilus oryzae*) s'est avérée plus performante que celle des formes larvaires (Karunakaran *et al.*, 2005). Maghirang *et al.* (2003) ont utilisé un système proche infrarouge automatisé pour détecter les infestations internes des grains de blé par le charançon du riz (mort ou vivant) à différents stades de croissance. Cette étude a été faite sur une faible quantité de grains analysés individuellement. La précision de la classification s'est avérée décroissante en fonction de la taille des larves analysées. Ces résultats ont été en accord avec ceux de Throne *et al.* (2002) et Maghirang *et al.* (2002). Paliwal *et al.* (2004) ont évalué la fiabilité de la SPIR pour la détection et la quantification du charançon du riz à quatre stades différents de développement (œuf, larve, chrysalide et adulte) dans des échantillons de blé artificiellement infestés à des taux variant entre 0 et 50 % par intervalle de 5 %. Les modèles de prédiction développés n'ont été satisfaisants que pour les pourcentages d'infestations élevés. L'utilisation de la SPIR à transformée de Fourier sont susceptibles d'apporter des améliorations significatives pour quantifier les insectes dans les céréales (Jarruwat *et al.*, 2014, Johnson, 2020).

L'objectif de notre travail est de développer des calibrations de quantification ou de classification (présence/absence) d'insectes dans les céréales adaptées à deux spectromètres : un Infratec™ NOVA (FOSS, Danemark) analysant un échantillon de 800g et un spectromètre de mesure en ligne PSS (Polytec GmbH, Allemagne) permettant l'analyse en continu d'un lot sur une bande convoyeuse. L'avantage du premier appareil est qu'il est déjà présent chez tous les opérateurs de stockage, son



utilisation pour la détection d'insectes ne nécessiterait donc aucune adaptation aux procédures d'agréage existantes, et pas d'investissement conséquent. L'intérêt du second appareil réside dans sa capacité à analyser un échantillon de grande taille, et donc à réduire l'incertitude du résultat liée à l'incertitude apportée par l'échantillonnage, qui est conséquente (Jian *et al.*, 2014).

2. Matériels et méthodes

2.1. Constitution de la base d'échantillons

2.1.1. Echantillons infestés « artificiellement »

S. oryzae, *Rhyzopertha dominica* et *Tribolium castaneum* ont été élevés dans des lots de blé, puis séparés des grains par tamisage et tri manuel afin d'obtenir le nombre requis d'adultes vivants. Deux lots de 400 kg de blé tendre et de 400 kg d'orge, ont été utilisés, récoltés en 2022 sur la ferme de Boigneville (92), préalablement nettoyés à l'aide d'un nettoyeur de grains (NSD2, Ets Denis, France) et conservés dans un congélateur afin d'éviter toute infestation. À partir de ces lots et pour chaque espèce d'insecte, un ensemble de 72 échantillons a été préparé afin d'obtenir 24 densités d'infestation avec 3 réplifications chacune. 16*3 échantillons de 1 kg ont été infestés avec 0 à 15 insectes adultes vivants par kg et 8*3 échantillons de 1,5 à 5 kg de grains (par paliers de 500 g) ont été infestés avec 1 insecte adulte vivant chacun.

Pour les formes larvaires de *S. Oryzae* et *R. dominica*, le même nombre d'échantillons a été produit mais les densités ont été multipliées par 10. L'extraction des grains infestés des élevages a été réalisée en exploitant leur différence de densité avec les grains sains (méthode ISO 6639-1). L'inspection visuelle grain par grain du surnageant n'étant pas envisageable au regard du nombre de grains infestés à produire, une estimation de l'infestation a été réalisée par échantillonnage des grains surnageants et le nombre de grains à intégrer dans un échantillon sain a été adapté en tenant compte de la proportion de grains infestés extraits de l'élevage (voir Faure *et al.*, 2025, partie 1). Pour *T. castaneum*, qui n'a pas de formes cachées, les larves ont été extraites manuellement des élevages après tamisage.

Des difficultés ont été rencontrées pour la production des formes larvaires de *R. dominica*. Le nombre réel de larves de *R. dominica* émergeant après incubation était plus faible que l'estimation attendue. Cette différence était probablement due à la mortalité des formes larvaires. A la suite de ce constat sur le blé, pour la modalité larves de *R. dominica* dans l'orge, les échantillons n'ont pas été préparés.

2.1.2. Echantillons sans insectes

Afin de développer un modèle de classification présence ou absence d'insectes, des échantillons sans insectes sont nécessaires. 567 échantillons de blé tendre provenant de parcelles ARVALIS de 2014 à 2023 ont été utilisés. Etant conservés en chambre froide rapidement après récolte, il est présumé qu'ils ne contiennent pas d'insectes de stockage

2.1.3. Echantillons « naturels »

ARVALIS a déterminé les infestations de 202 échantillons de blé tendre envoyés par les organismes stockeurs dans le cadre des enquêtes ARSAN (Analyse des risques SANitaires au stockage, réalisée en partenariat avec FranceAgriMer). Les insectes présents sont identifiés puis comptés avant et après 42 jours d'incubation. De plus, dans le cadre d'une enquête menée par ARVALIS sur les pratiques de stockage fermier, 29 échantillons provenant de silos fermiers ont été réceptionnés. Les insectes présents sont également identifiés et comptabilisés avant et après 42 jours d'incubation. Une base d'échantillons « naturels » a ainsi pu être constituée et utilisée dans cette étude.



2.2. Spectromètres utilisés

L'ensemble des échantillons infestés « artificiellement » ont été analysés avec deux spectromètres proche infrarouge. Les échantillons naturels issus des enquêtes ARSAN 2023 (récolte 2022) et 2024 (récolte 2023) ont été analysés avec le spectromètre PSS. En 2024, les échantillons provenant des silos fermiers ont été acquis avec le spectromètre Infratec NOVA.

2.2.1. Spectromètre Infratec NOVA

Le spectromètre proche infrarouge Infratec NOVA (FOSS) permet d'analyser des grains entiers en mode transmission, sur une gamme spectrale allant de 400 à 1100 nm avec une résolution de 0.5 nm. L'acquisition avec l'Infratec de l'échantillon versé dans la trémie se fait en 10 sous-portions d'environ 60 ml. Les grains restants sont évacués sans être analysés. Afin de quantifier ou de déterminer la présence d'insectes, il est important que l'intégralité de l'échantillon soit analysée. Chaque échantillon a donc été divisé en sous-échantillons de 600 ml (soit environ 500g) afin de s'assurer qu'une quantité maximale de l'échantillon soit analysé.

2.2.1. Spectromètre PSS 2121

Le spectromètre proche infrarouge PSS 2121 (Polytec) permet une analyse en ligne des échantillons en mode réflectance, sur une gamme spectrale allant de 1100 à 2100 nm avec une résolution de 2 nm. Les acquisitions se font en continu grâce à un convoyeur d'une vitesse de 0.1 m/s au-dessus duquel est installé le spectromètre. Un distributeur, placé au début du convoyeur, permet par vibration de distribuer les grains sur le tapis en plusieurs couches.

2.3. Traitement des données

2.3.1. Quantification des insectes

Le logiciel utilisé pour traiter les données dépend du spectromètre et de la compatibilité des fichiers de spectres. Les données de l'Infratec NOVA ont été traitées avec le logiciel WinISI4 (Infrasoft International (ISI)) et celles du PSS avec le logiciel SL Calibration Wizard (Sensologic).

Pour chaque modalité (céréale/espèce d'insectes/forme d'insectes), un modèle quantitatif a été développé à partir des 72 échantillons infestés « artificiellement » (72 spectres). Les spectres acquis ont été convertis en absorbance, soit en enregistrant les données directement en absorbance depuis le spectromètre Infratec NOVA, soit en appliquant une transformation sur les spectres du spectromètre PSS. Afin d'augmenter le ratio signal sur bruit et d'améliorer les variations du signal, le prétraitement des données spectrales est une étape importante avant la construction d'un modèle (Manley, 2014, Agelet *et al.*, 2010 et Zhenjiao *et al.*, 2022). Dans cette étude, différents prétraitements mathématiques ont été testés (SNV, Detrend, dérivée...) ainsi que leurs combinaisons. La méthode de régression Partial Least Square (PLSR) a été utilisée pour construire les modèles de quantification des insectes. PLSR est une méthode largement utilisée pour l'analyse des données de spectroscopie proche infrarouge qui permet de relier les matrices X (des spectres prétraités) et Y (nombre d'insectes ajouté manuellement dans l'échantillon) via un modèle multivarié linéaire (Bilgili *et al.*, 2010).

Etant donné le faible nombre de spectres par modalité, une cross-validation a été réalisée pour comparer les performances des modèles obtenus avec les différents prétraitements. Afin de choisir le modèle PLSR optimal, une erreur standard de cross-validation (SECV) a été calculée en comparant le nombre d'insectes quantifié par NIRS au nombre d'insectes introduits manuellement dans l'échantillon lors de la préparation.

Dans un second temps, pour chaque modalité, les modèles PLSR retenus ont été testés sur les échantillons « naturels ». Les performances ont été évaluées en calculant une erreur standard de prédiction (SEP).



2.3.2. Classification : présence ou absence des insectes

L'analyse qualitative des données a été réalisée avec le logiciel Matlab (The MathWorks Inc.) pour les deux spectromètres.

Uniquement pour le blé, un modèle de classification a été développé pour déterminer la présence ou l'absence d'insectes. La classe « présence d'insectes » regroupe les différentes espèces d'insectes (*S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*) et les différentes formes (adultes vivants ou morts ou formes larvaires). Ce modèle qualitatif a été créé à partir des échantillons infestés « artificiellement », des échantillons sans insectes et des échantillons « naturels ». Un lot de calibration (2/3 des données) et un lot de validation (1/3 des données) ont été créés (voir tableaux 1 et 2). Les spectres acquis ont été convertis en absorbance. Différents prétraitements mathématiques ont été testés ainsi que la sélection des longueurs d'ondes les plus discriminantes avec les méthodes Support Vector Machine Recursive Feature Elimination (SVM-RFE), Principal Component Analysis (PCA) ou Genetic Algorithm (GA). Plusieurs modèles de classification ont également été testés : Support Vector Machine (SVM) et Partial Least Squares - Discriminant Analysis (PLSDA).

Pour comparer les performances des différents modèles obtenus, ceux-ci ont été testés sur le lot de validation. Afin de choisir le meilleur modèle, les résultats de classification ont été représentés sous forme de matrice de confusion et des indicateurs tels que la sensibilité, la spécificité et la précision ont été calculés.

Tableau 1 : Lot de calibration et lot de validation utilisés pour créer le modèle de classification absence vs présence d'insectes dans le blé avec le spectromètre Infratec NOVA

	BASE DE CALIBRATION		BASE DE VALIDATION	
	Absence	Présence	Absence	Présence
Echantillons infestés artificiellement	18	414	9	207
Echantillons sans insectes	414	0	207	0
Echantillons naturels (enquête ferme)	1	19	0	9
TOTAL	866		432	

Tableau 2 : Lot de calibration et lot de validation utilisés pour créer le modèle de classification absence vs. présence d'insectes dans le blé avec le spectromètre PSS

	BASE DE CALIBRATION		BASE DE VALIDATION	
	Absence	Présence	Absence	Présence
Echantillons infestés artificiellement	18	313	9	157
Echantillons sans insectes	376	0	191	0
Echantillons naturels (enquêtes ARSAN)	27	108	12	55
TOTAL	842		424	

3. Résultats

3.1. Modèles de quantification des insectes

3.1.1. Spectromètre Infratec NOVA

Les modèles quantitatifs développés permettent de prédire le nombre d'insectes détectés par kilogramme. Les performances de quantification des insectes dans le blé sont présentées dans le



tableau 3. La valeur de SECV des adultes vivants de *S. oryzae* (4.91 insectes/kg) est légèrement plus faible que celles de *R. dominica* (6.44 insectes/kg) et *T. castaneum* (6.33 insectes/kg). Pour les adultes morts, les valeurs de SECV sont similaires entre les espèces (5.54, 5.38 et 6.26 insectes/kg respectivement pour *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*). Les erreurs de cross-validation sont globalement du même ordre de grandeur pour les insectes adultes vivants et morts. Concernant les formes larvaires, qu'elles soient internes aux grains ou externes, les performances sont moins bonnes que pour les insectes adultes mais restent similaires entre les espèces d'insectes (34.32, 37.36 et 37.93 insectes/kg respectivement pour *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*).

Tableau 3 : Performances (SECV) de la quantification des insectes dans le blé avec le spectromètre Infratec NOVA pour les espèces *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*, aux stades adultes vivants, adultes morts et formes larvaires.

BLE	ESPECE D'INSECTES		
	<i>S. oryzae</i>	<i>R. dominica</i>	<i>T. castaneum</i>
Adultes vivants			
SECV (insectes/kg)	4.91	6.44	6.33
Adultes morts			
SECV (insectes/kg)	5.54	5.38	6.26
Larves			
SECV (insectes/kg)	34.32	37.36	37.93

Pour l'orge, les performances de quantification sont globalement du même ordre de grandeur que pour le blé (tableau 4). Pour chaque espèce, les valeurs de SECV sont similaires entre les adultes vivants et les adultes morts. Les valeurs de SECV obtenues pour les adultes vivants ou morts de *R. dominica* (respectivement 6.97 et 7.19 insectes/kg) sont un peu plus élevées que pour les autres espèces (de 5.21 à 6.10 insectes/kg). Concernant les formes larvaires, les performances de quantification sont là aussi moins bonnes que pour les insectes adultes.

Tableau 4 : Performances (SECV) de la quantification des insectes dans l'orge avec le spectromètre Infratec NOVA pour les espèces *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*, aux stades adultes vivants, adultes morts et formes larvaires.

ORGE	ESPECE D'INSECTES		
	<i>S. oryzae</i>	<i>R. dominica</i>	<i>T. castaneum</i>
Adultes vivants			
SECV (insectes/kg)	5.21	6.97	5.49
Adultes morts			
SECV (insectes/kg)	6.10	7.19	5.50
Larves			
SECV (insectes/kg)	49.07	-	43.5

3.1.2. Spectromètre PSS

Les performances de quantification des insectes dans le blé sont présentées dans le tableau 5. Variant de 1.59 à 2.56 insectes/kg, les valeurs de SECV des adultes vivants et des adultes morts sont similaires quelles que soient les espèces d'insectes. Concernant les formes larvaires, qu'elles soient internes aux grains ou externes, les performances sont moins bonnes que pour les insectes adultes. La



valeur de SEP est particulièrement élevée pour *R. dominica* (24.34 larves/kg), alors que les SEP de *S. oryzae* et *T. castaneum* sont plus faibles (respectivement 6.82 larves/kg et 8.06 larves/kg).

A la suite d'un problème lors de l'acquisition des échantillons de blé infestés par des adultes vivants de *R. dominica*, la base de données est incomplète pour cette modalité et aucun développement n'a pu être réalisé.

Tableau 5 : Performances (SECV) de la quantification des insectes dans le blé avec le spectromètre PSS pour les espèces *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*, aux stades adultes vivants, adultes morts et formes larvaires.

BLE	ESPECE D'INSECTES		
	<i>S. oryzae</i>	<i>R. dominica</i>	<i>T. castaneum</i>
Adultes vivants			
SECV (insectes/kg)	2.56	-	2.44
Adultes morts			
SECV (insectes/kg)	2.05	2.05	1.59
Larves			
SECV (insectes/kg)	6.82	24.34	8.06

Pour l'orge, les performances de quantification des adultes sont globalement du même ordre de grandeur que pour le blé (tableau 6). Variant de 1.47 à 2.32 insectes/kg, les valeurs de SECV des adultes vivants et des adultes morts sont similaires quelles que soient les espèces d'insectes. Concernant les formes larvaires, qu'elles soient internes aux grains ou externes, les performances sont moins bonnes que pour les adultes mais restent similaires entre les espèces d'insectes (25.09 et 26.65 insectes/kg respectivement pour *S. oryzae* et *T. castaneum*).

Tableau 6 : Performances (SECV) de la quantification des insectes dans l'orge avec le spectromètre PSS pour les espèces *S. oryzae*, *R. dominica* et *T. castaneum*, aux stades adultes vivants, adultes morts et formes larvaires.

ORGE	ESPECE D'INSECTES		
	<i>S. oryzae</i>	<i>R. dominica</i>	<i>T. castaneum</i>
Adultes vivants			
SECV (insectes/kg)	1.62	2.32	1.47
Adultes morts			
SECV (insectes/kg)	1.74	1.75	2.07
Larves			
SECV (insectes/kg)	25.09	-	26.65

Les modèles quantitatifs retenus ont également été testés sur une base de données externe constituée des échantillons « naturels » issus de l'enquête ARSAN 2023. Les erreurs de prédictions obtenues s'avèrent bien plus élevées que les erreurs de cross-validation (par exemple, SEP = 45.52 insectes/kg pour le modèle de quantification de *S. oryzae* vivants dans des grains de blé).

Les erreurs de quantification obtenues avec une méthode de tamisage varient de 0,6 pour les adultes vivants de *S. oryzae* à 5,6 pour les adultes de *O. surinamensis* d'après des travaux réalisés par ARVALIS (non publiés). Les deux méthodes testées ici présentent donc des performances de mesure



inférieures à la méthode de tamisage pour les adultes vivants. Nous ne disposons pas d'éléments pour comparer les performances obtenues sur des adultes morts. Quant aux formes larvaires, elles ne sont pas accessibles avec la méthode par tamisage.

3.2. Classification des insectes (présence/absence)

3.2.1. Spectromètre Infratec NOVA

Les performances du modèle retenu, sur le lot de validation, sont présentées sous forme de matrice de confusion (tableau 7). La précision du modèle est de 95 % avec une sensibilité de 99 % et une spécificité de 91 %.

Tableau 7 : Matrice de confusion obtenue après application du modèle de classification présence vs. absence d'insectes dans le blé avec le spectromètre Infratec NOVA

BLE		Modèle de classification	
		PRESENCE	ABSENCE
Référence	PRESENCE	213	3
	ABSENCE	19	197

3.2.2. Spectromètre PSS

Les performances du modèle retenu, sur le lot de validation, sont présentées dans la matrice de confusion (tableau 8). La précision du modèle est de 95 % avec une sensibilité de 99 % et une spécificité de 91 %.

Tableau 8 : Matrice de confusion obtenue après application du modèle de classification présence vs. absence d'insectes dans le blé avec le spectromètre PSS

BLE		Modèle de classification	
		PRESENCE	ABSENCE
Référence	PRESENCE	209	3
	ABSENCE	20	192

Les sensibilités obtenues sont supérieures à celles obtenues avec un tamisage, quel que soit l'appareil utilisé (Crépon, 2022).

4. Discussion

4.1. Quantification des insectes

Le spectromètre Infratec NOVA s'avère moins performant pour quantifier les insectes que le spectromètre PSS. Les erreurs de cross-validation obtenues sont plus que doublées par rapport à celles obtenues avec le PSS. Ces résultats s'expliquent entre autres par les différences de fonctionnement des deux appareils. Le PSS permet une analyse en ligne de l'échantillon. Le distributeur, placé au début du convoyeur, répartit les grains sur une largeur de tapis correspondant à la largeur du spot de la tête de mesure du PSS. Même si les vibrations du distributeur peuvent envoyer certains grains ou insectes en dehors de la zone de mesure, la quasi-totalité de l'échantillon est scanné. L'Infratec NOVA, quant à lui, subdivise l'échantillon en 10 portions de 60 ml qui sont analysées dans une cellule de mesure. Afin d'optimiser la quantité de grains analysée, chaque échantillon a été divisé en sous-échantillons de 600 ml. Cependant, à l'intérieur de la chambre de mesure, la totalité des grains



ne sont pas analysés. En effet, la fenêtre de mesure est plus petite que la cellule de mesure et environ la moitié de l'échantillon est réellement analysé. Cette configuration n'est pas problématique pour définir certains critères comme la teneur en protéines ou en eau, qui nécessitent seulement l'analyse d'une portion significative de l'échantillon. En revanche, pour déterminer des taux d'infestations, il est important que la totalité de l'échantillon soit analysée. Avec l'Infratec NOVA, il est possible que le ou les insectes présents dans l'échantillon ne soient pas passés devant la fenêtre de mesure. Le risque est d'autant plus important pour les faibles taux d'infestation.

Les différences de performances peuvent également s'expliquer par la différence des plages de longueurs d'ondes entre les deux appareils. Le spectromètre Infratec NOVA couvre le visible et le très proche infrarouge avec une gamme allant de 400 à 1100 nm. Alors que le PSS a une gamme spectrale dans le proche infrarouge de 1100 à 2100 nm. Ridgway et Chambers (1996) ont utilisé le NIRS pour détecter des larves d'insectes dans des grains de blé individuel et des insectes externes dans des échantillons en vrac. Leur étude a montré que la présence de chitine dans les tissus d'insectes joue un rôle dans la détermination d'infestations externes ou internes. Les spectres d'hexamère de chitine et de cuticule d'insecte broyée présentent des pics d'absorption autour de 1400-1500 nm (Dowell *et al.*, 1999). Concernant les formes « cachées », étant donné qu'il n'y a pas de différences visibles entre les grains infestés ou non, la plage de 400 à 700 nm n'intervient pas dans leur détection (Dowell *et al.*, 1998). De plus, Paliwal *et al.* (2004) ont utilisé un spectromètre de laboratoire avec une plage spectrale allant de 400 à 2500 nm pour prédire des niveaux d'infestations d'insectes (*R. dominica* et *S. oryzae*) à différents stades de croissance dans des échantillons de grains de blé. Pour l'infestation par *R. dominica*, les coefficients bêta du modèle PLS développé indique l'importance des longueurs d'ondes 1027, 1214, 1938 et 2244 nm. Concernant l'infestation par *S. oryzae*, les pics positifs et négatifs se situent à 852, 1132, 1200, 1408, 1668, 1884, 2102 et 2302 nm. La gamme spectrale du PSS paraît donc plus appropriée pour répondre à la problématique de notre étude.

Quel que soit le spectromètre utilisé, la céréale et l'espèce des insectes, les performances de quantification obtenues pour les insectes adultes vivants sont similaires à celles obtenues pour les insectes adultes morts. Ces résultats vont dans le sens de ceux présentés dans l'étude menée par Maguirang *et al.* (2003) sur l'utilisation de la SPIR pour différencier des grains sains et des grains infestés par *S. oryzae*. Ils ont montré que les performances de classification des grains contenant des larves vivantes ou mortes sont similaires que les modèles soient développés à partir de larves vivantes ou de larves mortes. Aucune étude ne permet de déterminer si la SPIR permettrait de distinguer des insectes adultes des insectes morts, quelle que soit leur forme, alors que cette information est pertinente pour l'interprétation du résultat par les opérateurs.

La quantification des formes « cachées » est bien moins performante que celle des formes adultes. Cette différence peut s'expliquer par la taille très variable des « formes cachées » en fonction du stade larvaire et de l'espèce d'insectes. Les travaux menés par Maguirang *et al.* (2003) montrent que plus le stade de développement est avancé, plus la précision de la détection par SPIR est importante. Dans leur étude, Paliwal *et al.* (2004) n'ont pas réussi à différencier les différents niveaux d'infestation par SPIR lorsque l'insecte (*S. oryzae*) est au stade d'œuf dans le grain. D'après eux, l'impossibilité de détecter des œufs serait peut-être due à leur masse insuffisante pour altérer la composition chimique du grain.

La forte dégradation des performances des calibrations sur les échantillons « naturels » peut s'expliquer par le fait que les calibrations ont été déterminées espèce par espèce alors qu'il est très peu probable qu'une seule espèce soit présente dans un échantillon naturellement infesté. En l'occurrence, dans les enquêtes ARSAN, le nombre d'espèces par échantillon peut atteindre 9, les espèces pouvant présenter des tailles très différentes, de moins d'un millimètre (Psocoptère) à près de 4 mm (*S. granarius*). Cette voie de quantification n'est donc peut-être pas adaptée à la problématique du terrain justifiant la réalisation de classification présence/absence d'insectes.



4.2. Classification des insectes (présence/absence)

Avec une précision du modèle de 95 %, le spectromètre Infratec NOVA semble pouvoir différencier les échantillons de blé infestés par *S. oryzae* des échantillons sans insectes. Parmi les 216 échantillons contenant des insectes du lot de validation, 213 échantillons sont classés « présence » par le modèle mais 3 échantillons sont classés « absence ». Les 3 échantillons mal classés sont issus de la base de données enquête FERME. Concernant les échantillons sans insectes de la base de validation, 197 échantillons sont classés « absence » par le modèle et 19 classés « présence ». Les échantillons mal classés correspondent à l'ensemble des échantillons témoins (sans insectes) de la base de données des échantillons infestés « artificiellement » et une petite partie des échantillons sans insectes issus des parcelles ARVALIS.

Concernant le spectromètre PSS, 95 % des échantillons sont bien classés par le modèle retenu. Parmi les 212 échantillons contenant des insectes, 209 échantillons sont classés « présence » par le modèle mais 3 échantillons sont classés « absence ». Les échantillons mal classés proviennent de la base de données ARSAN 2023. Concernant les échantillons sans insectes du lot de validation, 192 échantillons sont classés « absence » par le modèle et 20 classés « présence ». Les échantillons mal classés correspondent aux échantillons témoins (sans insectes) de la base de données des échantillons infestés « artificiellement », et une grande partie des échantillons « naturels » (ARSAN 2023&2024). En revanche, la totalité des échantillons de la base de données sans insectes issus des parcelles ARVALIS sont bien classés par le modèle. L'analyse plus détaillée de la matrice de confusion met en doute que la classification soit réellement basée sur la présence ou non d'insectes. Il semblerait que la classification porte sur la base de données d'origine (échantillons infestés « artificiellement » vs échantillons ARVALIS).

Afin de regarder s'il y a des différences spectrales entre les bases de données, une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée (figure 1).

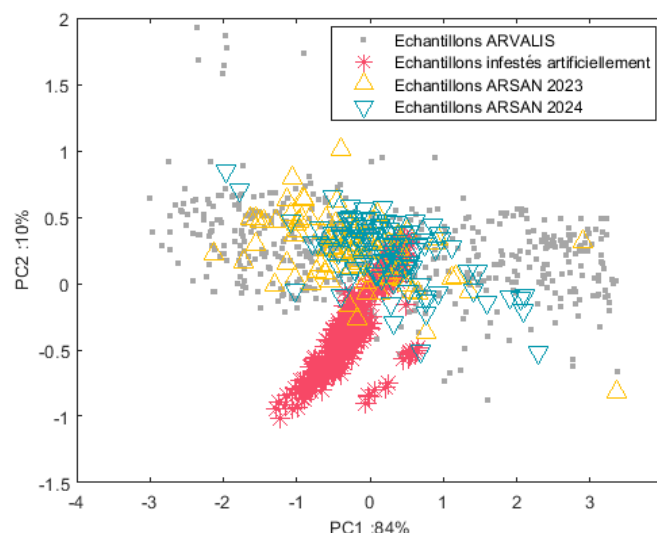


Figure 1 : Nuage de points représentant les scores des deux premières composantes de l'analyse en composantes principales des différentes bases de données : échantillons issus des parcelles ARVALIS, échantillons infestés « artificiellement », échantillons des enquêtes ARSAN 2023 et 2024.

Description de la figure 1

La figure montre que les nuages de points des échantillons issus des parcelles ARVALIS et des enquêtes ARSAN 2023 et 2024 sont superposés. Le nuage de points des échantillons infestés



« artificiellement » a une variabilité perpendiculaire à celle des nuages de points des autres échantillons.

L'analyse des deux premières composantes de l'ACP (représentant 95 % de la variabilité) met en avant un comportement similaire entre les nuages de points des échantillons issus des enquêtes ARSAN 2023, ARSAN 2024 et des parcelles ARVALIS. En revanche, le nuage de points des échantillons infestés « artificiellement » se comporte différemment. Cette différence peut en partie s'expliquer par le fait que tous les échantillons infestés « artificiellement » sont créés à partir d'une seule variété de blé issue d'une même récolte, contrairement aux échantillons des enquêtes ARSAN 2023, ARSAN 2024 et des parcelles ARVALIS. Afin d'éviter ce problème, lors de travaux futurs, il paraît plus judicieux d'analyser avec le spectromètre les mêmes échantillons avant et après infestation. Ainsi, la variabilité (variétale et années de récolte) sera la même pour la classe présence d'insectes et pour la classe absence d'insectes.

5. Conclusion

Les résultats obtenus en classification ne montrent pas de gain significatif en termes de performance par rapport au tamisage pratiqué par les opérateurs, en particulier lorsque la mesure est effectuée à l'aide de l'Infratec NOVA. Par ailleurs, l'échantillon analysé avec ce type d'appareil est limité en taille, ce qui ne permet pas d'envisager une amélioration des performances globales de l'analyse par une augmentation de la taille de l'échantillon analysé. L'utilisation de ce type d'appareil paraît donc peu appropriée pour améliorer la détection des lots infestés lors d'une réception ou d'une expédition de grains dans un silo. L'utilisation d'un appareil permettant des analyses sur flux offre une rupture technologique qui à l'inverse permet d'envisager une révision des procédures d'échantillonnage pour améliorer globalement la performance de la détection. En ce sens, l'utilisation du PSS paraît plus adaptée au cas d'usage considéré, les performances obtenues dans nos travaux étant par ailleurs meilleures que celles obtenues avec l'Infratec NOVA, indépendamment de la taille de l'échantillon. La sensibilité de la mesure est excellente, mais l'analyse détaillée des échantillons mal classés incite à la prudence quant à ce résultat. L'étude doit être poursuivie pour confirmer la capacité du PSS à classer correctement les lots selon leur infestation, et ce quelle que soit la forme de l'infestation (adultes vivants, mort ou larves) en particulier sur des échantillons présentant une plus grande diversité d'espèces d'insectes, c'est-à-dire plus représentatifs des conditions réelles.

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

Katell Crépon : <https://orcid.org/0000-0003-2509-6515>

Marlène Faure : <https://orcid.org/0009-0002-9878-3906>



Contributions des auteurs

Marlène FAURE : (curation des données, analyse formelle, méthodologie, rédaction – version originelle)

Faten AMARRI : (curation des données, analyse formelle, méthodologie, supervision)

François CHAMBON : (rédaction – révision et correction)

Séverine MAUDEMAIN : (administration du projet, validation)

Katell CREPON : (conceptualisation, fourniture de ressources, rédaction – révision et correction)

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler conseiller, posséder de parts, recevoir pas 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 Catherine Renaud (ARVALIS) pour la réalisation des élevages d'insectes, la préparation des échantillons et le dénombrement des émergences ainsi que Isabelle Roux (ARVALIS) pour l'acquisition des spectres.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a reçu le soutien financier du ministère de l'agriculture et de l'alimentation (CASDAR 21ART4027861). La responsabilité du ministère chargé de l'agriculture ne saurait être engagée.

Références bibliographiques

AFNOR (2020). NF EN 15948 : Céréales - Détermination de la teneur en eau et en protéines - Méthode utilisant la spectroscopie dans le proche infrarouge sur des grains entiers.

Agelet L. E., & Hurburgh C. R. (2010). A tutorial on near infrared spectroscopy and its calibration. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 40(4), 246–260.

Bilgili V., van Es H., Akbashi F., Durak A., & Hively W. (2010). Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy for Assessment of Soil Properties in a Semi-Arid Area of Turkey. *Journal of Arid Environments*, 74, 229-238

Codex Alimentarius (1995). Norme pour le blé et le blé dur. CODEX-STAN 199-1995. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/fr/>

Crépon K. (2022). Comparaison de 4 méthodes de détection d'insectes. https://www.arvalis.fr/sites/default/files/medias/pdf/2023-05/Stockage_n17_fevrier2022.pdf, consulté le 03/12/2025.

Dowell F. E., Throne J. E., & Baker J. E. (1998). Automated Nondestructive Detection of Internal Insect Infestation of Wheat Kernels by Using Near-Infrared Reflectance Spectroscopy. *Journal Of Economic Entomology*, 91(4), 899-904. <https://doi.org/10.1093/jee/91.4.899>

Dowell F.E., Throne J.E., Wang D., & Baker J. (1999). Identifying stored-grain insects using near-infrared spectroscopy. *Journal Of Economic Entomology*, 92, 165e169.

Dowell F. E., Maghirang E. B., Xie F. E. N. G., Lookhart G. L., Pierce R. O., Seabourn B. W., ... & Chung O. K. (2006). Predicting wheat quality characteristics and functionality using near-infrared spectroscopy. *Cereal chemistry*, 83(5), 529-536.

Du Z., Tian W., Tilley M., Wang D., Zhang G., & Li Y. (2022). Quantitative assessment of wheat quality using near-infrared spectroscopy: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2956-3009.

Huang M., Wan X., Zhang M., & Zhu Q. (2013). Detection of insect damaged vegetable soybeans using hyperspectral transmittance image. *Journal of Food Engineering*, 116, 45–49.



INCOGRAIN, 2021. Addendum technique n° 1 pour la vente de toutes céréales. Syndicat de Paris, édition du 1^{er} juillet 2021.

Jarrewat P., & Choomjaihan P. (2014). Feasibility study on estimation of rice weevil quantity in rice stock using near infrared spectroscopy technique. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 7, 1-8.

Jian F., Jayas D. S., & White N. D. (2014). How many kilograms of grain per sample unit is big enough? Part II—Simulation of sampling from grain mass with different insect densities and distribution patterns. *Journal of stored products research*, 56, 67-80.

Johnson J. B. (2020). An overview of near-infrared spectroscopy (NIRS) for the detection of insect pests in stored grains. *Journal of Stored Products Research*, 86, 101558.

Karunakaran C., Paliwal J., Jayas D.S., & White N.D.G. (2005). Evaluation of soft X - rays and NIR spectroscopy to detect insect infestations in grain. *ASAE Paper No. 053139*. St. Joseph, MI: ASAE.

Maghirang E. B., Dowell F. E., Baker J. E., & Throne, J. E. (2002). Detecting single wheat kernels containing live or dead insects using near infrared reflectance spectroscopy. *ASAE Paper No. 023067*. Chicago, IL : ASAE.

Maghirang E.B., Dowell F., Baker J., & Throne J.E. (2003). Automated detection of single wheat kernels containing live or dead insects using near infrared reflectance spectroscopy. *Transactions of the ASAE*, 46, 1277-1282.

Manley M. (2014). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: Non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews*, 43(24), 8200–8214

Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi (2010). Arrêté du 1er juillet 2010 relatif aux humidimètres pour grains de céréales et graines oléagineuses. JORF n°0179 du 5 août 2010.

OIML, 1984. Humidimètres pour grains de céréales et graines oléagineuses. OIML R 59 Edition 1984 (F)

Paliwal J., Wang W., Symons S., & Karunakaran C. (2004). Insect species and infestation level determination in stored wheat using near-infrared spectroscopy. *Canadian Biosystems Engineering*, 46, 7.17-7.24.

Ravikanth L., Singh C. B., Jayas D. S., & White N. D. (2015). Classification of contaminants from wheat using near-infrared hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 135, 73–86.

Ridgway C., & Chambers J. (1996). Detection of external and internal insect infestation in wheat by near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of the Science Food and Agriculture*, 71, 251-264.

Throne J. E., Floyd E. D., Mandoza J. P., & Baker J. E. (2002). Entomological applications of near-infrared spectroscopy. *Proceedings of the 8th International Working Conference on Stored Product Protection*.

Tomasini B., & Fleurat-Lessard F. (2018). Procédé acoustique de détection précoce et de prévention de l'infestation des céréales stockées par les insectes. In *Proceedings of Phloème - les biennales de l'innovation céréalière*. 24-25 janvier 2018. Paris.

USDA (2020). Grain Inspection Handbook Book II Grain Grading Procedures. United States Department of Agriculture Agricultural Marketing Service Federal Grain Inspection Service, October 2020.

Pour citer cet article : Marlène FAURE, Faten AMMARI, François CHAMBON, Séverine MAUDEMMAIN & Katell CREPON, 2026 - Détection des insectes ravageurs des grains dans les céréales : 2. Performances de la Spectroscopie en Proche Infrarouge (SPIR) pour détecter et quantifier des insectes. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol112-art15>



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.



Des outils numériques adaptés pour la surveillance, l'aide à la décision et le pilotage de systèmes de cultures agroécologiques diversifiés en territoires ultramarins

Rachel GRAINDORGE¹, Camille BORTOLI¹, Léo KERAUDREN², Bruno PARIS³

¹ Armefflor, 1 chemin de l'IRFA, 97410 Saint-Pierre, La Réunion

² Astredhor, Institut Sophia Agrobiotech, 400 route des Chappes, 06903 Sophia Antipolis Cedex

³ Chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes, MIN Saint Augustin, 06296 Nice

Correspondance : rachel.graindorge@armefflor.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art16>

Résumé

Face à la réduction des solutions phytosanitaires chimiques, les agriculteurs, notamment en zones tropicales, s'orientent vers la protection agroécologique et la diversification des cultures. Ces systèmes, souvent complexes (maraîchage et arboriculture), nécessitent des outils adaptés pour leur suivi. Le projet S@MEDIT a mobilisé le réseau DEPHY EXPE STOP pour adapter l'outil S@M, facilitant l'analyse et la visualisation des données épidémiologiques afin d'appuyer la prise de décision. Face aux limites de S@M, l'outil Baco a été développé pour offrir des fonctionnalités avancées. Le retour d'expérience montre également que l'expertise humaine joue un réel rôle de support pour ces outils d'aide à la décision.

Mots-clés : Essai système, protection des cultures, aide à la décision

Abstract: Adapted digital tools for monitoring, decision support and management of diversified agroecological cropping systems in overseas territories

Faced with the reduction of chemical pesticides, farmers, particularly in tropical areas, are turning to agroecological protection and crop diversification. These often complex systems (market gardening and arboriculture) require appropriate monitoring tools. The S@MEDIT project mobilized the DEPHY EXPE STOP network to adapt the S@M tool, facilitating the analysis and visualization of epidemiological data to support decision-making. Given the limitations of S@M, the Baco tool was developed to offer advanced functionalities. Experience has also shown that human expertise plays a crucial supporting role for these decision-support tools.

Keywords: systemic approach, crop protection, decision support tool

1. Introduction

La réglementation sur l'utilisation des produits phytosanitaires devient plus restrictive et les solutions phytopharmaceutiques de synthèse à disposition des agriculteurs diminuent. Aussi, les modes de productions évoluent et la reconception des systèmes de culture nécessite de mobiliser des méthodes alternatives à la lutte chimique en se basant sur les principes de l'agroécologie. Dans son approche agronomique, la protection agroécologique des cultures combine un ensemble de pratiques pour la mise au point de stratégies à appliquer sur le terrain (Deguine *et al.*, 2020). Les leviers généralement mobilisés sont les mesures prophylactiques, la lutte physique, la diversification végétale, la lutte biologique par conservation et/ou par augmentation et, en dernier lieu, le recours aux produits phytosanitaires. De fait, le développement des pratiques agroécologiques implique de repenser les



façons de cultiver en s'intéressant notamment aux interactions qui régissent les populations d'êtres vivants aux différents niveaux trophiques de l'agroécosystème.

Comme le précise R. Paut dans ses travaux (2021), ces systèmes de culture diversifiés, à l'image des vergers - maraîchers sont des systèmes complexes car ils combinent les difficultés de plusieurs cultures, ainsi que leurs interactions, ce qui rend leur gestion plus exigeante. En effet, la diversification des cultures implique de maîtriser les itinéraires culturaux d'espèces végétales variées (fruits, légumes feuilles, légumes racines, légumes fruits, plantes de service...) et d'avoir un matériel de travail au champ adapté et polyvalent. Les techniques et pratiques culturales pour la conduite d'espèces arboricoles pérennes diffèrent des pratiques culturales d'espèces maraîchères pour lesquelles des rotations doivent être appliquées. De plus, la multiplicité des cultures mais également des éléments constitutifs du système de culture (haies, bandes fleuries...) augmente potentiellement la diversité d'arthropodes sur ces zones. Pour ces aspects, les producteurs doivent élargir leur champ de compétences et de connaissances. Ainsi, chaque parcelle cultivée constitue un agroécosystème spécifique avec une diversité biologique propre et leur pilotage nécessite des arbitrages constants entre objectifs et contraintes, dans un contexte où les processus biologiques et leurs dynamiques sont souvent imprévisibles. Bon nombre d'agriculteurs expriment le besoin de disposer de solutions personnalisées adaptables à chaque contexte agro-socioéconomique.

Aussi, aider et accompagner les agriculteurs à la transition agroécologique ou à reconcevoir leur système de culture peut s'appuyer sur l'utilisation d'outils de surveillance et de pilotage. Cet article illustre comment la mise au point et l'adaptation d'un outil numérique a pu contribuer au pilotage de systèmes de culture diversifiés n'ayant plus recours aux pesticides de synthèse.

2. Contexte

Les territoires ultramarins comportent de nombreuses spécificités pouvant complexifier le pilotage de systèmes de cultures ou, à plus petite échelle, de cultures.

En effet, soumis à des climats généralement tropicaux, ces territoires offrent des conditions très favorables au développement de nombreux ravageurs et maladies des cultures. La pression phytosanitaire dans ces contextes est permanente avec des températures et hygrométries propices à leur développement et leur maintien. Par ailleurs, l'émergence et l'introduction de nouvelles problématiques phytosanitaires est fréquente et impose d'anticiper la mise en œuvre de solutions existantes et efficaces rapidement. Cependant, l'éloignement des territoires apporte des contraintes et enjeux logistiques importants ne permettant pas toujours d'apporter des solutions immédiates. L'accessibilité aux solutions peut donc parfois être restreinte du fait d'un manque de disponibilité. Tous ces éléments rendent. Pour améliorer la résilience des systèmes agricoles et réguler les attaques de ravageurs, Bianchi *et al.* (2006) ont démontré que la diversification des cultures au sein du système était un levier majeur. Cette méthode préventive paraît être une solution adaptée aux contextes agricoles insulaires tropicaux et a été évaluée au cours du projet DEPHY EXPE ST0P (Systèmes de culture Tropicaux Zéro Pesticides de synthèse) (2018-2023) (Graindorge *et al.*, 2022). Cependant, la prédiction et surtout la gestion des contaminations s'avèrent difficiles dans les systèmes de culture complexes et les approches classiques montrent rapidement leur limites (modèles prédictifs, calendriers...).

2.1. Contextualisation sur l'étude de cas Réunionnaise

A La Réunion, le projet DEPHY EXPE ST0P avait pour objectif de développer les approches de la protection agroécologique des cultures en expérimentant, sur trois observatoires pilotés, des systèmes de culture diversifiés, mêlant arboriculture et maraîchage, n'ayant plus recours aux pesticides de synthèse. Cependant, l'interprétation des informations relatives aux cortèges complexes de bio-



agresseurs et aux dynamiques des différentes populations d'arthropodes sur ces systèmes, pouvaient présenter des difficultés d'adaptation des pratiques culturales pour répondre aux enjeux de viabilité économique, sociale et environnementale des systèmes testés (Graindorge *et al.*, 2024).

Par ailleurs, pour accompagner les producteurs dans une démarche de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, l'UMT Fiorimed a travaillé au développement d'une plateforme web appelée S@M. Cet outil, d'abord mis au point pour aider les horticulteurs au pilotage de la protection intégrée dans les serres de production ornementale, a progressivement été adapté à d'autres secteurs tels que le maraîchage (notamment la production de tomates avec le projet SmartIPM) et l'arboriculture méditerranéenne (oléiculture pour IS@M) (Paris *et al.*, 2017). Mais l'outil avait été utilisé jusque-là sur des systèmes de culture peu diversifiés.

Dans ce contexte, le projet S@MEDIT (Adapter et développer des modules S@M pour le suivi Epidémiologique et l'aide à la décision dans les systèmes de culture Diversifiés en milieu Tropical) s'est appuyé sur le réseau d'observatoires pilotés du projet ST0P pour adapter l'outil S@M à des systèmes de culture complexes et apporter ainsi une aide au pilotage de ces systèmes innovants. Ce projet multipartenaire avait trois objectifs définis, affiner la compréhension des dynamiques et régulations biologiques à l'échelle de parcelles agricoles diversifiées, renforcer et faciliter la gestion agroécologique des systèmes de culture maraîchers et arboricoles ainsi qu'accélérer et dynamiser la conversion des agriculteurs à la Protection Intégrée des cultures et à la Protection Agroécologique des Cultures.

3. Matériel et Méthode

3.1. Descriptif des trois observatoires pilotés suivis

Pour tester et améliorer les modules numériques de l'outil S@M, les suivis ont été réalisés sur les trois observatoires pilotés du projet ST0P répartis sur les stations expérimentales du CIRAD, organisme de recherche agronomique, de l'Armeflhor, institut technique agricole et de l'EPL Forma'Terra, organisme d'enseignement agricole (Figure 1). Sur ces parcelles, les règles de décision n'étaient pas figées ce qui conférait à ces systèmes de culture un caractère très exploratoire. Ils étaient de fait conduits de manières différentes, non comparables, mais devaient répondre à la même problématique de proposer des systèmes de culture viables sur les aspects économiques, sociaux et environnementaux en s'affranchissant de l'utilisation de pesticides de synthèse.

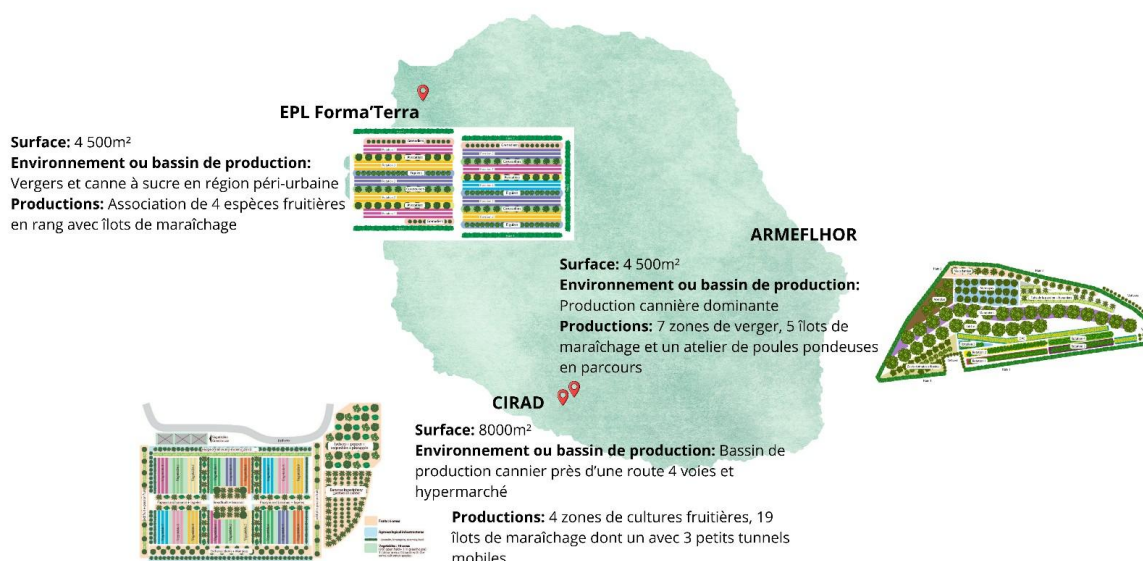


Figure 1 : Localisation et description des observatoires pilotés suivis au cours du projet S@MEDIT

Description de la figure 1

La figure représente la carte de l'île de La Réunion situant les trois observatoires pilotés du projet DEPHY EXPE STOP qui sont les stations expérimentales de l'Armefflor, du CIRAD et le l'EPL Forma'Terra de Saint Paul. Pour chaque observatoire, les grandes caractéristiques telles que la surface, l'environnement ou bassin de production et les zones de production (nombre et catégories de cultures) sont précisées.

3.2. Les outils d'aide à la surveillance et au pilotage mobilisés sur les observatoires pilotés

Sur ces observatoires pilotés, différents dispositifs physiques et outils numériques ont été utilisés pour contribuer à la surveillance sanitaire et à la conduite de ces systèmes de culture très diversifiés.

3.2.1. Outils numériques

Plateforme KAROBIO

KAROBIO est une plateforme numérique pour la traçabilité et d'aide à la décision pour les rotations maraîchères en Agriculture Biologique (AB). Cette plateforme numérique, développée par l'Armefflor en collaborations avec les agriculteurs et les conseillers techniques, permet aux maraîchers d'y saisir leur traçabilité et d'obtenir des conseils au niveau de la planification de leurs cultures. Pour préserver la fertilité des sols, gérer les pressions phytosanitaires, tout en optimisant les rendements, les pratiques doivent être diversifiées et réfléchies et la plateforme vise à fournir des recommandations personnalisées et adaptées aux spécificités locales des exploitations agricoles. Cet outil a été utilisé sur deux des trois observatoires pilotés du projet STOP (Figure 2).

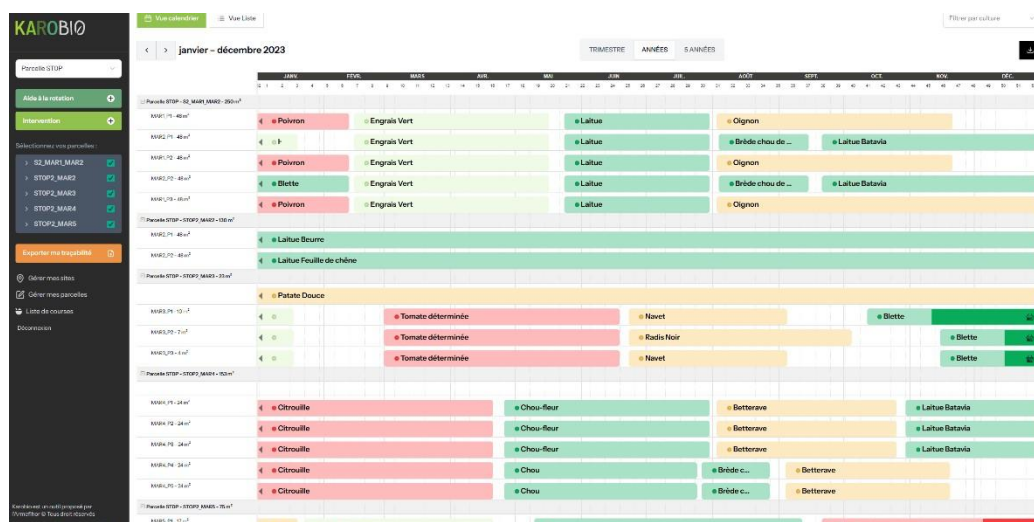


Figure 2 : Aperçu de la plateforme KAROBIO où toutes les zones de culture de l'observatoire piloté de l'Armeffhor y sont définies ainsi que les successions culturales de l'année 2023.

Description de la figure 2

La figure est une capture d'écran de la plateforme KAROBIO. Un encart sur la gauche de la figure propose des menus déroulants qui permettent de sélectionner une ou plusieurs zones du système de culture. La fenêtre principale propose une visualisation sur l'année, détaillée par mois, les successions culturales pour chaque zone sélectionnée. Une couleur est attribuée pour chaque famille végétale permettant de visualiser si la rotation culturale est bien respectée.

S@M

L'outil d'aide à la décision S@M permet l'identification d'observations propres à chaque parcelle ou culture. Les variables définies préalablement sont observées sur chaque système de culture ce qui permet de tracer l'état sanitaire de chaque zone du système et d'obtenir une représentation graphique spatio-temporelle des ravageurs, pathogènes et auxiliaires des cultures (Figure 3). Les représentations obtenues permettent alors d'anticiper ou prévoir des tendances épidémiologiques sur le système de culture.

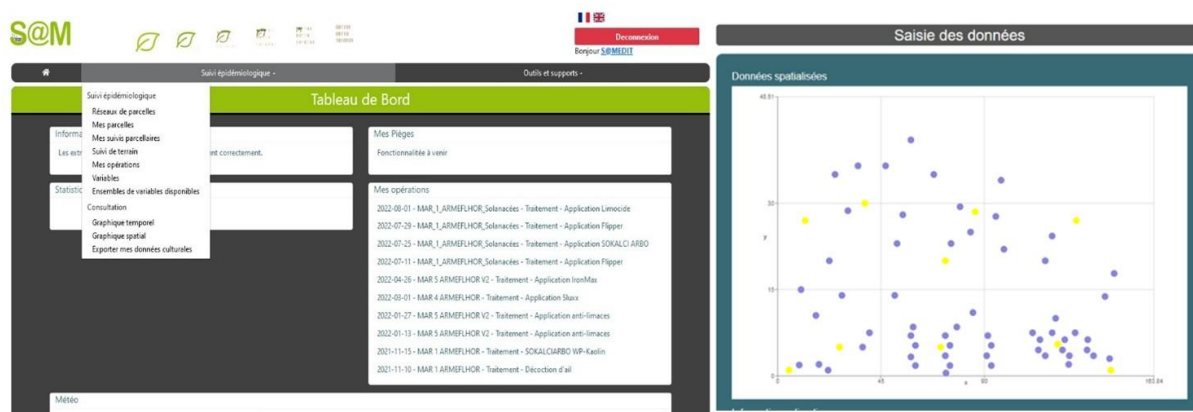


Figure 3 : Interface de la plateforme S@M (à gauche) et répartition dans l'espace des points d'observation sur le système de culture ST0P de l'Armeffhor (à droite).

Description de la figure 3

La figure 3 représente des captures d'écran montrant des exemples de visualisation de la plateforme S@M. Sur la gauche, on retrouve le tableau de bord de la plateforme qui permet de retrouver, pour les parcelles suivies, les informations, les statistiques et les opérations effectuées. Cette capture d'écran laisse également visible un menu déroulant proposant les



actions relatives au suivi épidémiologique telles que : saisie d'une parcelle, sélection d'une parcelle, type de suivi, sélection des variables ou encore type de visualisation souhaitée. Sur la droite de la figure, la capture d'écran montre une des représentations graphiques qu'il est possible d'obtenir avec l'analyse des données de suivis. Dans cet exemple, le graphique représente spatialement la répartition des points de suivi défini. Les points sont de couleurs différentes ce qui permet d'identifier si une donnée a été collectée ou non sur tel ou tel point d'observation.

3.2.2. Stations météorologiques et capteurs spécifiques

Des stations météorologiques connectées ont été installées sur chacun des observatoires pilotés. Ces stations sont munies d'un ensemble de capteurs permettant de mesurer : la température, l'hygrométrie, la pluviométrie, la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique, la puissance du rayonnement solaire et le rayonnement photosynthétiquement actif (le rayonnement solaire utilisable pour la photosynthèse). Couplées aux données d'observation épidémiologiques de terrain, réalisées à l'échelle de chaque parcelle, les données abiotiques enregistrées grâce aux capteurs visent à permettre l'établissement de modèles prédictifs pour diverses variables (Paris *et al.*, 2019).

3.2.3. Outils informatiques

Pour l'évaluation multicritère des systèmes de culture, les outils mis à disposition dans le cadre du réseau national DEPHY EXPE n'étaient pas adaptés à des dispositifs très diversifiés à l'image des observatoires pilotés du projet STOP. En effet, la définition de multiples cultures sur une même zone, et donc sur une même surface, n'était pas possible. De plus, les cultures tropicales ou encore les matériels agricoles parfois spécifiques n'étaient pas toujours définis dans les menus déroulants rendant le calibrage et la description de nos systèmes de culture sur l'outil très compliqués. Ainsi, un tableur Excel complet a été élaboré de manière à utiliser un outil commun aux trois observatoires. Cet outil visait le recensement de toutes les interventions ayant eu lieu sur chacun des observatoires pilotés. Le renseignement de nombreuses informations, telles que les quantités et coûts des intrants, les rendements commercialisables, a permis le calcul d'indicateurs de performance. Ce tableur a contribué à la caractérisation et l'évaluation multicritère des systèmes de culture différents et exploratoires en s'appuyant sur des bases et calculs communs.

3.3. Focus sur les suivis épidémiologiques

Les suivis épidémiologiques avaient pour objectifs de réaliser une surveillance fréquente et fine des différents systèmes de culture pour permettre de détecter précocement les ravageurs et maladies et cartographier des zones à risque sur les parcelles. Ils ont été réalisés chaque semaine sur les trois observatoires pilotés.

Les protocoles de suivis épidémiologiques ont été élaborés lors de sessions collectives de travail entre les différents partenaires (Astredhor - UMT Fiorimed², FDGDON, EPL Forma terra, Chambre d'agriculture de La Réunion, CIRAD et Armefilhor). Aussi, la définition des variables, du nombre de points d'observations ainsi que des techniques d'observations s'est basée sur des méthodes d'échantillonnage rapide (« Quicksampling ») développées lors de projets antérieurs (Bout *et al.*, 2009 ; Bout *et al.*, 2010 ; Paris *et al.*, 2019) permettant alors une série d'observations rapides sans matériel d'observation particulier. Cette méthode représente un compromis entre le temps et l'exigence des observations et l'exploitabilité des données pour le pilotage agronomique.

Deux niveaux complémentaires d'observation ont été définis, l'échelle de la culture et l'échelle du système de culture. Les suivis spécifiques à l'échelle de la culture ont été réalisés sur des productions définies et sélectionnées selon leur présence dans les observatoires pilotés STOP, leur importance dans la production réunionnaise et l'importance des problématiques phytosanitaires associées. Par conséquent, pour cette échelle de suivi, les variables retenues et les classes d'abondance associées ont été adaptées à chaque culture afin d'optimiser la précision des observations. À l'échelle du système de culture, le suivi cible l'ensemble des zones constituant la parcelle (zones de cultures, haies, dispositifs agroécologiques...), avec un point d'observation par zone pour appréhender la dynamique



globale des populations. Les variables suivies à cette échelle correspondent aux bioagresseurs et auxiliaires principaux et fréquemment observés à La Réunion et sont mesurées avec des classes d'abondance. Celles-ci correspondent à une quantité d'individus estimée qui peut être strictement qualitative (absence, présence, abondance) ou à borne chiffrée (entre 1 et 3, entre 4 et 10). Ces classes d'abondance sont calibrées en fonction des caractéristiques de chaque bioagresseur (visibilité, démographie, seuil de nuisibilité) afin d'avoir une information suffisamment précise pour pouvoir anticiper l'évolution des épidémies. Enfin, des points spéciaux ont été ajoutés au dispositif pour le suivi des pièges glu et des pièges à mouches, garantissant une couverture robuste du système de culture dans son ensemble.

4. Résultats

4.1. Acquisition de données de suivis et traitement de l'information

Les données collectées au moyen de la plateforme S@M permettent à l'utilisateur de faire rapidement et précisément le diagnostic épidémiologique de la parcelle cultivée ou du système de culture selon l'échelle choisie (Bortoli C et Graindorge R., 2022). En effet, les données saisies sont structurées de manière à proposer des sorties graphiques synthétiques.

A l'échelle du système de culture, les informations obtenues permettent d'avoir une image globale de la situation sanitaire à un instant t. Chaque variable est représentée spatialement de façon quantitative. La cartographie et la géolocalisation n'étant pas disponibles dans l'outil, les éléments constitutifs du système de culture (haies, bandes fleuries, cultures...) ne sont pas représentés. L'expérimentateur connaissant la parcelle suivie peut cependant faire le lien entre les points et la zone de relevé pour interpréter les sorties graphiques. A titre d'exemple, la figure 4 représente la répartition des populations de coccinelles sur le système de culture de l'observatoire piloté de l'EPL Forma'Terra. Chaque point d'observation est lié à une zone de la parcelle. Sur le graphique, les points représentant une forte abondance de coccinelles se situaient au niveau de haies ou dispositifs agroécologiques.

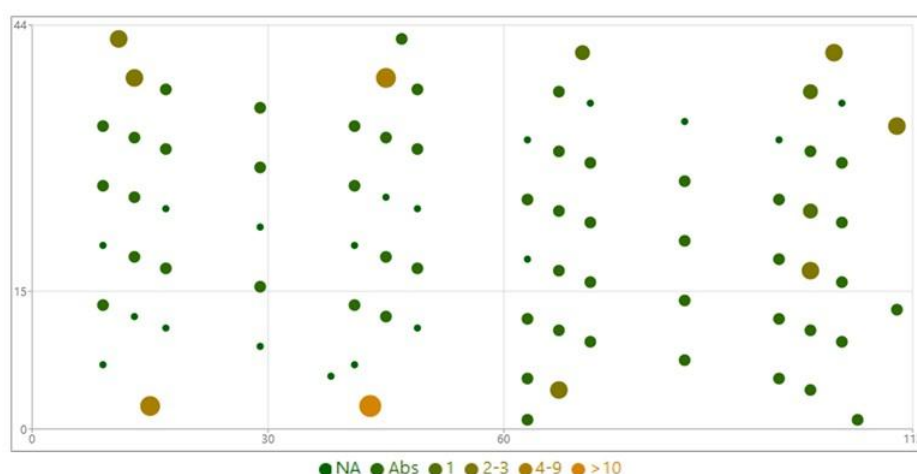


Figure 4 : Sortie graphique de l'outil S@M représentant la dynamique spatiale des coccinelles observées sur le système de culture de l'EPL Forma'Terra (20/04/2022).

Description de la figure 4

La figure représente un graphique obtenu avec l'outil S@M. Sur ce graphique, les axes des x et y permettent d'avoir une représentation spatiale des points d'observation. L'axe des abscisses est gradué de 0 à 112 et l'axe des ordonnées de 0 à 44, ce qui correspond respectivement à la longueur et à la largeur de la parcelle. Aussi, dans la fenêtre graphique, les

points sont présentés sur fond blanc et répartis de manière à simuler leur répartition comme s'ils étaient positionnés sur une photo aérienne. Selon la donnée saisie lors du suivi, les points changent de couleur et de taille afin de mieux visualiser les dynamiques des variables dans l'espace. La taille et la couleur des points changent en fonction de l'abondance de la variable. Un point petit et vert indique que la variable suivie est présente et un point de plus grande taille et rouge indique une forte abondance de la variable sur ce point. Dans l'exemple choisi, nous avons une représentation de la présence des coccinelles sur le système de culture de l'EPL Forma'terra. Les points les plus gros et de couleur chaude (orangée), se situent sur les pourtours de la zone graphique donc en bordure de parcelle.

A l'échelle de la culture, les suivis permettent une représentation évolutive des variables suivies. La figure 5 illustre les populations de thrips observées sur une culture d'oignons conduite sur l'observatoire piloté de l'Armefflor. Les opérations culturales saisies sur la plateforme S@M apparaissent également sur les sorties graphiques. Cette représentation permet de faire le lien entre les actions réalisées et les populations de ravageurs et par conséquent d'ajuster les règles de décision pour le prochain cycle de production.

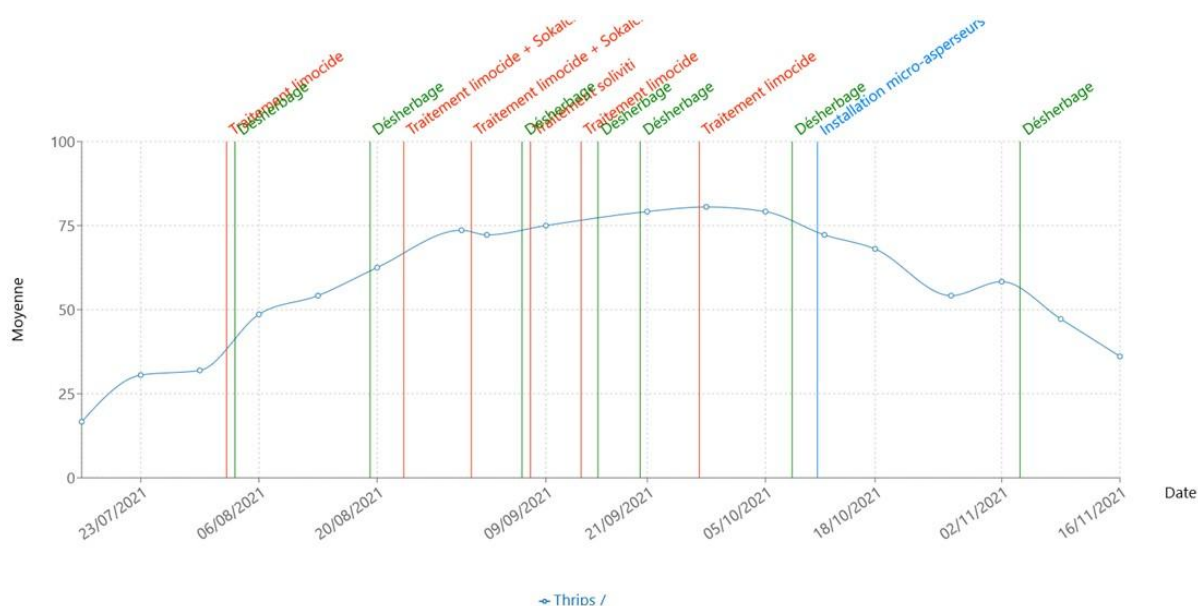


Figure 5 : Sortie graphique de l'outil S@M représentant l'évolution des populations de thrips sur une parcelle d'oignons et les opérations culturales réalisées sur la culture au cours du cycle (Armefflor, Novembre 2021).

Description de la figure 5

La figure 5 représente une courbe bleue qui permet de visualiser la dynamique des populations de thrips au cours du temps, en l'occurrence ici au cours d'un cycle cultural d'oignons. Les dates de suivis sont reportées sur l'axe des abscisses et l'axe des ordonnées représente la moyenne d'abondance de la variable suivie sur une échelle de 0 à 100. Les opérations culturales ayant un impact sur la protection phytosanitaire sont également indiquées au moyen de lignes verticales coupant l'axe des x à leur date de réalisation et le nom des produits utilisés est indiqué sur la partie haute du graphique. Les six traitements phytosanitaires réalisés avec des produits de biocontrôle (LIMOCIDE, SOKALCIARBO WP, SOLIVITI) sont en orange, les opérations de désherbage (au nombre de 7) en vert et les autres opérations culturales en bleu (ici une opération correspondant à l'installation de micro-asperseurs).

Un élément méthodologique important réside dans le fait que l'ensemble des suivis ont été effectués par un unique expérimentateur sur les trois observatoires pilotés. L'utilisation répétée de l'outil sur différents sites par une même personne a alors permis de bien identifier les limites et améliorations nécessaires à apporter à S@M. Ainsi, plusieurs limites ont pu être identifiées comme l'absence de géolocalisation et de cartographie intégrée. De plus, les données climatiques collectées via les capteurs météorologiques n'ont pas pu être valorisées, en raison de contraintes techniques et d'une durée d'acquisition insuffisante pour exploiter les données de suivis épidémiologiques et envisager l'élaboration de modèles prédictifs robustes.

4.2. Valorisation des données par l'établissement de comptes-rendus de suivis

Afin de rendre compte des observations et de l'état sanitaire des systèmes de culture, des comptes-rendus ont été rédigés après chaque suivi de parcelles. Ceux-ci avaient également pour objectif d'informer le pilote de l'observatoire de l'évolution des populations d'auxiliaires, ravageurs ou maladies, d'une semaine à l'autre, par zone d'observation pour les suivis à l'échelle du système de culture (îlot fruitier, maraîcher, dispositifs agroécologiques) et/ou par culture dans le cas des suivis spécifiques (Figure 6).

L'ajout de photographies et de représentations graphiques diverses à ces comptes rendus permet d'appréhender et de visualiser l'évolution de l'état sanitaire de la culture. Ils ont constitué un appui direct à la prise de décision, notamment en facilitant la détection précoce de foyers de bioagresseurs et l'évaluation de l'efficacité des interventions. Dans plusieurs situations, ces éléments ont contribué à ajuster les stratégies de gestion, en particulier dans le cadre de l'utilisation de solutions de biocontrôle. En effet, à titre d'exemple, les suivis spécifiques ont permis de déclencher des interventions en détectant précocement des foyers de thrips sur culture d'oignons. De même, le suivi spécifique de pucerons sur culture de tomates a pu rendre compte de l'efficacité des traitements réalisés. Ainsi, pour certains observatoires, ces rendus ont réellement aidé à la conduite du système de culture. Les données issues des suivis ont également été valorisées dans les Bulletins de Santé du Végétal (BSV) locaux afin de faire un focus sur l'épidémiologie des principaux bioagresseurs de cultures spécifiques observées. Un partenariat a été mis en place avec la Chambre d'Agriculture de La Réunion, en charge de la publication de ces BSV, pour diffuser chaque mois auprès d'un public plus large (agriculteurs, techniciens, expérimentateurs...), un récapitulatif des observations épidémiologiques effectuées sur chacun des observatoires du projet.

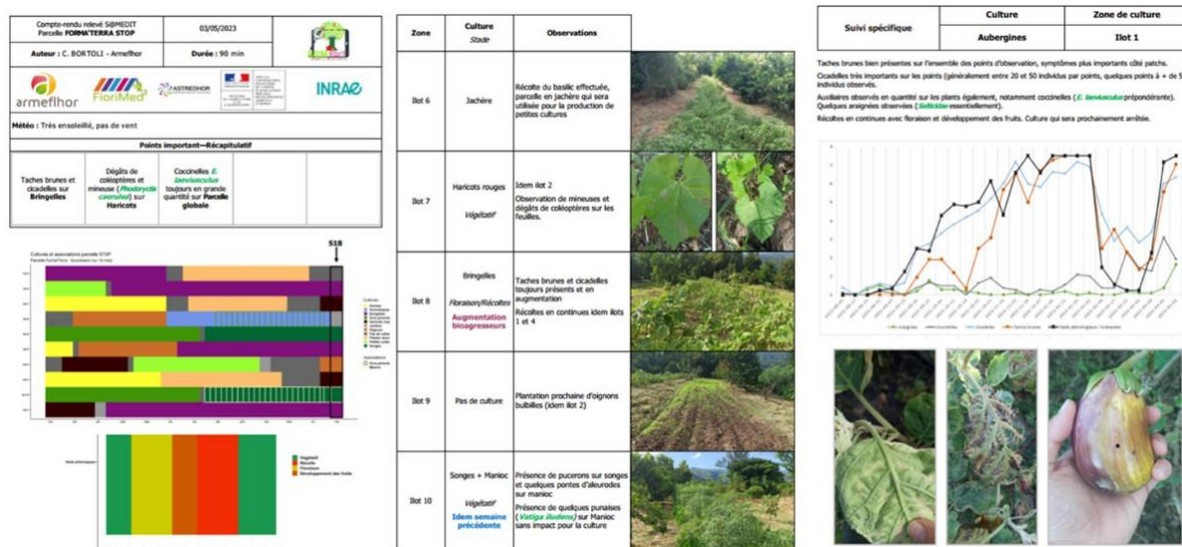


Figure 6 : Extrait d'un compte rendu rédigé à la suite d'un suivi de l'observatoire de l'EPL Forma'Terra.

Description de la figure 6

La figure est divisée en trois parties représentant chacune une page du compte-rendu. A gauche, la première page du compte rendu indique, dans un encart, l'objet du document, l'auteur et la date de rédaction, la durée du suivi, le logo du projet ainsi que les logos des partenaires du projet. Cet encart précise également les conditions météorologiques au moment du suivi et les points importants faisant office de récapitulatif. La deuxième moitié de la page est consacrée à l'illustration d'une part, des successions culturales sur l'année en cours sur chaque îlot ou zone du système de culture et à la succession des stades phénologiques sur l'année du verger de manguiers, également suivi à l'EPL Forma'Terra, d'autre part, ces illustrations permettent de d'avoir une représentation des cultures présentes au moment du suivi.

La deuxième page du compte-rendu (au centre de la figure) reprend les éléments détaillés du suivi. Ces éléments sont précisés sous format tableau de quatre colonnes : la première colonne indique la zone suivie, la deuxième la culture et son

stade phénologique, la troisième les observations et la dernière une photographie de la zone. Enfin, la troisième page, sur la gauche de la figure, fait un focus sur un suivi spécifique. En première partie, un descriptif de la culture et des observations est fait. On trouve ensuite un graphique représentant la dynamique des variables suivies depuis le début du cycle cultural de manière à permettre au pilote de la parcelle de prendre des décisions pour intervenir ou non sur la culture. Le dernier tiers de la page est occupée par des photographies relatives aux observations (exemple ici des cicadelles sur feuille d'aubergine, une feuille de plant d'aubergine attaquées par des altises puis une aubergine perforée).

4.3. Vers un diagnostic avancé, la fin de S@M, la naissance de Baco pour la recherche appliquée

L'utilisation de S@M dans des systèmes de culture ultra-diversifiés a mis en évidence des limites liées à sa conception initiale. En effet, l'outil ne permettait pas de représenter la juxtaposition voire superposition des cultures, la coexistence de cultures pérennes et de rotations plus ou moins courtes ou encore la multiplicité des parcelles et cultures sur de très petites surfaces parfois inférieures à 100m².

Ces constats ont conduit à identifier des besoins d'évolution. Dans ce cadre, des développements ont été engagés sur l'outil Baco (Biocontrôle, Agroécologie pour un Conseil Optimisé), développé par Astredhor, afin d'intégrer ces fonctionnalités.

Cette application, plus récente et intégrant un système d'information géographique et des bases de données plus puissantes, pouvait plus facilement permettre la création de nouvelles fonctionnalités adaptées aux travaux de recherche appliquée et aux besoins du projet S@MEDIT et aux systèmes de culture diversifiés.

De nouvelles fonctionnalités ont ainsi été créées avec notamment la conception de dispositifs de suivi cartographique des systèmes diversifiés, d'une interface de notation rapide au champ (Figure 7) et d'export de données brutes. Grâce à la géolocalisation proposée dans Baco, les problématiques phytosanitaires sont rapidement visualisables et il est donc possible de cibler et localiser les interventions pour moins de pesticides.

Ces développements visent à accroître la réactivité en permettant d'anticiper les risques et d'adapter rapidement les interventions agronomiques. Les nouvelles fonctionnalités n'ont pas été évaluées dans le cadre du projet S@MEDIT mais elles reposent sur les retours d'expérience issus de l'utilisation de S@M et visent à mieux répondre aux besoins des expérimentateurs et chercheurs travaillant sur des systèmes complexes.



Figure 7 : Interface proposée dans Baco du module diagnostic cartographique accessible via le profil expérimentateur.



Description de la figure 7

La figure représente une capture d'écran du module diagnostic avancé de l'outil Baco. Dans la partie supérieure de l'écran, on retrouve trois éléments : une flèche « retour » pour revenir à la page précédente, le rappel du système de culture suivi ici « Diagnostic avancé Armefflor », puis une icône « enregistrer ». Le reste de l'écran (plus des $\frac{3}{4}$) est occupée par une photo aérienne (type géoportail) du système de culture et de son environnement. Sur cette photo, chaque zone du système de culture est délimitée et les points de suivis représentés ce qui permet d'avoir une représentation spatiale fidèle à la réalité. Sur la partie droite de l'écran, les variables de suivi pour le point sélectionné sont proposées ainsi que les classes pour les valeurs d'abondance. La saisie de données est réalisée directement en cochant ou décochant la valeur choisie. Aussi, sur la figure, on retrouve le détail pour le point 5 de la culture 44 (tomates arbustes) du système de culture STOP Armefflor. Les variables proposées sont : Acariens, coccinelles et pucerons et les classes NA, 1, 2 et 3.

5. Discussion

5.1. Surveillance et pilotage du système de culture, deux éléments clés

La surveillance constitue la base de la prévention des bioagresseurs dans les systèmes de culture. Elle vise donc à diagnostiquer précocement la présence d'organismes nécessitant un contrôle (maladies, ravageurs, adventices), mais également d'auxiliaires et de prédateurs, pour alimenter la réflexion et ainsi adapter les pratiques agronomiques (Bruchon *et al.*, 2015). Cette phase est d'autant plus importante dans des systèmes de culture diversifiés tropicaux pour lesquels les modèles prédictifs sont soit inexistantes soit inadaptés. Pour ces systèmes de culture très diversifiés, caractérisés par la présence simultanée ou alternée de multiples espèces, rotations complexes ou cultures intercalaires, cette surveillance doit prendre en compte une grande variété d'indicateurs et leurs interactions (Donatelli *et al.*, 2017). Dans notre cas, le maillage des observations était adapté à chaque système de culture et les suivis réalisés avec des méthodes ou moyens tels que le suivi visuel ou le piégeage. Les observations et mesures collectées ont appuyé la prise de décision pour le pilotage du système de culture. Les décisions sont donc basées sur l'analyse des données issues de la surveillance pour répondre à des objectifs agronomiques, économiques et environnementaux.

5.2. Apport des outils numériques pour gérer des systèmes de culture ultramarins en conduite agroécologique

L'interface entre la surveillance et le pilotage du système de culture constitue la composante décisionnelle. En prenant en compte les états de la parcelle et les observations issues de la surveillance, le pilote décide d'interventions stratégiques pour atteindre les résultats qu'il souhaite (Schaub A. *et al.*, 2016). Pour un agriculteur, la gestion de systèmes de culture diversifiés peut paraître chronophage à cause d'espaces de production multiples impliquant des temps d'observation restreints. De plus, les interactions entre les différents compartiments du système sont nombreuses et souvent difficiles à expliquer. Les outils d'aide à la décision peuvent alors aider à intégrer les données diverses issues du système de culture et proposer des scénarios d'intervention et il reviendra à l'agriculteur de les mettre en œuvre ou non.

La plateforme S@M, utilisée au cours du projet S@MEDIT, a permis l'acquisition de nombreuses données sur les trois observatoires pilotés du projet DEPHY EXPE STOP permis de standardiser les observations et de produire des diagnostics réguliers.

Les suivis réalisés ont permis d'avoir des informations régulières sur l'état sanitaire des systèmes de culture et les comptes rendus rédigés à l'issue de ces suivis constituaient des outils de diagnostics, éléments clés pour la conduite et le pilotage de ces systèmes. Les informations récoltées relatives aux dynamiques de population des bioagresseurs et des bio défenseurs dans le temps et dans l'espace facilitent l'identification de tendances et l'anticipation des risques. Ces informations ou représentations aident alors à prévoir le positionnement des interventions qu'elles soient biologiques (lâchers d'auxiliaires localisés ou massifs), de piégeages massifs, ou chimique en localisé sur les foyers ou sur



la globalité de la parcelle. Il s'agit d'éléments essentiels au pilotage des interventions. A ce titre, les outils numériques offrent l'avantage d'obtenir des représentations visuelles rapides pour aider à la prise de décision d'intervention. Les résultats du projet S@MEDIT soulignent également l'importance de développer des outils flexibles, évolutifs et centrés sur les usages, capables de s'adapter à la diversité des systèmes de culture.

5.3 Place de l'expertise humaine dans l'utilisation des outils

Les outils doivent être pleinement utilisables par les utilisateurs finaux (techniciens, agriculteurs) sous réserve d'être formés à l'utilisation ou à la reconnaissance des bioagresseurs et bio défenseurs. Dans le cadre du projet, la personne extérieure était soit le conseiller soit l'expérimentateur. Pour une diffusion au plus grand nombre d'utilisateurs, une démarche de formation aux outils et méthodes doit être mise en place de même que la proposition d'un accompagnement par les conseillers d'entreprises pour l'appropriation des outils par les agriculteurs. Ces points sont envisagés dans la continuité des travaux engagés en identifiant même des agriculteurs ambassadeurs comme relais pour leurs collègues du territoire.

Bien que ces outils soient élaborés pour rendre les utilisateurs finaux plus autonomes, la présence régulière d'un observateur extérieur a favorisé une prise de recul sur les systèmes étudiés et a contribué à enrichir les échanges avec les pilotes des observatoires. Ces éléments soulignent que les outils numériques ne se substituent pas à l'expertise agronomique, mais s'inscrivent comme des supports à la décision.

6. Conclusion

La transition vers des systèmes diversifiés sans pesticide exige des stratégies de surveillance et de pilotage réactives et fines. Les contextes pédoclimatiques peuvent être multiples au sein d'un même bassin de production limitant fortement l'établissement de modèles épidémiologiques. Aussi, les pratiques doivent être réfléchies et adaptées à une échelle restreinte.

L'étude met en évidence l'intérêt des outils numériques pour accompagner la surveillance et le pilotage des systèmes de culture diversifiés en milieu tropical. L'utilisation de S@M a permis d'améliorer la structuration et la valorisation des données, contribuant ainsi à une meilleure réactivité face aux bioagresseurs. Cependant, les limites identifiées soulignent la nécessité de développer des outils mieux adaptés à la complexité des systèmes étudiés, notamment en matière de représentation spatiale et d'intégration des données.

Les retours d'expérience issus de ce travail ont permis d'orienter le développement de nouvelles fonctionnalités dans l'outil Baco, bien que celui-ci n'ait pas été évalué dans le cadre du projet. Ces évolutions visent à répondre aux besoins d'un panel élargi d'utilisateurs, en particulier les expérimentateurs et chercheurs.

Pour en assurer la continuité du service et la mise à disposition des publics cibles, une Société Coopérative d'Intérêt Collectif sera créée à l'horizon 2025-2026.

Son objet est d'assurer à la fois la pérennité des fonctionnalités et la diffusion au plus grand nombre pour que les méthodes et outils impactent le changement de pratique dans les systèmes diversifiés.

De nouveaux projets en cours (CasDAR, PARSADA) viendront renforcer les trois piliers de la démarche portée par Baco, Le conseil, la recherche appliquée et la production seront renforcés avec de nouvelles fonctionnalités.



Ethique

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

Rachel GRAINDORGE : Recherche, méthodologie, administration du projet, rédaction – version originelle

Camille BORTOLI : Recherche, méthodologie, supervision, rédaction – révision et correction

Léo KERAUDREN : Recherche, méthodologie, rédaction – révision et correction

Bruno PARIS : 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 pas 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 partenaires du projet DEPHY EXPE STOP et les participants aux divers ateliers et réunions techniques organisés. Nous remercions également Cathy REYNAUD de l'ARMEFLHOR, Roxane CALVAIRE, Stephen AMBROGIO de l'INRAE pour leur aide et leur contributions et alexandre CARRE et Dorian LOMBARD pour les développements informatiques.

Déclaration de soutien financier

Le projet S@MEDIT a bénéficié du soutien du CASDAR

Références bibliographiques

Bianchi, F. J. J. A., Booij, C.J.H., Tscharntke, T., 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control, *Proceedings of The Royal Society*, 273, 1715-1727.

Bortoli C., Graindorge R., 2022. Projet S@MEDIT: Pour le suivi des auxiliaires et des bioagresseurs, *FERTILE* n°54, p15

Bout A., Boll, R., Poncet, C., 2009. Quick pest and disease scouting to implement IPM in greenhouse rose crops.

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 (6) : 2242-2248.



Bruchon L., Le Bellec F., Vannière H., Ehret P., Vincenot D., De Bon H., Marion D., Deguine J.P., 2015. Guide Tropical – Guide pratique de conception de systèmes de culture tropicaux économes en produits phytosanitaires. Le Bellec F. (Ed.), CIRAD, Paris 210 pages.

Deguine, J.P., Ratnadass A., Robin, M.H., Sarthou, J.P., Aubertot, J.N., 2020. Protection agroécologique des cultures : Définition. Dictionnaire d'agroécologie.
<https://doi.org/10.17180/b4vj-9e56>

Donatelli M., Magarey R.D., Bregaglio S., Willocquet L., Whish J.P.M., Savary S., 2017. Modelling the impact of pests and diseases on agricultural systems, *Agricultural Systems* 155, p213-224.

Graindorge, R., Delaunay, J., Huat, J., Lefèvre, A., Marquier, M., Vanhuffel, L., 2022. DEPHY EXPE ST0P Project : for the transition of current horticultural systems to agroecological systems without chemical uses in a tropical area, *Acta Horticulturae*, 1355, 91-98.

Graindorge, R., Vanhuffel, L., Clain C., de la Brière, S., Delaunay, J., Huat, J., 2024. Co-conception et évaluation de systèmes de culture agroécologiques en milieu tropical. Retours d'expérience du projet DEPHY EXPE ST0P - Système Tropicaux Zéro Pesticide de Synthèse - 2018-2023. p68.

Paris B., Doise S., Poncet C., Maugin E., Lhoste-Drouineau A., Denegri T., Cabeu I., Fillatre J., Suay R. et Tragin M., 2017. Un outil connecté pour réduire les pesticides, Présentation de S@M, outil d'aide à la décision développé par l'UMT FioriMed pour accompagner les réductions des pesticides en horticulture ornementale, *DOSSIER PHYTOMA n°701*, p12-14.

Paris B., Keraudren L., Doise S., Fillatre J., Cabeu I., Denegri T., Lhoste-Drouineau A. et Fatnassi H., 2019. S@M : de l'aide à l'observation pour la PBI à l'outil prédictif. *PHYTOMA n°725*, 16-19.

Paris, B., Doise, S., Fillatre, J., Cabeu, I., Drouineau, A., Denegri, T., Fatnassi, H., Bresch, C., Poncet, C., 2019. OTELHO : Vers une horticulture connectée, suivi des macroorganismes pour réduire les pesticides. *Innovations Agronomiques* 76, 87-102.

Paut, R., 2021. Analyse des compromis entre diversité cultivée et complexité de gestion à travers le cas d'étude du Verger-Maraîcher. Une approche combinant modélisation et méthodes qualitatives. Travaux de thèse, Ecole doctorale 536 Agros sciences et Sciences, p263.

Schaub A., Toupet A.L., Deytieu V., Toqué C., Petit M.S., Cadoux S., Minette S., Vivier C., Geloën, M., Massot P., Fonteny C., & Reau R. (2016). Décrire un système de culture expérimenté, pour aider à son pilotage, faciliter son analyse et communiquer. Guide méthodologique du réseau expérimental du Réseau Mixte Technologique « Systèmes de culture innovants », Mai 2016, 68 pages.

Pour citer cet article : Rachel GRAINDORGE, Camille BORTOLI, Léo KERAUDREN & Bruno PARIS, 2026 - Des outils numériques adaptés pour la surveillance, l'aide à la décision et le pilotage de systèmes de cultures agroécologiques diversifiés en territoires ultramarins. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol112-art16>



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.



PRESAGE : Préparer la création d'un observatoire des anomalies génétiques en petits ruminants

Diane BUISSON¹, Jean-Michel ASTRUC¹, Maxime BEN BRAIEK², Bertrand BOUFFARTIGUE³, Fabien CORBIERE⁴, Christel COUZY¹, Renée DE CREMOUX¹, Stéphane FABRE², Pierre MARTIN⁵, Isabelle PALHIÈRE², Alain PINTON², Jérôme RAOUL^{1,2}, Silvia RODRIGUEZ-RAMILO², Gwénola TOSSER-KLOPP²

¹ Institut de l'élevage, 75595 Paris Cedex 12, France

² GenPhySE, Université de Toulouse, INRAE, ENVT, 31326 Castanet-Tolosan, France

³ Races de France, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

⁴ IHAP, Université de Toulouse, INRAE, ENVT, 31076 Toulouse, France

⁵ CAPGENES, Agropole, 2135 route de Chauvigny, 86550 Mignaloux-Beauvoir, France

Correspondance : diane.buisson@idele.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art17>

Résumé

Dans le cadre du projet PRESAGE, une réflexion a été menée avec les différents acteurs des filières ovines et caprines pour définir les conditions de création d'un observatoire des anomalies génétiques en petits ruminants en s'appuyant sur les dispositifs existants dans les autres filières. Des supports de communication et un formulaire de déclaration des anomalies ont été élaborés et publiés sur le site web PRESAGE. Une application mobile de déclaration ainsi que les bases de données afférentes ont été créées. Plusieurs anomalies et leurs mutations causales ont été découvertes en ovins et étudiées au cours du projet (cryptorchidie en lien avec le cornage, syndrome métabolique, affection respiratoire). Une synthèse des méthodes de prise en compte des anomalies dans la sélection et des simulations ont été réalisées et ont permis de proposer aux organismes de sélection des outils d'aide dans leur gestion. Ce travail a abouti sur l'idée d'un rapprochement avec les autres observatoires (bovins et porcins) afin d'étudier la création d'un observatoire unique multi-espèce.

Mots-clés : observatoire, anomalies génétiques, petits ruminants, déclaration, application mobile, gestion

Abstract: PRESAGE: towards an observatory of small ruminant genetic disorders

As part of the PRESAGE project, discussions were held with various stakeholders in the sheep and goat sectors to define the conditions for creating an observatory for genetic anomalies in small ruminants, building on existing facilities in other sectors. Communication materials and a genetic anomaly reporting form were developed and published on the PRESAGE website. A mobile reporting application and the associated databases were also created. Several anomalies and their causal mutations were discovered in sheep and studied during the project (cryptorchidism linked to hornless, metabolic syndrome, respiratory disease). A review of methods for addressing anomalies in the selection process was carried out, alongside a series of simulations. This enabled recommendations to be made to breeding organisations, as well as the proposal of decision-support tools to assist these bodies in managing anomalies. This led to the idea of closer collaboration with the other single-species observatories (cattle and pigs) in order to explore the creation of a unified multi-species observatory.

Keywords: observatory, genetic disorders, small ruminant, reporting, management, mobile application



1. Introduction

Ces dernières années, les filières de production de petits ruminants (caprins, ovins lait *et* *allaitants*) ont rapporté l'émergence d'un certain nombre de défauts morphologiques chez leurs animaux, dont la littérature scientifique laisse à penser qu'ils ont une origine génétique. Ces anomalies génétiques rapportées sont par exemple, l'épidermolyse bulleuse (qui se manifeste par le détachement de l'épiderme du derme de la peau, laissant la peau à vif), la cryptorchidie (défaut de migration des testicules vers le scrotum), l'entropion (enroulement de la paupière entraînant un mauvais positionnement des cils qui viennent frotter contre la cornée) ou encore des défauts aux niveaux des cornes (présence – absence) ou des pattes (tordues). Au regard de l'efficacité des schémas de sélection, des préoccupations grandissantes autour de la santé et du bien-être animal, et dans un contexte de développement des outils génomiques (sélection génomique, séquençage, ...), les responsables professionnels des trois filières ont affirmé la nécessité et leur volonté de développer un observatoire des anomalies génétiques en petits ruminants. Les objectifs sont de pouvoir détecter précocement ces anomalies, de systématiser leur déclaration, de les quantifier dans les populations ovines et caprines et de fournir des outils pour leur gestion. Ainsi, le projet PRESAGE visait à évaluer les conditions nécessaires à la création d'un tel observatoire au travers des 4 axes d'étude suivants :

1. l'organisation opérationnelle du futur observatoire ;
2. le développement des outils de base de l'observatoire : communication, déclaration des anomalies, protocoles spécifiques pour les tares ;
3. des stratégies d'analyse du déterminisme génétique des anomalies par des approches du phénotype au génotype et du génotype au phénotype (génétique inverse) ;
4. la fourniture d'outils d'aide à la décision pour la gestion des anomalies génétiques.

2. Vers un observatoire des anomalies génétiques unique ?

2.1. Etat des lieux de l'existant : une base de réflexion pour PRESAGE

Avant de démarrer les réflexions sur l'observatoire des anomalies en petits ruminants, une analyse des dispositifs déjà existants a été réalisée afin de s'appuyer sur l'expérience acquise dans d'autres filières animales (bovine avec l'ONAB – Observatoire National des Anomalies Bovines <https://www.onab.fr/>, équine – <https://www.ifce.fr/ifce/recherche/observatoire-des-anomalies-equines/>, canine, porcine – Projet SwAn <https://ifip.asso.fr/documentations/33108-swan-swine-anomalies-anomalies-congenitales-chez-le-porc-cartographie-fine-des-genes-sous-jacents-2009-12/>) et dans d'autres pays (Belgique). Cette démarche a été complétée par le retour d'expérience de l'Organisme de Sélection (OS) Mouton Vendéen sur la gestion d'une épidermolyse bulleuse grâce à un diagnostic génétique pour une mutation récessive dans le gène *ITGB4* (Integrin subunit beta 4) et la non-diffusion de reproducteur porteurs hétérozygotes (Fabre *et al* ; 2021).

Ainsi, 13 entretiens semi-directifs ont été réalisés puis analysés à l'aide d'une grille de dépouillement. Cette première approche a ensuite été enrichie par des entretiens auprès d'éleveurs, techniciens et vétérinaires afin d'intégrer les attentes des acteurs de terrain dans la conception du dispositif. L'approche comparative a permis d'identifier les principaux freins, leviers et facteurs de réussite, et d'en tirer des enseignements structurants sur lesquels appuyer les discussions quant à l'organisation de l'observatoire (*cf. Tableau 1*).



Tableau 1 : Synthèse de l'analyse comparative des observatoires existants dans les filières bovine (ONAB - Observatoire National des Anomalies Bovines), Canine, Porcine, et Equine (OAE - Observatoire des anomalies équinnes)

Espèce	Bovine (ONAB)	Canine	Porcine	Equine (OAE)
Contexte initial	Consanguinité forte Emergence d'anomalies (BLAD, CVM, ...)	Emergence d'anomalies	Projet SwAn (hernie scrotale, cryptorchidie, intersexué)	Anomalie "queue-de-rat" (ânes du Berry) Influence de Coralie Danchin
Création par	INRAE ¹ , ENV ² , et implication du Ministère	SCC ³	INRAE, IFIP ⁴	IFCE ⁵ et influence de Coralie Danchin
Année de création	2002	2012	2009	2008
Statuts juridiques	Charte de fonctionnement	Pas de statuts	Pas de statuts	Pas de statuts
Financements	Appels à projets + Financement FGE ⁶	SCC + AGRIA (assurance pour les animaux)	Appels à projets	Labéo Projets financés en partie par l'IFCE
Gouvernance	Comité de pilotage Comité opérationnel Cellule de coordination	-	Laissée à la discrétion des entreprises de sélection (ES)	IFCE Labéo RESPE ⁷ Responsables de la race concernée
Moyens humains	0,14 ETP ⁸ Idele 4,1 ETP INRAE 1 ETP & 1 thèse Eliance	~ 1 ETP	Impossible à déterminer	5 à 10 j/an IFCE Temps de Labéo
Remontée des informations	Formulaire Mail & contact téléphonique	Mails & contact téléphonique	Remontée dans la base de données moléculaires	Formulaire Mail & contact téléphonique
Échantillons	<u>Non systématiques</u> Sang, cartilage, autres Analyses complémentaires à la charge des vétérinaires	<u>Non systématique</u> Sang, salive, biopsies sur demande des équipes de recherche Analyses à la charge de l'éleveur ou des clubs de race	Prélèvement de cartilage en routine pour la sélection	Sang Prises de sang à la charge des vétérinaires
Déclarants	Inséminateurs, Vétérinaires, Techniciens d'élevage, Eleveurs	Centralisation des déclarations des éleveurs par les clubs de race	Eleveurs	Eleveurs (Vétérinaires)
Priorisation des anomalies	Coût x Fréquence des anomalies	Connaissance de l'anomalie x fréquence x gravité	Fréquence des anomalies	Aucune (trop peu de remontées)
Gestion des anomalies	Gestion par les OS Conseil et outils ONAB	Gestion par les clubs de races Conseils fournis	Gestion à la discrétion des ES	Gestion par les studbooks
Impact des anomalies	Pertes économiques (50 à 100 M€ en 2016), Impact psychologique, Impact commercial	Santé et bien-être animal Impact commercial	Impact mitigé (origine polygénique ou fréquence faible + valeur du porcelet)	Très fort impact économique Mauvaise image de l'élevage
Stratégies de communication	Formations inséminateurs &	Communication aux clubs de races	Pas de communication	Formations inséminateurs & vétérinaires en



et de formation	vétérinaires, Webinaire, newsletter, journées Site web https://www.onab.fr/ Lien direct avec les vétérinaires	Site web https://www.genodog.fr/		reproduction webconférences, réseaux sociaux, publications web
Difficultés rencontrées	Attente de retours des déclarants Gouvernance compliquée	Tabou sur les anomalies en raison de l'impact sur l'image de l'éleveur et ses ventes	Problèmes de financements et manque de moyens humains Démotivation des personnes impliquées	Relations politiques entre les Studbooks et l'IFCE Méconnaissance de la génétique Impact commercial
Conseils pour PRESAGE	Bonne entente entre acteurs	Impliquer tous les acteurs dès le début	Proposer des projets concrets pour amener les éleveurs à participer activement	Avancer dans la connaissance de la génétique

¹ INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement² ENV : Ecole Nationale Vétérinaire

³ SCC : Société Centrale Canine

⁴ IFIP : Institut du porc

⁵ IFCE : Institut Français du Cheval et de l'Equitation

⁶ FGE : France Génétique Elevage

⁷ RESPE : Réseau d'Epidémiologie-Surveillance pour les Pathologies Equines

⁸ ETP : Equivalent Temps Plein

Malgré leurs spécificités, les observatoires enquêtés présentent de nombreux points communs. Tout d'abord, l'émergence d'anomalies constitue le principal facteur déclencheur de ces dispositifs en raison des impacts sanitaires, économiques ou sur l'image de l'élevage. Le projet PRESAGE s'inscrit pleinement dans cette dynamique, faisant suite à l'épisode d'épidermolyse bulleuse en Mouton Vendéen. De manière générale, les observatoires sont perçus comme ayant un impact globalement positif, en améliorant la réactivité et l'efficacité de la gestion des situations critiques, en contribuant à la maîtrise, voire à l'éradication, d'anomalies majeures, et en limitant leurs conséquences économiques et leur impact sur l'image des filières.

Les observatoires étudiés reposent le plus souvent sur des cadres organisationnels souples, sans statut juridique formel, privilégiant des chartes de fonctionnement pour permettre adaptabilité et rapidité de mise en œuvre. Toutefois, l'expérience de l'ONAB souligne que ce modèle peut générer des tensions lorsque la gouvernance est perçue comme déséquilibrée, notamment lorsque certains acteurs estiment ne pas être suffisamment associés aux décisions stratégiques, ou lorsque des enjeux d'image ou de propriété intellectuelle freinent la reconnaissance et la prise en charge de certaines anomalies. Ces constats mettent en évidence la **nécessité d'une implication précoce de l'ensemble des parties prenantes afin d'assurer la légitimité et la durabilité du dispositif**.

Le financement apparaît comme un déterminant majeur de la pérennité des observatoires. La dépendance exclusive aux appels à projets limite la capacité à assurer un suivi à long terme et à mobiliser durablement les ressources humaines et techniques. Les dispositifs les plus robustes reposent sur des financements diversifiés ou des ressources internes, soulignant l'importance, à l'issue du projet PRESAGE, de **sécuriser un socle financier pérenne, notamment pour le suivi des déclarations au quotidien et la prise en charge des prélèvements biologiques, leur acheminement et leur conservation**.

La déclaration des anomalies constitue un enjeu central mais demeure insuffisante dans l'ensemble des filières étudiées en raison du caractère sensible des anomalies génétiques et de leurs implications économiques et d'image. L'amélioration des remontées repose sur une communication positive orientée vers l'intérêt collectif, la simplicité et l'intégration des outils de déclaration aux pratiques existantes, ainsi que sur la formation des acteurs de terrain. En parallèle, une seconde stratégie repose sur l'intégration



d'approches de génétique inverse utilisant les données génomiques collectées en routine (génotypages par puces à SNP, *single nucleotide polymorphism*). Elle permet, par exemple, la détection de régions en déficit d'homozygotes, potentiellement causées par des anomalies létales à des stades précoces de développement de l'animal (embryonnaire ou périnatal), à partir des seuls génotypes d'une population (voir 4.2). Cette approche est indépendante des signalements cliniques, et elle apparaît comme un levier majeur pour détecter des mutations délétères non identifiables sur le terrain faute de naissances ou du fait d'une mortalité précoce qui se confond avec la mortalité périnatale classiquement observée. Elle permet ainsi de limiter les biais liés à la sous-déclaration et renforce l'efficacité globale des dispositifs de surveillance.

Ces enquêtes ont ainsi fourni des éléments précieux pour aborder les réflexions autour de la conception d'un observatoire dédié aux petits ruminants, en mettant en évidence à la fois les facteurs de réussite et les difficultés récurrentes rencontrées par ces dispositifs. Trois points d'attention majeurs se dégagent de ces enquêtes :

- la communication et la formation des acteurs de terrain apparaissent déterminantes pour lever les réticences à la déclaration des anomalies et favoriser une remontée exhaustive d'informations ;
- la recherche de financements pérennes constitue un enjeu central pour garantir la continuité des missions de surveillance, d'analyse et d'animation de l'observatoire ;
- enfin, une gouvernance claire, partagée et apaisée est indispensable pour assurer l'acceptabilité et l'efficacité du dispositif au sein des filières.

2.2. Rédaction du cahier des charges

La rédaction du cahier des charges de l'observatoire s'est appuyée sur des méthodes d'animation participative de type « *focus group* ». Cette approche poursuivait un double objectif : associer l'ensemble des acteurs concernés par le projet (éleveurs, techniciens, vétérinaires, responsables d'OS, ingénieurs Idele, chercheurs INRAE) et engager une démarche de co-construction du cahier des charges. En s'appuyant sur les conclusions issues des travaux d'enquête (voir 2.1), les participants ont été amenés à partager et analyser collectivement leurs contraintes, leviers et besoins respectifs, afin d'élaborer des règles communes adaptées à la création et au fonctionnement de l'observatoire.

Plusieurs ateliers ont été organisés de manière itérative afin d'approfondir progressivement les différents enjeux et de laisser aux acteurs le temps de s'approprier le projet et de mesurer la portée de leurs futurs engagements. Leur animation reposait sur quatre principes structurants : (i) la définition préalable d'objectifs clairs et atteignables pour chaque atelier, construits en lien étroit avec les responsables du projet et de l'action ; (ii) le recours à des méthodes d'animation adaptées favorisant à la fois la production d'idées, leur mise en discussion, leur synthèse et leur priorisation ; (iii) une animation garantissant la qualité des échanges, l'expression de tous les points de vue et la régulation des éventuelles tensions ; et (iv) une capitalisation réflexive des productions, visant à valoriser les résultats des ateliers tout en identifiant les points à approfondir pour la suite du processus.

L'évolution du contexte économique (baisse des subventions publiques, réorientation des financements de la Confédération Nationale de l'Élevage et réduction des financements alloués par France Génétique Elevage) a directement impacté les réflexions menées dans le cadre du projet : d'un observatoire qui se voulait uniquement petits ruminants pendant les 2 premières années du projet, il a finalement été décidé d'étudier la faisabilité d'une structuration commune avec l'ONAB de manière à mutualiser une partie des coûts et trouver des synergies, notamment en matière d'animation, de formation, d'outils et de recherche, tout en maintenant une organisation en sections distinctes tenant compte des spécificités des dispositifs génétiques propres à chaque espèce. Cette décision tardive n'a donc pas permis

d'aboutir à une charte de fonctionnement finalisée, mais plutôt à un document intermédiaire sur l'organisation possible à court, moyen et long terme.

Pour le projet PRESAGE, la proposition de Charte formalise plusieurs principes directement issus des *focus groups* : la mise en place de circuits d'information ascendants et descendants, une prise de décision partagée entre chercheurs et acteurs de la filière, ainsi qu'une gouvernance professionnelle articulée avec les instances décisionnelles du dispositif génétique des petits ruminants (Figure 1). Il est toutefois précisé que cette charte demeure évolutive, sa version actuelle étant susceptible d'être ajustée en fonction des discussions en cours avec les responsables de l'ONAB et de l'évolution du contexte organisationnel et financier des observatoires. Très récemment, cette réflexion collective a été poussée plus loin en se rapprochant de l'IFIP et des acteurs du projet SwAn pour les anomalies porcines (Tableau 1) et en proposant le nouveau projet SynObs (Construire les synergies entre observatoires pour stimuler la recherche sur les anomalies génétiques en élevage) lauréat d'un financement Carnot France-Future -Elevage.

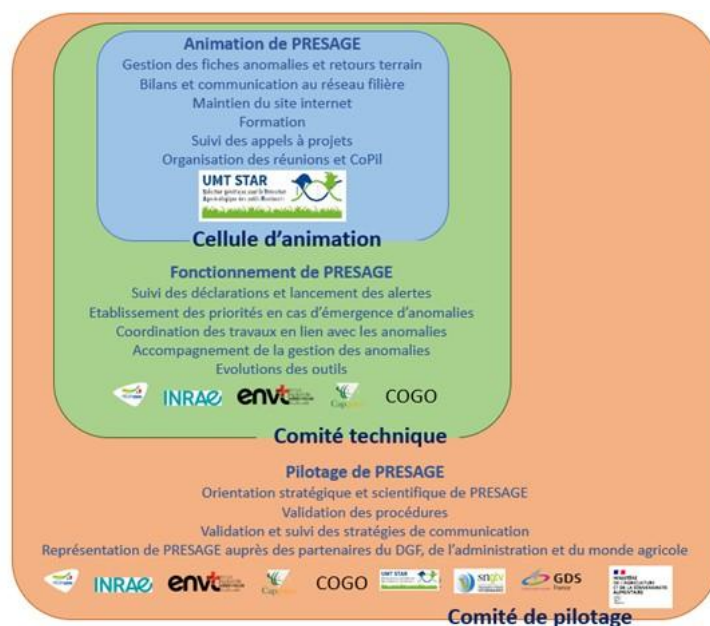


Figure 1 : Structuration de l'Observatoire des anomalies génétiques des petits ruminants proposée à l'issue du projet PRESAGE. Cette structuration pourra être en partie reprise pour la section petits ruminants en cas de création d'un observatoire unique multi-espèces.

Description de la figure

La figure 1 présente la structure de gouvernance et d'animation du projet PRESAGE. Le schéma est divisé en trois blocs principaux imbriqués, chacun correspondant à une cellule ou un comité, avec leurs missions respectives. Une cellule d'animation gérée par des membres de l'UMT STAR sera ainsi en charge de faire vivre l'observatoire (gestion des fiches, retour terrain, communication, organisation des réunions, ...). Un comité technique s'assurera du bon fonctionnement de PRESAGE. C'est lui qui se chargera d'assurer le suivi des déclarations, de coordonner les travaux autour des anomalies, depuis l'établissement des priorités et le lancement d'alertes jusqu'à l'accompagnement de la gestion, et de veiller à la mise à jour et l'évolution des outils. Participent à ce comité technique ; la cellule d'animation, Idele, INRAE, ENVT, CAPGENES et le COGO. Enfin, un Comité de Pilotage s'attachera à définir les orientations stratégiques et scientifiques de l'observatoire et à représenter l'observatoire auprès des différents partenaires et diverses instances. Ce groupe est composé des membres du comité technique ainsi que des SNGVT, des GDS et du ministère.



3. Développement des outils de base de l'observatoire

3.1. La communication : un levier essentiel à la réussite de l'observatoire

La communication étant un point clé de la réussite de l'observatoire, l'un des enjeux majeurs consistait à rendre accessible un sujet complexe et en partie tabou afin de sensibiliser l'ensemble des acteurs aux anomalies génétiques, favoriser leur adhésion à la démarche de déclaration et, *in fine*, assurer la dynamique et la pérennité de l'observatoire. La communication a ainsi fait l'objet d'une réflexion approfondie dès les premières réunions du comité de pilotage, en particulier sur le recours à l'image qui peut parfois heurter la sensibilité, lorsque l'intégrité de l'animal est altérée, ou jeter l'opprobre sur certaines races, filières, ou sur l'élevage en général. Pour contourner cet écueil, le choix du recours à des illustrations dessinées s'est progressivement imposé comme une solution consensuelle : des visuels ont été conçus par Cled'12 (<https://cled12.com>, Figure 2) selon une démarche itérative et collaborative, associant échanges en groupe de travail, propositions graphiques en adéquation avec les objectifs définis, soumission et discussion en comité de pilotage, puis ajustements successifs jusqu'à validation finale.



Figure 2 : Illustrations permettant une communication neutre sur les anomalies génétiques. On retrouve à la fois des scènes et des éléments individuels pouvant être utilisés selon les besoins.

Description de la figure

La communication de l'observatoire s'appuie sur des dessins mettant en scène divers personnages. Quelques exemples sont présentés ici :

- des éléments isolés utilisables séparément et qui représentent :
 - nos deux enquêteurs de l'observatoire Chevrlock, une chèvre inspirée du célèbre Sherlock Holmes dont elle porte la veste, le chapeau et la loupe, et Moutson, un mouton inspiré de son acolyte Watson,
 - un personnage d'anomalie génétique qui est un morceau de double hélice d'ADN avec un air méchant,
 - une brebis et une chèvre toutes deux porteuses d'anomalies génétique : on a choisi volontairement des anomalies qui ne véhiculent pas d'image négative, à savoir une quantité anormale de laine sur la tête du mouton faisant apparaître une coiffure très touffue et des cornes complètement emmêlées pour la chèvre.
- une scène globale dans laquelle Chevrlock colle des affiches pour chercher différents personnages d'anomalies, tandis que Moutson circule dans une voiture de l'observatoire en faisant des appels au mégaphone pour demander de l'aide aux passants (éleveur, mouton, vétérinaire). Cette semaine illustre la communication de l'observatoire pour amener les différents acteurs à déclarer toute anomalie observée sur le terrain.

Les personnages retenus, inspirés de Sherlock Holmes et du Dr. Watson, ont été conçus pour symboliser l'équilibre entre les espèces, l'importance conjointe de l'observation de terrain et des nouvelles technologies, ainsi que l'articulation entre expertise et outils numériques. La représentation volontairement positive et non stigmatisante des anomalies, à travers des animaux « atypiques », visait à suggérer que certaines mutations peuvent également être porteuses d'intérêt. Cette logique a été déclinée de manière cohérente dans l'ensemble des supports, notamment la vidéo de promotion de l'observatoire. Les visuels produits ont ainsi permis d'illustrer à la fois la notion d'anomalie génétique, la diversité des acteurs impliqués et les différentes étapes du processus allant de l'identification à la prise en compte opérationnelle des anomalies par les professionnels.

Par ailleurs, des échanges avec les services de communication d'INRAE et de l'Institut de l'Élevage ont permis de mutualiser les réflexions, les supports et les canaux de diffusion. La stratégie de communication a ainsi ciblé des publics variés – éleveurs, conseillers, vétérinaires et chercheurs – en mobilisant une diversité de formats et de médias adaptés à ces cibles : fiches techniques, vidéo de présentation de l'observatoire, webinaires, interventions lors de congrès et de journées techniques, articles dans la presse professionnelle et scientifique. L'ensemble des outils développés est disponible sur la page web PRESAGE (<https://idele.fr/presage/>).

Afin d'approfondir cette partie, une étude d'impact a été menée. Les partenaires du projet ont ainsi travaillé à la cartographie des acteurs de l'observatoire, en précisant les rôles et contributions attendus de chacun. Une réflexion a ensuite été engagée sur les leviers à mobiliser pour atteindre les objectifs fixés, permettant *in fine* d'élaborer une carte du chemin d'impact (Figure 3).

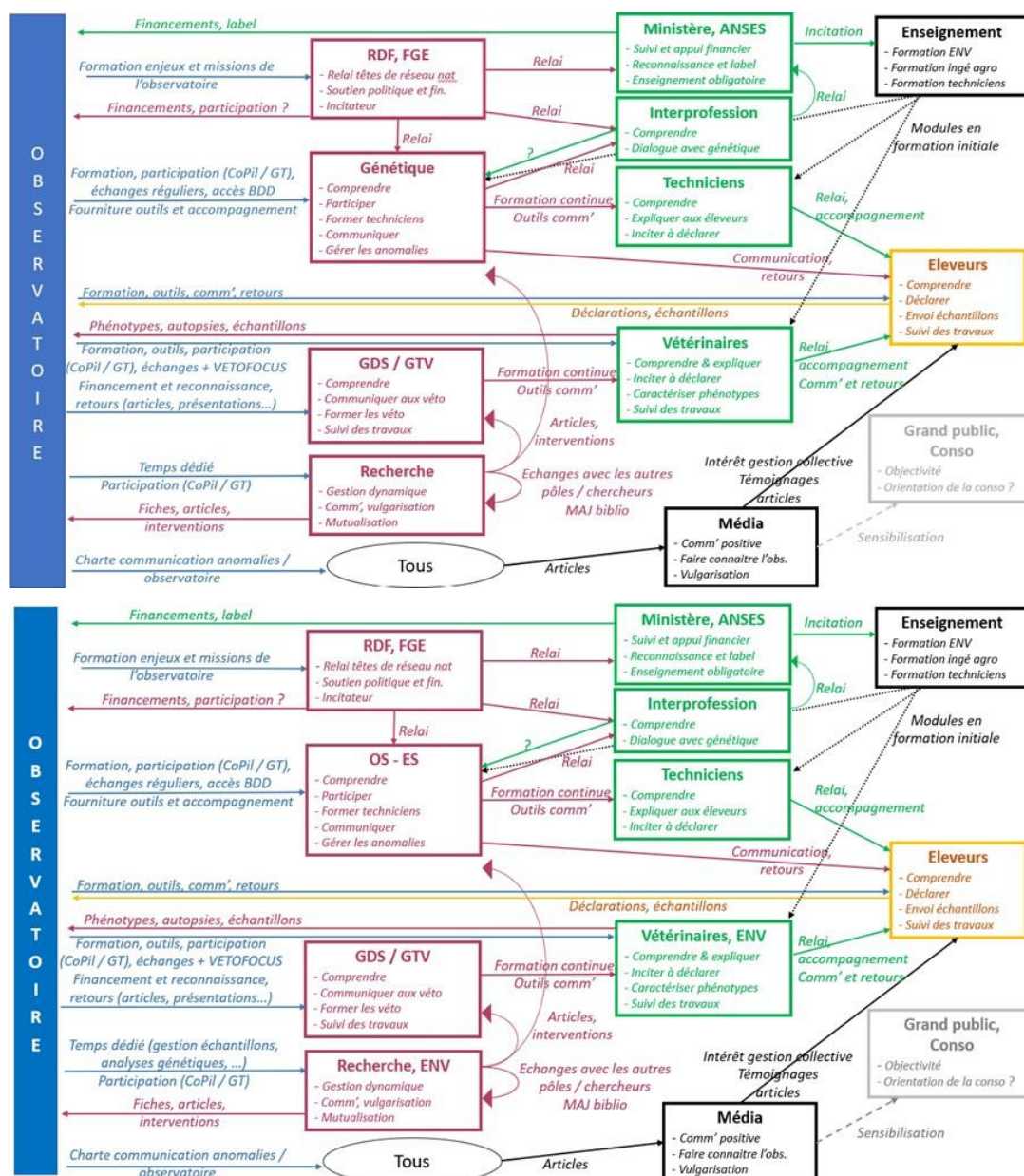


Figure 3 : Carte du chemin d'impact en vue d'optimiser la pérennité de l'observatoire des anomalies génétiques en petits ruminants. Les cibles ainsi que les attentes associées sont présentées dans les différents rectangles, tandis que les flèches illustrent les actions que chacune doit mener pour atteindre les objectifs visés.



Description de la figure

Cible	Ce qu'on attend d'elle	Comment on y parvient	Quels retours ?
RDF, FGE	<ul style="list-style-type: none"> - Relai têtes de réseau nat - Soutien politique et fin. - Incitateur 	Formation enjeux et missions de l'observatoire	<ul style="list-style-type: none"> - Vers l'Observatoire : financements et participation éventuelle - Vers le ministère, l'ANSES, l'interprofession et les OS/ES : relai
OS, ES	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre - Participer - Former techniciens - Communiquer - Gérer les anomalies 	Formation, participation (CoPil / GT), échanges réguliers, accès BDD Fourniture outils et accompagnement	<ul style="list-style-type: none"> - Vers l'interprofession : relai - Vers les techniciens : formation continue, outils communication - Vers les éleveurs : communication et retours
Éleveurs	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre - Déclarer - Envoi échantillons - Suivi des travaux 	Formation, outils, communication, retours par l'observatoire Communication, retours par OS – ES Relai, accompagnement par les techniciens Relai, accompagnement, communication et retours par les vétérinaires, ENV Intérêt gestion collective, témoignages, articles à travers les médias	Vers l'observatoire : déclarations, échantillons
Vétérinaires, ENV	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre & expliquer - Inciter à déclarer - Caractériser phénotypes - Suivi des travaux 	Formation, outils, participation (CoPil / GT), échanges + VETOFOCUS Financement et reconnaissance, retours (articles, présentations...)	<ul style="list-style-type: none"> - Vers l'observatoire : Phénotypes, autopsies, échantillons - Vers les vétérinaires : Relai, accompagnement, communication et retours
GDS, GTV	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre - Communiquer aux véto - Former les véto - Suivi des travaux 	Formation, outils, participation (CoPil / GT), échanges + VETOFOCUS Financement et reconnaissance, retours (articles, présentations...)	Vers les vétérinaires : Formation continue, outils communication
Recherche, ENV	<ul style="list-style-type: none"> - Gestion dynamique - Communication, vulgarisation - Mutualisation 	Temps dédié (gestion échantillons, analyses génétiques, ...) Participation (CoPil / GT)	<ul style="list-style-type: none"> - Vers l'observatoire : Fiches, articles, interventions - Vers les GDS, GTV, ES, OS : Articles, interventions - Entre organismes de recherche : Echanges avec les autres pôles / chercheurs, MAJ biblio
Ministère, ANSES	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi et appui financier - Reconnaissance et label - Enseignement obligatoire 	Appui de FGE, RDF	<ul style="list-style-type: none"> - Vers l'observatoire : Financements, label - Vers l'enseignement : incitation
Enseignement	<ul style="list-style-type: none"> - Formation ENV 	Incitation du ministère /	Vers les OS, ES, techniciens,



	<ul style="list-style-type: none"> - Formation ingé agro - Formation techniciens 	ANSES	vétérinaires, ENV : modules en formation initiale
Interprofession	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre - Dialogue avec - génétique 	Incitation RDF, FGE, OS, ES	Vers le ministère, l'ANSES, OS et ES : relai
Techniciens	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre - Expliquer aux - Inciter à déclarer - éleveurs 	Formation continue et outils communication fournis par OS - ES	Vers les éleveurs : relai et accompagnement
Vétérinaires, ENV	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre & expliquer - Inciter à déclarer - Caractériser - Suivi des travaux - phénotypes 	Formation, outils, participation (CoPil / GT), échanges + VETOFOCUS, Financement et reconnaissance, retours (articles, présentations...) par l'observatoire Formation continue et outils communication fournis par GDS - GTV	Vers l'observatoire : Phénotypes, autopsies, échantillons
Tous les acteurs précédents		Charte communication anomalies / observatoire	Vers les médias : communication
Médias	<ul style="list-style-type: none"> - Comm' positive - Faire connaître l'obs. - Vulgarisation 	Articles venant des différents acteurs et de l'observatoire, dans le respect de la charte de communication	<ul style="list-style-type: none"> - Vers les éleveurs : Intérêt gestion collective, témoignages, articles - Vers le grand public : sensibilisation
Grand public	<ul style="list-style-type: none"> - Objectivité - Orientation de la conso ? 	Sensibilisation par les médias	

3.2. Une application mobile pour faciliter la déclaration des anomalies

Dans un premier temps, le formulaire de déclaration des anomalies de l'ONAB ainsi que sa déclinaison caprine ont été repris et adaptés pour l'ensemble des filières de petits ruminants et publiés sur la page web PRESAGE. Néanmoins, la déclaration papier étant fastidieuse, chronophage et source d'erreur (déclarations rédigées à la main à ressaisir dans les bases de données), l'un des objectifs du projet était la création d'une application mobile visant à structurer la remontée d'informations par les acteurs de terrain (éleveurs, techniciens, vétérinaires). Cette application, développée par l'ARSOE de Soual (Tarn), repose sur un fonctionnement multiplateforme (smartphone et ordinateur), en mode déconnecté avec stockage local, et synchronisation vers une base de données centralisée dès qu'une connexion internet est disponible. Dans un premier temps, l'accès est sécurisé par authentification, les comptes utilisateurs étant validés par un administrateur. À ce stade du projet, l'application n'est pas diffusée via les magasins de type « App stores » publics.

Le formulaire de déclaration des anomalies intégré à l'application permet de collecter de manière standardisée les informations relatives au déclarant, à l'animal atteint (ou à la mère en cas de mort-né), à son ascendance, ainsi qu'une description détaillée des anomalies selon différentes régions anatomiques (développement général, peau, tête, corps, membres). Des éléments de contexte sanitaire, des hypothèses diagnostiques, des commentaires libres et des documents associés (photographies, comptes rendus vétérinaires, examens complémentaires) peuvent également être renseignés. L'application inclut par ailleurs un module de gestion des prélèvements biologiques, avec édition d'un bordereau d'accompagnement et recueil du consentement de l'éleveur pour l'utilisation ultérieure des échantillons pour faciliter le traçage.



Le développement de l'application s'est étalé de 2021 à 2024, avec une première version testée à l'automne 2022 auprès de 46 utilisateurs issus d'organismes de sélection, de structures techniques, vétérinaires et de recherche. Les retours d'expérience ont conduit au déploiement d'une version 2 en avril 2024 (corrections, amélioration de la synchronisation et ajout d'un rôle administrateur), puis d'une version 3 en juin 2024 intégrant un module d'extraction des données.

Au 10 juin 2024, 48 déclarations d'anomalies avaient été enregistrées. Les anomalies les plus fréquemment rapportées concernaient les déformations des membres et les trayons surnuméraires chez les caprins ; l'entropion, la cryptorchidie, les anomalies de la laine ou du poil, ainsi que des troubles de la différenciation sexuelle chez les ovins.

À l'issue du projet PRESAGE, la pérennisation et l'élargissement de la diffusion de l'application au plus grand nombre constituent des enjeux majeurs. Les perspectives incluent l'optimisation du suivi des dossiers grâce aux fonctionnalités d'extraction, la définition d'un modèle économique pour assurer maintenance et évolutions, la traduction de l'application en espagnol dans le cadre du programme ARDI2 (projet de coopération transfrontalier entre le Pays-Basque Nord et Sud, et la Navarre), ainsi que l'extension potentielle du dispositif à d'autres filières dans une logique de convergence entre observatoires.

3.3. Mise en place d'un protocole de phénotypage des anomalies en centre de sélection

Les OS réalisent chaque année plusieurs étapes de pointage des animaux candidats à la sélection, depuis le repérage des jeunes jusqu'à l'entrée en station ou en centre d'insémination animale, ou lors des commissions raciales. À chacune de ces étapes, des critères morphologiques et fonctionnels sont évalués, et les causes de refus sont consignées dans les documents des OS ou dans les Systèmes Nationaux d'Information Génétique (SNIG). L'exploitation de ces données a permis d'identifier les anomalies les plus fréquentes et les plus pénalisantes pour les schémas de sélection et de les étudier dans le cadre de PRESAGE, il s'agit :

- des anomalies du cornage en lien avec la cryptorchidie dans la race ovine Manech Tête Rousse ;
- des anomalies du cornage en races ovines Noire du Velay et Lacaune ;
- des défauts de pattes avant chez la chèvre ;
- des problèmes d'entropions en race ovine Romane, non prévus initialement au projet mais ayant fait l'objet d'une sollicitation auprès de PRESAGE.

Pour chacune de ces anomalies, des protocoles de phénotypage ont été mis en place en lien avec la recherche afin de collecter des données pour des analyses génétiques. Ces protocoles de phénotypage ont parfois dû être réadaptés à la suite de premières analyses génétiques non concluantes de manière à disposer d'informations plus précises. Cette première étape a permis d'élaborer un protocole standardisé de remontée des anomalies en centre de sélection.

En race ovine Manech Tête Rousse, bien que le standard racial soit « sans cornes », une augmentation marquée de la fréquence d'animaux cornus est observée depuis plusieurs années : en 2021, environ 20 % des femelles et 60 % des mâles présentaient des cornes. Parallèlement, une hausse des cas de cryptorchidie a été constatée chez les animaux sans cornes. Le phénotypage du cornage et de la cryptorchidie, déjà en place, a été poursuivi à différents stades du parcours de sélection (repérage des jeunes mâles, entrée en centre, qualification des femelles). Ces notations ont permis de constituer une base combinant phénotypes et génotypes pour 740 agneaux mâles candidats à la sélection et 80 agneaux cryptorchides sans cornes, utilisée pour les analyses génétiques présentées dans le paragraphe 4.1.



En races ovines Noire du Velay et Lacaune, les gestionnaires des schémas de sélection ont observé une évolution très rapide du nombre d'individus cornus ces dernières années, alors que le standard est également « sans cornes ». Un protocole de phénotypage des agneaux a donc été mis en place dans le cadre de PRESAGE afin de noter le cornage à l'entrée des mâles en station (3-4 mois) selon la présence/absence et/ou les caractéristiques des cornes.

En caprin, les déformations des membres antérieurs, régulièrement consignées en routine et éliminatoires dans les schémas de sélection, ont fait l'objet d'un dispositif de prélèvement ciblé dans le cadre du projet, mais le nombre limité de cas documentés et de cas contrôle génétiquement liés, et l'analyse conjointe de tous les types de déformations (8 cas des pattes torses et 5 cas d'individus à 5 pattes séquencés tout génome) n'a pas permis d'identifier un locus significativement associé avec ces phénotypes. En effet, les séquences ont été alignées sur le génome de référence et les variants de type SNP détectés, mais les analyses nécessitent plus d'animaux ou des informations nouvelles pour pouvoir trier les variants et espérer identifier des mutations causales.

Enfin, en race ovine Romane, des cas significatifs d'entropion (anomalie génétique récessive à pénétrance incomplète) ont conduit à la mise en place d'un protocole clinique standardisé permettant de caractériser les animaux atteints, malgré la variabilité d'expression du phénotype avec l'âge : 6 duos ou trios avec un animal atteint et un frère ou sœur et/ou père/mère sain, soit 17 animaux au total, ont ainsi été séquencés tout génome. Là encore, les analyses n'ont pas permis d'identifier de mutation causale.

L'ensemble de ces travaux a permis d'établir un protocole de remontée des anomalies dans les schémas de sélection, constituant une étape clé pour améliorer leur détection, leur suivi et leur étude génétique chez les petits ruminants. Parmi les causes de disqualification notées par les OS, on retrouve un certain nombre de tares qui reviennent fréquemment, telles que les anomalies de mâchoire (bégue et grignard), les défauts de pattes ou de locomotion, les trayons surnuméraires, ou les anomalies de cornage. D'autres critères sont quant à eux propres à chaque race en fonction de leur prévalence, comme les problèmes de dentition, les hernies, la cryptorchidie, ou encore la forme de la tête ou des oreilles. La notation systématique de ces défauts, déjà identifiés ou non (via les commentaires des défauts « autres »), permet de suivre l'évolution de leur fréquence au fil du temps et de pouvoir déclencher des alertes en cas d'évolution significative du nombre de cas.

4. L'analyse génétique des anomalies

4.1. Analyse génétique des anomalies observées : du phénotype au génotype

Pour identifier l'origine génétique d'une anomalie, l'approche classique mise en œuvre repose sur l'étude des phénotypes anormaux et de l'ADN des individus atteints en comparaison des individus sains et possiblement apparentés. Lorsque l'origine génétique de l'anomalie est connue, dans la même espèce, ou dans une autre espèce, une approche par étude, voire séquençage de gènes candidats peut être envisagée. Ce fut le cas pour l'épidermolyse bulleuse en Mouton Vendéen avec la découverte d'une mutation dans le gène candidat *ITGB4* (Fabre *et al.*, 2021) déjà impliqué chez les bovins (Michot *et al.*, 2015). En absence de candidats évidents et lorsque le nombre d'individus échantillonnés le permet, les ADN sont génotypés sur puce à SNP (18, 50 ou 60k SNP), ou entièrement séquencés. Les données obtenues permettent des analyses d'association sur tout le génome dite GWAS (Genome Wide Association Study) ou de cartographie des régions homozygotes (Autozygosity mapping). Les stratégies d'analyses mises en place dépendent largement des hypothèses sur le déterminisme génétique supposé de l'anomalie (Georges *et al.* 2019).

En race ovine Manech Tête Rousse, la cryptorchidie (absence de descente des testicules et infertilité associée) est une anomalie associée à l'absence de corne car observée uniquement sur une partie des



béliers sans corne. Pour identifier l'origine génétique de cette anomalie, les génotypes (puce SNP 50k) d'animaux cornus et non cryptorchides (n=100) ont été comparés aux génotypes d'animaux cryptorchides sans cornes (n=25). L'analyse GWAS de type cas/contrôle entre ces deux groupes a montré un signal très significatif dans la région génomique du gène *RXFP2* sur le chromosome 10. Ce gène est déjà connu pour contrôler le phénotype sans corne lié à l'insertion d'un rétrogène dans sa partie terminale (Wiedemar & Drögemüller, Animal Genetics 2015). Cependant, grâce à des marqueurs spécifiques de la puce SNP et un test génétique dédiée pour cette insertion, nous avons pu démontrer que cette mutation par insertion (INS) n'était pas responsable de la cryptorchidie. Nous avons alors séquencé le génome complet de 2 animaux cryptorchides et identifié une nouvelle mutation récessive, en amont de l'insertion, créant une perte de fonction du gène *RXFP2*. Cette mutation entraîne également à elle seule un phénotype sans corne, montrant que le gène *RXFP2* est impliqué dans les deux phénotypes.

Concernant la présence de cornes dans des races ovines non cornues, 282 béliers (168 Noire du Velay et 154 Lacaune) ont également été génotypés avec les puces SNP 50K ou 60k. Les données de génotypages des deux races ont été analysées soit séparément, soit conjointement. La mutation d'insertion (INS) connue dans le gène *RXFP2* pour le cornage ne semblait pas impliquée puisqu'elle est fixée à l'état homozygote INS/INS dans ces deux races. Cependant, en race Lacaune, 2 SNP significativement associés à la présence de cornes ont été trouvés dans le gène *EYA1* (EYA transcriptional coactivator and phosphatase 1). En revanche, l'analyse génétique sur 236 béliers Noire du Velay n'a pas permis d'identifier le déterminisme génétique pour la présence de ces cornes. Nous avons aussi mis en évidence la complexité du phénotype pour ce type de cornage. En effet, les observations concernaient la présence de cornillons très souvent mobiles plutôt que de cornes très développées. Ce phénotype devra être détaillé de mesures régulières au cours de la croissance des animaux avec l'étude d'un plus grand nombre d'animaux.

Pour les anomalies suivantes remontées par les déclarations : entropion, pattes torses, cinq pattes, anomalie de la tête, intersexué, hernie, nous avons pu collecter assez peu d'échantillons de cas et de contrôles génétiquement liés pour permettre une approche GWAS. Aussi, nous avons opté pour une stratégie de séquençage tout génome de 30 animaux en tout (6 duos ou trios Romane avec un animal atteint et un frère ou sœur et/ou père/mère sain, correspondant à 17 animaux au total ; 8 cas pour les pattes torse et 5 cas pour les « 5 pattes »). Pour l'ensemble de ces animaux, les séquences ont été alignées sur le génome de référence et les variants de type SNP ou petites insertions/délétions ont été détectés et comparés à ceux de différentes banques de variants. A ce stade, les analyses nécessitent plus d'animaux ou des informations nouvelles pour pouvoir affiner le tri des variants et espérer identifier des mutations causales.

Des analyses cytogénétiques étaient envisagées dans le cadre de PRESAGE en vue de valider des anomalies détectées par des approches de génomiques et d'identifier des causes chromosomiques à des cas d'infertilité ou de qualité de semence dégradées (oligo-, azoospermies non réversibles). Cependant, aucun cas d'infertilité ou de qualité de semence dégradée n'a été remonté via l'observatoire. L'étude de ces différentes anomalies a permis de définir un protocole d'analyse et de validation des anomalies génétiques présenté sous la forme d'un arbre de décision (Figure 4).

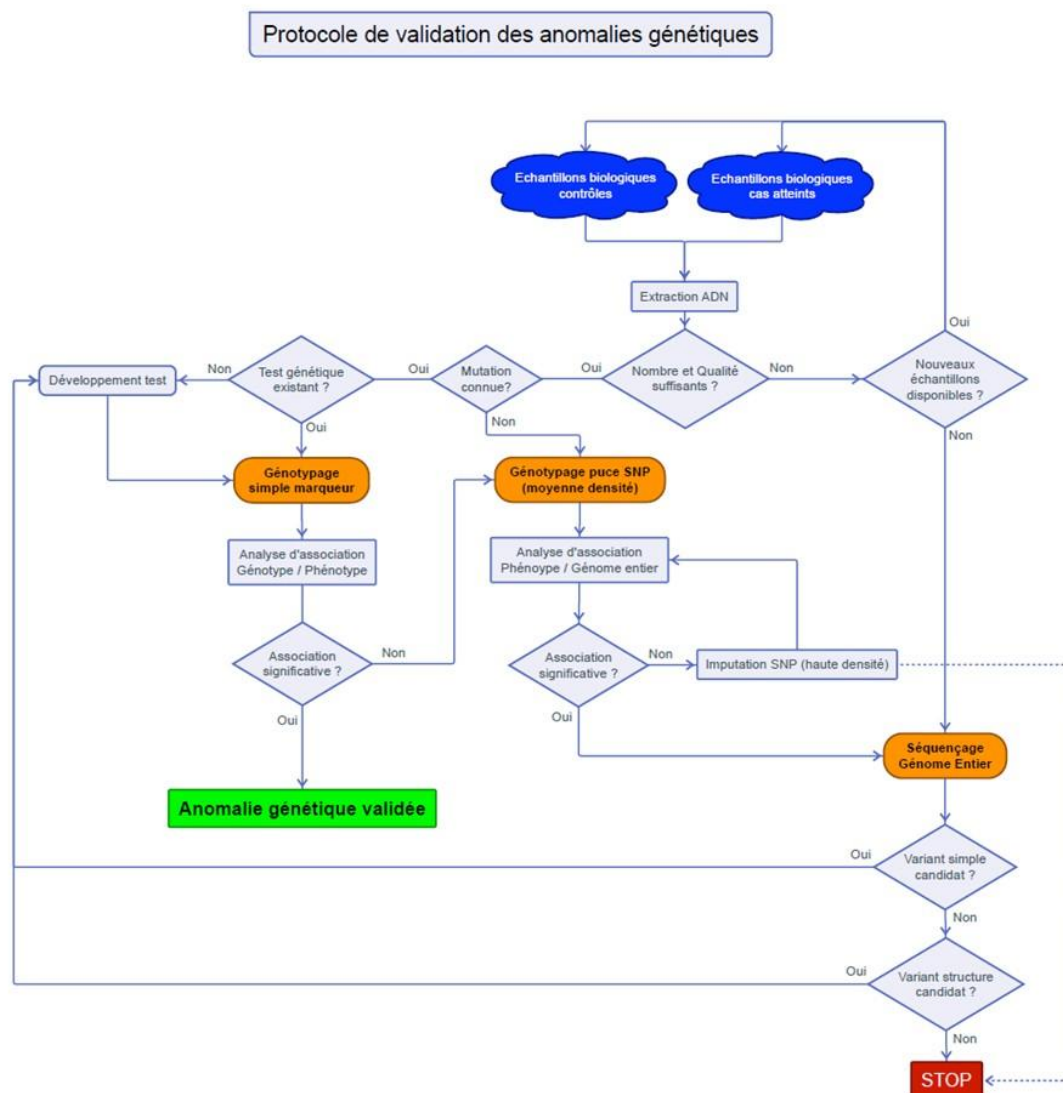


Figure 4 : Arbre de décision pour l'étude et la validation des anomalies génétiques

Description de la figure

La figure 4 présente l'arbre de décision en vue de la validation des anomalies génétiques. Ainsi, dès lors qu'on a des échantillons biologiques de cas atteints et de cas contrôles, il est possible de réaliser une extraction d'ADN.

Si le nombre ou la qualité des échantillons ne sont pas suffisants, alors il s'agit de commencer par collecter de nouveaux cas. S'il n'en existe pas, il est alors possible de réaliser un séquençage génome entier pour trouver un éventuel variant simple candidat ou un variant structure candidats. Si c'est le cas, on peut passer au développement d'un test génétique, sinon on s'arrête là.

Si le nombre ou la qualité des échantillons sont suffisants et que la mutation est inconnue, alors il s'agit de génotyper les cas sur puce moyenne densité et d'effectuer une analyse d'association phénotype / génome entier. Si l'association n'est pas significative, il est alors possible de faire une imputation SNP haute densité avant de refaire l'analyse. Si ça ne suffit pas, on s'arrête là. Si au contraire on trouve une association, on peut passer à un séquençage du génome entier pour voir s'il s'agit d'une mutation simple variant ou d'un variant structure, auxquels cas il est ensuite possible de développer un test, sinon on s'arrête là.

Dès lors que la mutation est connue et qu'un test existe, il est possible de faire du génotypage simple marqueur et une analyse d'association phénotype / génome entier et si l'association est significative, alors l'anomalie est validée. Si ce n'est pas le cas, on cherche une nouvelle mutation.



4.2. Analyse de génétique inverse : du génotype au phénotype

Dans le cas de mutations létales, notamment au stade embryonnaire, les phénotypes et les échantillons d'ADN ne sont pas disponibles. Ainsi d'autres approches dites de génétique inverse permettent d'identifier l'origine génétique d'anomalies qui interviennent très précocement dans le développement d'un individu. Ces approches inverses permettent de tirer parti des nombreux génotypages obtenus en particulier dans le cadre de la sélection génomique. Des analyses statistiques de ces génotypes permettent de rechercher des régions du génome en déficit d'animaux homozygotes, ces régions étant supposées porter des mutations récessives délétères. En effet, le déficit d'homozygotes s'expliquerait par la mort précoce des animaux avant leur génotypage, mais pas seulement. En effet, un biais de sélection dû à un défaut d'apparence (malformation, retard de croissance, non-conformité au standard de race) peut conduire également à un déficit d'homozygotes.

Nous avons tout d'abord étudié la faisabilité d'une telle approche dans les populations de petits ruminants engagées dans un programme de sélection génomique, sur la base d'analyses déjà opérationnelles chez les bovins (Vanraden *et al.*, 2011 ; Fritz *et al.*, 2013). Cette méthode a permis de mettre en évidence de nombreuses régions (ou haplotypes) indépendantes présentant un déficit d'homozygote de 75 à 100 % uniquement en races ovines Lacaune (Ben Braiek *et al.*, 2021) et Manech Tête Rousse (MTR) (Ben Braiek *et al.*, 2022a), mais pas encore dans les autres races laitières ovines ou caprines, faute d'un nombre suffisant de génotypages informatifs. Au total, 13 haplotypes (ou régions génomique) indépendants en races ovines Lacaune (LDHH) et Manech Tête Rousse (MTRDHH) ont ainsi été découverts. L'analyse de la fertilité et de la mortalité permet de confirmer que certains des haplotypes détectés sont associés à de la létalité au cours du développement embryonnaire (LDHH1, 2 et 9 ; MTRDHH2), ou autour de la naissance (LDHH3 et 6, et MTRDHH1). Les autres haplotypes sont supposés conduire à de la mortalité plus tardive (MTRDHH3) ou être associés à des défauts morphologiques contre-sélectionnés. Avec des fréquences de porteurs variant de 3 % à 16 %, certains haplotypes offrent un potentiel avantage sélectif des béliers porteurs hétérozygotes, notamment pour la production laitière augmentée de leurs filles (LDHH, 3, 9 et 11 ; MTRDHH2).

Nous nous sommes ensuite attachés à la découverte des variants candidats pouvant expliquer le déficit d'homozygotes. Cette approche a été réalisée par le séquençage et l'analyse bio-informatique de génomes complets de 25 béliers Lacaune et 22 béliers Manech Tête Rousse parmi lesquels 1 ou 2 étaient porteurs des haplotypes d'intérêt. Parmi les 13 haplotypes, des variants candidats "perte de fonction" ont été identifiés dans 10 gènes différents. Une fois ces derniers identifiés, un test génétique spécifique a été développé pour établir leur fréquence et leur partage entre races sur une cohorte de 4700 agneaux des 5 races ovines laitières et un panel de 725 animaux représentant la diversité des races ovines françaises. Enfin, pour 3 des allèles délétères les plus fréquents, des accouplements à risque ont été réalisés entre animaux hétérozygotes pour générer des individus homozygotes, prouver le caractère récessif léthal et évaluer l'impact physiopathologique de ces variants candidats. La mortalité chez le jeune agneau homozygote de quelques jours a pu être prouvée pour les variants dans *CCDC65* et *MMUT*, respectivement en lien avec un syndrome respiratoire et un syndrome métabolique (Ben Braiek *et al.*, 2022b ; Ben Braiek *et al.*, 2024a). Quant au variant de type « frameshift » de *SLC33A1*, il entraîne une perte embryonnaire dans le premier mois de gestation et certains défauts morphologiques à la naissance (Ben Braiek *et al.*, 2024b).

L'ensemble de ce travail de génétique inverse, du génotype au phénotype, apporte de nouvelles connaissances sur les anomalies génétiques existantes qui n'avaient pas été observées au préalable dans les populations ovines.



5. Différentes méthodes de gestion des anomalies génétiques

5.1. Synthèse des méthodes de gestion des anomalies dans les populations en sélection

Dans PRESAGE, nous avons étendu l'analyse des méthodes de gestion des anomalies génétiques à tout variant génétique dont la gestion revêt un intérêt (anomalie génétique, variant bénéfique ou néfaste mais non délétère). En s'appuyant sur la littérature scientifique, nous avons fait le choix de classer ces méthodes en 4 groupes.

L'information sur les variants affectant les caractères en sélection peut être gérée à l'aide de méthodes adaptées visant à sélectionner les polygènes (nombreux gènes à faible effet sur le caractère sélectionné) tout en accroissant la fréquence du variant d'intérêt **[groupe 1]**. Ces méthodes (Larzul *et al.*, 1997 ; Manfredi *et al.*, 1998 ; Dekkers *et al.*, 1998 ; Villanueva *et al.*, 1999 ; Sanchez *et al.*, 2005) ont été développées en parallèle de la découverte de gènes et QTL (*quantitative trait locus*) à effets majeurs tels que le locus Hal de la sensibilité à l'halothane chez le porc Piétrain ou les variants du gène de la myostatine pour l'hypermuscularité chez les espèces bovines et ovines. Les évolutions technologiques des méthodes de génotypages ont ensuite induit de nouvelles méthodes d'évaluation, sélection assistée par marqueurs puis sélection génomique, et de nouvelles méthodes de gestion des populations ad hoc (Carthy *et al.*, 2019 ; Cole *et al.*, 2018 ; Howard *et al.*, 2017). Le passage à la sélection génomique a notamment induit le développement de méthodes permettant de considérer l'information aux gènes majeurs et QTL lors de l'optimisation des accouplements (Shepherd & Kinghorn, 2001) ou encore de conserver ces QTL dans le cadre de schémas de croisement (Odegard *et al.*, 2009a et 2009b). Le cas particulier de variants présentant un intérêt à l'état hétérozygote a été évalué en traitant la gestion de gènes d'ovulation en ovins allaitants (Raoul *et al.*, 2017 et 2018).

Certains variants à effet majeur sont pris en compte dans l'évaluation génomique afin d'accroître la précision des estimations **[groupe 2]**. Cette option a été testée pour plusieurs variants tels que celui de la caséine (Carillier-Jacquin *et al.*, 2016) en s'appuyant sur différentes méthodes telles que le « *gene content* » (Gengler *et al.*, 2007) ou le single-step BLUP génomique pondéré (Weighted ssGBLUP, Teissier *et al.*, 2018 ; Oget *et al.*, 2019) ou en densifiant une région QTL avec des variants de séquence (Talouarn *et al.*, 2021).

Dans le cas de la gestion d'un variant d'intérêt n'affectant pas le caractère **[groupe 3]**, on distingue i) l'accroissement de l'allèle d'intérêt, par exemple pour l'allèle de résistance à la tremblante en ovine (Palhière *et al.*, 2003) ou de l'allèle sans-corne en bovin (Spurlock *et al.*, 2014 ; Scheper *et al.*, 2016) ; ii) son intégration dans une population cible qui en est dépourvue (introgression), exemple de l'allèle d'hypermuscularité en Lacaune viande ou de l'allèle sans-corne en Holstein (Gaspa *et al.*, 2015). Les stratégies mises en place visaient à trouver un compromis entre la vitesse de fixation de l'allèle favorable, le gain génétique pour les caractères quantitatifs inclus dans l'objectif de sélection et la vitesse d'accroissement de la consanguinité.

L'accroissement du nombre de variants à gérer (allèles favorables et défavorables non délétères, anomalies génétiques délétères) a rendu nécessaire l'élaboration de nouvelles méthodes **[groupe 4]** pour leur gestion simultanée dans les programmes de sélection et populations commerciales. En effet la stratégie d'élimination de porteurs d'allèles délétères est rendue inapplicable à cause de cet accroissement (Van Doormaal *et al.*, 2008 ; Van Eenennaam & Kinghorn, 2014). Pour des raisons technico-économiques et éthiques, les méthodes basées sur l'édition du génome n'ont pas été retenues (Jenko *et al.*, 2015 ; Hickey *et al.*, 2016 ; Gonen *et al.*, 2017) pour nos travaux. Nous avons, sur la base des travaux publiés pour l'espèce bovine, considéré deux stratégies et leur combinaison pour l'espèce ovine : (1) l'optimisation des accouplements visant à éviter les accouplements à risque (Cole, 2015) et (2) la prise en compte des allèles à gérer dans le calcul de l'indice de sélection (Boichard, 2016).



Pour l'optimisation des accouplements, la stratégie proposée par Cole (2015) vise à calculer un score pour chaque accouplement possible entre un male et une femelle. Ce score fait intervenir l'espérance de la valeur génétique et de la consanguinité de la descendance ainsi que sa probabilité d'être homozygote pour les anomalies connues. Le choix des accouplements, généralement sous contraintes (e. g. limite du nombre de femelles accouplées à un male donné) est ensuite réalisé en fonction des scores, soit séquentiellement, soit à l'aide d'un algorithme d'optimisation. Les extensions de cette méthode, utilisée à l'échelle des élevages commerciaux et prenant en compte la technique de sexage de la semence (Brochard *et al.*, 2018 ; Bérodiér *et al.*, 2020 et 2021 ; Bengtsson *et al.*, 2023) n'ont pas été retenues dans le cas des petits ruminants.

Pour la prise en compte des allèles à gérer dans le calcul de l'indice de sélection, la méthode décrite par Boichard (2016) a montré son efficacité pour des populations bovines laitières françaises (Grohs *et al.*, 2016 ; Hozé *et al.*, 2018). Cette méthode, basée sur le concept d'effet moyen des allèles tel que décrit par Falconer (1972), dérive, pour chacune des anomalies, les valeurs génétiques associées à un génotype en fonction de la fréquence de l'anomalie et de son « coût » économique. Ces valeurs sont ensuite incluses dans l'indice de sélection utilisé aux différentes étapes du programme de sélection.

A noter que Van Eenennaam et Kinghorn (2014) ont proposé une approche affectant la contribution des reproducteurs aux accouplements basée sur la prédiction du nombre d'allèles létaux récessifs et de génotypes létaux récessifs. Cette approche a été intégrée dans un logiciel de gestion des accouplements, mateSel, basé sur un algorithme génétique permettant également d'optimiser, sous contraintes techniques, le gain et la diversité génétiques. Enfin, les extensions par Jean-Jacques Colleau de sa méthode de Sélection à Parenté Minimum Génomique ou SPMG (Palhière *et al.* 2022) adaptée à la gestion de ces variants a été évaluée sur données réelles en caprins.

5.2. Intégration de la gestion d'une anomalie génétique dans la méthode de Sélection à Parenté Minimum Génomique (SPMG)

La méthode SPMG, appliquée en caprin chaque année par CAPGENES, consiste à optimiser l'utilisation (i. e. contribution génétique) et les accouplements des boucs d'IA pour atteindre le progrès génétique souhaité tout en minimisant les parentés entre reproducteurs. Dans le cadre de PRESAGE, cette méthode a été adaptée pour ajouter la gestion d'anomalies ou gènes. La SPMG est devenue la SPM2G : « Sélection à Parenté Minimum Génomique et Génique ». Elle fonctionne de la façon suivante :

- 1^{er} passage sans les gènes pour choisir le progrès génétique souhaité ;
- 2^e passage avec les gènes pour optimiser le compromis diversité / anomalie génétique tout en fixant le progrès génétique retenu à l'étape 1.

Cette méthode a été testée sur les données réelles de la race caprine Saanen (accouplements 2022) en intégrant 6 gènes avec des poids différents (caséine α s1, DGAT1, PrP, cou rose, et QTL du chromosome 19 pour lequel on construit 3 haplotypes différents dans une région du génome qui code pour beaucoup de caractères (Martin *et al.*, 2018) – à titre d'exemple l'un des allèles est favorable aux caractères laitiers et défavorable pour la morphologie mamelle, l'autre allèle c'est l'inverse, ...).

La figure 5 montre la fréquence des allèles favorables aux 6 gènes d'intérêt chez les candidats et les pères à boucs retenus par la SPMG (sans les gènes) et la SPM2G (avec les gènes). Les résultats montrent que cette nouvelle méthode a une efficacité supérieure à la SPMG. La SPM2G a permis d'améliorer la fréquence des allèles désirables, pour les gènes considérés, de + 5,2 points en moyenne (+ 0,7 à + 15,9 points selon les gènes) tout en ayant un impact modéré sur la variabilité génétique (+ 0,09 point pour la consanguinité moyenne soit + 2 %, et + 0,19 point pour la parenté produits soit + 3 %).

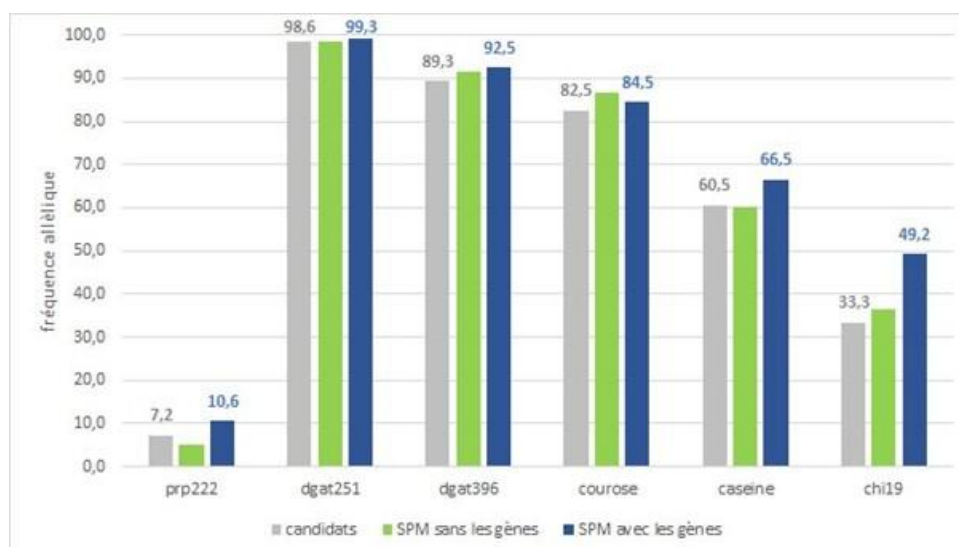


Figure 5 : Fréquences des allèles désirables pour les 6 gènes considérés chez les pères à boucs : a) candidats ; b) sélectionnés sans prendre en compte les gènes ; c) sélectionnés avec prise en compte des gènes

Description de la figure

La figure représente un histogramme avec les 6 gènes en abscisses et les fréquences alléliques de l'allèle désirable en ordonnée. Pour chaque gène, 3 groupes d'animaux sont considérés : les pères à boucs candidats, les pères à boucs sélectionnés après la SPMG sans prise en compte des gènes et les pères à boucs sélectionnés après la SPMG avec prise en compte des gènes. Il apparaît que la fréquence des allèles désirables est systématiquement augmentée par rapport aux candidats lorsqu'on utilise la SPMG avec prise en compte des gènes alors que c'est plus aléatoire avec la SPMG sans prise en compte des gènes.

Cette méthode nécessite tout de même un peu de temps pour définir les objectifs (progrès génétique souhaité, poids attribué à chaque gène), d'autant que les poids dépendent de la dynamique des fréquences. Par ailleurs, à moins de réduire le progrès génétique, l'amélioration des fréquences des gènes sera moindre si le nombre de gènes à gérer augmente. Au vu de ces résultats, CAPGENES a décidé de mettre en œuvre cette méthode dès février 2023.

Cette méthode a ensuite été comparée à une autre méthode décrite dans la bibliographie (Boichard *et al*, 2016). Cette dernière, développée spécifiquement pour la gestion des anomalies génétiques bovines, consiste à attribuer un poids économique aux anomalies et ainsi calculer un index combinant caractères en sélection et anomalies. L'index peut alors être utilisé directement avec la version d'optimisation des contributions précédente, la SPMG. Ont donc été comparées la SPM2G et la SPMG avec l'index intégrant les anomalies. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes sont relativement proches. La méthode décrite par Boichard *et al* (2016) est très sensible au poids économique attribué à l'anomalie, or ce poids peut être difficile à évaluer (ex : poids économique de la résistance à la tremblante). En revanche, la méthode est simple à utiliser et accessible, et ne nécessite pas de réévaluer les pondérations en cas d'évolution des fréquences. Elle donne un indicateur intéressant utilisable à toutes les étapes de sélection. La méthode SPM2G s'appuie sur une importance relative des anomalies/gènes d'intérêt décidée par les gestionnaires du schéma. Ces poids doivent être rediscutés en cas d'évolution forte des fréquences. Cette méthode robuste et optimisée est spécifique aux caprins et ne peut donc pas être facilement utilisée par d'autres schémas de sélection, notamment chez les ovins en raison de l'utilisation de semence fraîche pour l'insémination.



5.3. Evaluation de différentes méthodes de gestion des anomalies génétiques à l'aide de simulation et rédaction d'un bilan des différentes méthodes disponibles

Une première méthode de prise en compte des anomalies a été basée sur le « *gene content* », méthode qui permet d'inférer la probabilité de porter un allèle qu'un individu peut transmettre à sa descendance. Cette évaluation a été réalisée par simulation stochastique pour différentes structures familiales : 25 familles de 20 descendants, et 50 familles de 10 ou 30 descendants. Les individus étaient sélectionnés sur un indice combinant un index génomique et différents poids, compris entre 0 et 1, accordés au « *gene content* ». Avec un poids de 0, l'anomalie n'était pas gérée tandis qu'un poids de 1 entraînait l'élimination des porteurs. Les résultats montraient que le poids accordé au « *gene content* » permettait de contrôler la vitesse d'élimination de l'anomalie.

Les méthodes décrites précédemment (voir 5.1) et leur combinaison ont été évaluées à l'aide de simulations stochastiques pour la gestion de 5 allèles létaux dans un programme de sélection petit ruminant. De nouvelles simulations ont permis d'évaluer les mêmes stratégies dans le cas de la ségrégation de 5 allèles non létaux.

Compte-tenu des connaissances acquises dans le cadre de PRESAGE sur le cornage et la cryptorchidie en race ovine Manech Tête Rousse, une modélisation du programme de sélection de cette population a été réalisée afin de simuler différentes stratégies de gestion de ce polymorphisme atypique. Par simulation, l'évolution de la fréquence de ces allèles délétères a été évaluée en fonction de stratégies combinant des critères phénotypiques (élimination des mâles cornus, exclusion des mères à béliers cornues) et/ou génomiques (prise en compte de l'haplotype cryptorchidie/corne lors de la sélection des mâles d'insémination). Même sans stratégie dédiée à la réduction des fréquences d'allèles indésirables, les allèles létaux étaient purgés et leurs fréquences diminuaient lentement. La méthode proposée par Boichard a néanmoins permis de diminuer plus efficacement et plus rapidement les fréquences des allèles létaux tandis que la stratégie de Cole a réduit la mortalité liée aux anomalies mais n'a pas permis une diminution plus rapide des allèles létaux par rapport à une situation dans laquelle aucune stratégie de gestion de ces allèles est appliquée. Cependant, la stratégie de Cole a eu un effet bénéfique sur le gain génétique du caractère sélectionné.

Contrairement aux allèles létaux, les allèles non létaux ne sont pas purgés en absence de stratégie dédiée. La stratégie de Cole s'avère peu efficace dans le cadre d'un programme de sélection petit ruminant dans laquelle les contributions des pères à mâles sont relativement peu variables par rapport à un programme de sélection bovin. En revanche, la stratégie proposée par Boichard s'avère très efficace pour la sélection des allèles favorables même en absence d'information génomique sur les femelles. Le gain génétique et l'accroissement de la consanguinité sont très peu affectés par la gestion de ces allèles, en accord avec les résultats obtenus par Van Eenennaam et Kinghorn (2014). Il conviendrait de préciser le nombre d'allèles à partir duquel la situation en termes de gain et/ou accroissement de la consanguinité est dégradée.

L'étude de la gestion du cornage et de la cryptorchidie en MTR a montré que, sans critère génomique, les stratégies permettant la diminution de la fréquence des individus cornus s'accompagnent d'un accroissement des agneaux cryptorchides.

En présence d'information génomique, les différentes stratégies permettent toutes de diminuer les fréquences des anomalies à moyen terme (pas de différence sensible entre stratégies) mais ont des effets contrastés sur le gain génétique. Le tableau 2 ci-dessous récapitule les résultats obtenus par la combinaison d'un critère génomique et phénotypique.

**Tableau 2** : Résumé de l'impact de différentes stratégies sur 3 critères clés du schéma de sélection

	Absence de gestion	Elimination mâles cornus	Exclusions mères à béliers cornus
Progrès génétique	=	- 18 à - 23 %	- 11 à - 13 %
Diversité génétique	=	=	=
Fréquence de l'anomalie	=	↘ cryptorchides ↘ cornus	↘ cornus

Les simulations semblent indiquer que la stratégie la plus prometteuse est de combiner un critère génomique pour la sélection des pères à béliers et un critère phénotypique (absence de cornes) pour la sélection des mères à béliers.

Cette stratégie permet également de s'affranchir du génotypage / séquençage des femelles.

Ces résultats issus de simulations et les résultats issus des études de la SPM2G sur données réelles (voir 5.2), complétés par des cas d'étude de gestion d'anomalie (gestion de l'épidermolyse bulleuse en Mouton Vendéen, du cornage en races ovines Manech Tête Rousse et Noire du Velay notamment) ont été discutés avec des gestionnaires de races ovines et caprines. Cette discussion a permis d'élaborer, sous forme d'une présentation PowerPoint, un bilan des différentes méthodes disponibles à destination des maîtres d'œuvres des programmes de sélection.

6. Conclusion

Le projet PRESAGE nous a permis de poser les bases scientifiques, techniques et organisationnelles de l'observatoire des anomalies génétiques chez les petits ruminants.

L'analyse comparative des observatoires existants a ainsi mis en évidence les facteurs de réussite mais également les principaux écueils rencontrés (gouvernance, financement, sous-déclaration des anomalies). Ces enseignements, combinés aux attentes des filières ovines et caprines, ont servi de base à la réflexion sur la structuration d'un observatoire dédié aux petits ruminants et la rédaction d'une charte de fonctionnement, en soulignant l'importance d'une gouvernance partagée, d'une implication précoce de l'ensemble des parties prenantes et de la nécessité de trouver des financements pérennes. L'ouverture vers une structuration multi-espèces, en articulation avec l'ONAB et l'IFIP (projet SwAn), apparaît à ce titre comme une perspective pertinente pour mutualiser les moyens (humains, matériel, ...).

Sur le plan opérationnel, PRESAGE a permis de développer les outils essentiels à l'observatoire, que ce soit en termes de communication pour sensibiliser les différents acteurs aux anomalies et leur déclaration, ou à travers la mise en place d'une application mobile facilitant la remontée des cas. La mise en place de protocoles de phénotypage en centre de sélection et de validation des anomalies complète ce dispositif.

Sur le plan scientifique, l'identification de mutations causales ou candidates, que ce soit à partir de méthodes d'analyses classiques ou de génétique inverse, a permis d'avancer dans la connaissance du génome, mais également de démontrer l'intérêt de se doter d'un observatoire. Ces résultats soulignent également l'importance de valoriser les données moléculaires disponibles en intégrant les méthodes de génétique inverse pour la recherche d'anomalies génétiques.

Enfin, PRESAGE a apporté une contribution méthodologique à la gestion des anomalies génétiques. A travers l'outil d'aide à la décision produit, a proposé des clés pour évaluer la stratégie de gestion la plus adéquate en fonction de l'anomalie, et montré qu'il est possible de réduire efficacement la fréquence



d'allèles délétères tout en préservant le progrès génétique et la diversité génétique. L'adaptation et la mise en œuvre opérationnelle de la méthode SPM2G en caprins illustrent la faisabilité et l'intérêt de ces approches intégrées à l'échelle réelle des schémas de sélection.

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-Michel ASTRUC : <https://orcid.org/0000-0001-7685-1301>

Maxime BEN BRAIEK : <https://orcid.org/0000-0003-4770-0867>

Diane BUISSON : personID HAL : 1092325

Bertrand BOUFFARTIGUE : personID HAL : 1427120

Fabien CORBIERE : <https://orcid.org/0000-0003-3006-5561>

Renée DE CREMOUX : <https://orcid.org/0000-0002-3822-6465>

Stéphane FABRE : <https://orcid.org/0000-0001-7350-9500>

Isabelle PALHIÈRE : <https://orcid.org/0009-0009-6128-9569>

Alain PINTON : <https://orcid.org/0000-0002-0809-7180>

Jérôme RAOUL : <https://orcid.org/0000-0002-3140-4433>

Silvia RODRIGUEZ-RAMILO : <https://orcid.org/0000-0001-7150-0692>

Gwénola TOSSER-KLOPP : <https://orcid.org/0000-0003-0550-4673>

Contributions des auteurs

Jean-Michel ASTRUC : Analyse formelle, révision

Maxime BEN BRAIEK : Conceptualisation, recherche, révision

Diane BUISSON : Analyse formelle, administration du projet, rédaction, révision

Bertrand BOUFFARTIGUE : Révision

Fabien CORBIERE : Révision

Christel COUZY : Révision

Renée DE CREMOUX : Révision

Stéphane FABRE : Conceptualisation, supervision, recherche, fourniture de ressources, validation, rédaction, révision et correction, administration du projet, obtention du financement



Pierre MARTIN : Révision

Isabelle PALHIÈRE : Conceptualisation, méthodologie, révision

Alain PINTON : Conceptualisation, révision

Jérôme RAOUL : Conceptualisation, méthodologie, révision

Silvia RODRIGUEZ-RAMILO : Conceptualisation, méthodologie, révision

Gwenola TOSSER-KLOPP : Conceptualisation, supervision, recherche, fourniture de ressources, validation, rédaction, révision et correction

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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 partenaires de PRESAGE pour leur engagement et leur investissement tout au long du projet, mais également les membres des autres observatoires, éleveurs, vétérinaires et techniciens qui ont pris le temps de répondre aux enquêtes et participer aux réflexions pour identifier les attentes vis-à-vis de cet outil collectif.

Déclaration de soutien financier

Le projet PRESAGE a été financé par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (AAP CASDART RT 2020, appel à projets de recherche technologique pour la compétitivité et la durabilité des filières de la production à la transformation pour l'année 2020).

Références bibliographiques

Ben Braiek M, Fabre S, Hozé C, Astruc J-M, Moreno-Romieux C, **2021**. Identification of homozygous haplotypes carrying putative recessive lethal mutations that compromise fertility traits in French Lacaune dairy sheep. *Genet. Sel. Evol.* 53, 41.

Ben Braiek M, Moreno-Romieux M, Hozé C, Astruc JM, Fabre S. 745. Characterization of homozygous haplotype deficiency compromising fertility traits in Manech Tête Rousse dairy sheep. *12th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production (WCGALP)*, Jul **2022a**, Rotterdam, Netherlands. 3070-3073.

Ben Braiek M, Moreno-Romieux C, Allain C, Bardou P, Bordes A, *et al.*. A Nonsense Variant in CCDC65 Gene Causes Respiratory Failure Associated with Increased Lamb Mortality in French Lacaune Dairy Sheep. *Genes*, **2022b**, 13 (1), 45.

Ben Braiek M, Moreno-Romieux C, André C, Astruc J-M, Bardou P, *et al.*, **2024a**. Searching for homozygous haplotype deficiency in Manech Tête Rousse dairy sheep revealed a nonsense variant in the MMUT gene affecting newborn lamb viability. *Genet. Sel. Evol.* 56 (1), 16.

Ben Braiek M, Szymczak S, André C, Bardou P, Fidelle F, *et al.*. A single base pair duplication in the SLC33A1 gene is associated with fetal losses and neonatal lethality in Manech Tête Rousse dairy sheep. *Animal Genetics*, **2024b**, 55(4), 644-657.

Bengtsson C, Stålhammar H, Thomasen JR, Fikse WF, Strandberg E, Eriksson S, **2023**. Mating allocations in Holstein combining genomic information and linear programming optimization at the herd level. *J. Dairy Sci.*, 106(5): 3359-3375.

Bérodier M, Brochard M, Boichard D, Minery S, Ducrocq V, **2020**. Plans d'accouplements sur la base d'informations génomiques : mieux conseiller les éleveurs en utilisant mieux toute l'information disponible. *25èmes Rencontre Recherche Ruminants*.



- Bérodier M, Berg P, Meuwissen T, Boichard D, Brochard M, Ducrocq V. Improved dairy cattle mating plans at herd level using genomic information. *Animal*, **2021** Jan; 15(1): 100016.
- Boichard D, Grohs C, Michot P, Danchin-Burge C, Capitan A, *et al.* Prise en compte des anomalies génétiques en sélection : le cas des bovins. *INRA Productions Animales*, **2016**, 29 (5), 351-358.
- Brochard M, Boichard D, Capitan A, Fayolle G, Fritz S, Nicod L, Vacelet JM, **2018**. pANO, le risque d'anomalie létale pour les produits d'accouplements : principe et utilisation en race Montbéliarde sur la zone GEN'IAtest. *23èmes Rencontre Recherche Ruminants*.
- Carthy TR, McCarthy J, Berry DP. A mating advice system in dairy cattle incorporating genomic information, **2019**. *J. Dairy Sci.*, 102(9): 8210-8220.
- Carillier-Jacquin C, Larroque H and Robert-Granié C, **2016**. Including α s1 casein gene information in genomic evaluations of French dairy goats. *Genet. Sel. Evol.*, 48, 54.
- Cole JB, **2015**. A simple strategy for managing many recessive disorders in a dairy cattle breeding program. *Genet. Sel. Evol.* 47, 94.
- Cole JB, Van Raden PM, **2018**. Possibilities in an age of genomics: the future of selection indices. *J. Dairy Sci.*, 101, 3686–3701.
- Dekkers JCM and van Arendonk JAM, **1998**. Optimizing selection for quantitative traits with information on an identified locus in outbred populations. *Genetical Research*, 71, 257-275
- Fabre S, Chantepie L, Plisson-Petit F, Sarry J, Woloszyn F, *et al.* A novel homozygous nonsense mutation in ITGB4 gene causes epidermolysis bullosa in Mouton Vendéen sheep. *Animal Genetics*, **2021**, 52 (1), 138-139.
- Falconer DS, **1972**. Introduction to quantitative genetics. Oliver and Boyd.
- Gaspa G, Veerkamp RF, Calus MPL, Windig JJ, **2015**. Assessment of genomic selection for introgression of polledness into Holstein Friesian cattle by simulation. *Livest Sci.*, 179: 86–95.
- Gengler N, Mayeres P, Szydlowski M. A simple method to approximate gene content in large pedigree populations: application to the myostatin gene in dual-purpose Belgian Blue cattle. *Animal*, **2007** Feb; 1(1): 21-8.
- Gonen S, Jenko J, Gorjanc G, Mileham AJ, Whitelaw CBA and Hickey JM, **2017**. Potential of gene drives with genome editing to increase genetic gain in livestock breeding programs. *Genet. Sel. Evol.* 49(1):3.
- Grohs C, Duchesne A, Floriot S, Deloche MC, Boichard D, *et al.* L'Observatoire National des Anomalies Bovines, son action et ses résultats pour une aide efficace à la gestion des anomalies génétiques. *INRA Productions Animales*, **2016**, 29 (5), 307-318.
- Hickey JM, Bruce C, Whitelaw A, Gorjanc G. Promotion of alleles by genome editing in livestock breeding programmes. *J Anim Breed Genet.* **2016**; 133: 83–4.
- Howard JT, Pryce JE, Baes C, Maltecca C, **2017**. Invited review: inbreeding in the genomics era: inbreeding, inbreeding depression, and management of genomic variability. *J. Dairy Sci.*, 100(8): 6009-6024.
- Hozé C, Fritz S, Baur A, Grohs C, Danchin-Burge C, Boichard D, **2018**. Prise en compte des gènes d'intérêt dans les objectifs de sélection en bovins laitiers. *23èmes Rencontre Recherche Ruminants*.
- Jenko J, Gorjanc G, Cleveland MA, Varshney RK, Whitelaw CB, Woolliams JA, *et al.*, **2015**. Potential of promotion of alleles by genome editing to improve quantitative traits in livestock breeding programs. *Genet. Sel. Evol.* 47, 55.
- Larzul C, Manfredi E and Elsen JM, **1997**. Potential gain from including major gene information in breeding value estimation. *Genet. Sel. Evol.*, 29, 161–184.
- Manfredi E, Barbieri M, Fournet F and Elsen JM, **1998**. A dynamic deterministic model to evaluate breeding strategies under mixed inheritance. *Genet. Sel. Evol.*, 30, 127–148.
- Martin, P., Palhière, I., Maroteau, C., Clément, V., David, I., Klopp, G. T., & Rupp, R. **2018**. Genome-wide association mapping for type and mammary health traits in French dairy goats identifies a pleiotropic region on chromosome 19 in the Saanen breed. *Journal of Dairy Science*, 101(6), 5214-5226.



Michot 2015 Whole-genome sequencing identifies a homozygous deletion encompassing exons 17 to 23 of the integrin beta 4 gene in a Charolais calf with junctional epidermolysis bullosa

Michot 2016 A reverse genetic approach identifies an ancestral frameshift mutation in RP1 causing recessive progressive retinal degeneration in European cattle breeds

Odegard J, Sonesson AK, Yazdi MH, Meuwissen THE, **2009a**. Introgression of a major QTL from an inferior into a superior population using genomic selection. *Genet. Sel. Evol.*, 41(1): 38.

Odegard J, Yazdi MH, Sonesson AK, Meuwissen THE, **2009b**. Incorporating desirable genetic characteristics from an inferior into a superior population using genomic selection. *Genetics* 181, 737–745.

Oget C, Teissier M, Astruc JM, *et al.*, **2019**. Alternative methods improve the accuracy of genomic prediction using information from a causal point mutation in a dairy sheep model. *BMC Genomics* 20, 719.

Palhière I, Elsen JM, Astruc JM, Barillet F, Bed'Hom B, Bibé B, Bouix B, Brochard M, Catrou O, Dion F, François D, Griffon L, Jullien E, Orlanges M, Perret G and Tribon P, **2003**. Breeding for scrapie resistance in France. *In Proceeding of the International Workshop on Major Genes and QTL in Sheep and Goat*, 08-11 December 2003, Toulouse, France. CD-ROM communication no. 3-03.

Palhière I, Gousseau V, Colleau JJ. La Sélection à Parenté Minimum Génomique : principes et résultats pour les deux races caprines laitières principales françaises. *INRAE Productions Animales*, **2022**, 35 (3), 171-186.

Raoul J, Bodin L, Elsen JM and Swan AA, **2017**. Swan Optimal and practical strategies to manage an ovulation rate mutation located on the X chromosome in a French sheep breed. *In proceedings of the AAABG 22nd Conference*. 22: 49-52

Raoul J, Palhière I, Astruc JM, Swan A, Elsen JM. Optimal mating strategies to manage a heterozygous advantage major gene in sheep. *Animal*, **2018**; 12(3): 454-463.

Sánchez A, Ilahi H, Manfredi E and Serradilla JM, 2005. Potential benefit from using the *cs1*-casein genotype information in a selection scheme for dairy goats. *J Anim Breed Genet*, 122(1), 21–29.

Scheper C, Wensch-Dorendorf M, Yin T, Dressel H, Swalve H and König S, **2016**. Evaluation of breeding strategies for polledness in dairy cattle using a newly developed simulation framework for quantitative and Mendelian traits. *Genet Sel Evol*. 48: 50.

Shepherd RK, Kinghorn BP. Designing algorithms for mate selection when major genes or QTL are important. *Proc Assoc Advmt Anim Breed Genet*. **2001**; 14: 377–80.

Spurlock DM, Stock ML, Coetzee JF, **2014**. The impact of 3 strategies for incorporating polled genetics into a dairy cattle breeding program on the overall herd genetic merit. *J. Dairy Sci.*, 97: 5265–74.

Talouarn E, Teissier M, Bardou P, Larroque H, Clément V, Palhière I, Robert-Granié C, *et al.*, **2021**. Using sequence variants of a QTL region improves the accuracy of genomic evaluation in French Saanen goats. *J. Dairy Sci.*, 104(1): 588-601.

Teissier M, Larroque H & Robert-Granié C, **2018**. Weighted single-step genomic BLUP improves accuracy of genomic breeding values for protein content in French dairy goats: a quantitative trait influenced by a major gene. *Genet Sel Evol*. 50, 31.

Van Doormaal BJ, Kistemaker GJ. Managing genetic recessives in Canadian Holsteins. *Interbull Bull*. **2008**; 38: 75–9.

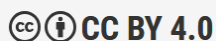
Van Eenennaam AL, Kinghorn BP. Use of mate selection software to manage lethal recessive conditions in livestock populations. *10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production (WCGALP)*, Aug **2014**, Vancouver, Canada, 17–22.

Villanueva B, Pong-Wong R, Grundy B and Woolliams JA, **1999**. Potential benefit from using an identified major gene in BLUP evaluation with truncation and optimal selection. *Genet. Sel. Evol*, 31, 115–133.

Wiedemar N, Drögemüller C. A 1.8-kb insertion in the 3'-UTR of RXFP2 is associated with polledness in sheep. *Animal Genetics*, **2015**, 46(4), 457-61.



Pour citer cet article : Diane BUISSON, Jean-Michel ASTRUC, Maxime BEN BRAIEK, Bertrand BOUFFARTIGUE, Fabien CORBIÈRE, Christel COUZY, Renée DE CREMOUX, Stéphane FABRE, Pierre MARTIN, Isabelle PALHIÈRE, Alain PINTON, Jérôme RAOUL, Silvia RODRIGUEZ-RAMILO & Gwénola TOSSER-KLOPP, 2026 – PRESAGE : Préparer la création d'un observatoire des anomalies génétiques en petits ruminants. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-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.



Parasite *Cryptosporidium* en élevage laitier touchés par la cryptosporidiose : probabilité de contamination du lait et pratiques à risque

Camille TOUTAIN¹, Xavier QUENTIN², Philippe CAMUSET², Juliette FAZILLEAU¹, Catherine CAZEAUX³, Cécile LAITHIER¹, Maxime LE BLOND³, Aurore WACHE-DUVAUCHELLE¹, Venceslas VILLIER⁴, Loïc FAVENNEC⁴, Romy RAZAKANDRAINIBE⁴, Damien COSTA⁴, Stéphanie LA CARBONA³

¹ Institut de l'Élevage (IDELE), 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

² Société Nationale des Groupements Techniques Vétérinaires (SNGTV), 5 rue Moufle, 75011 Paris, France

³ Sécurité des Aliments, ACTALIA, 310 Rue Popielujko, 50000 Saint-Lô, France

⁴ UR 7510 ESCAPE, Université de Rouen Normandie, 22 Boulevard Gambetta, 76000 Rouen, France

Correspondance : s.lacarbona@actalia.eu

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art18>

Résumé

La cryptosporidiose est une zoonose due à *Cryptosporidium* spp., parasite transmis par voie féco-orale directe ou indirecte. La prévalence importante dans les élevages bovins et les épidémies de cryptosporidiose humaine liées à la consommation de lait cru (ou produits dérivés) décrites dans le monde et en France, posent la question de la contamination du lait à la ferme. Cette étude a permis de mettre en évidence que de l'ADN de *Cryptosporidium* spp. pouvait être détecté dans le lait dans les élevages recrutés touchés par la cryptosporidiose (15,4 % ; n=78), mais significativement moins fréquemment dans les élevages destinant leur production à la filière lait cru. Des pratiques en lien avec l'hygiène de traite (nettoyage des trayons, lavage et éclairage de la salle de traite) et le logement des animaux (type de litière et modalité de logement) ont un impact significatif sur la contamination du lait cru.

Mots-clés : *Cryptosporidium* spp. ; lait cru ; détection ADN ; pratiques d'élevage ; pratiques à risque

Abstract: *Cryptosporidium* parasite in dairy farms: probability of milk contamination and risk factors

Cryptosporidiosis is a zoonotic disease caused by *Cryptosporidium* spp., a parasite transmitted via the fecal-oral route, either directly or indirectly. There is a high prevalence in cattle and outbreaks of human cryptosporidiosis involving raw milk (or derived products) have been reported worldwide and in France. This raises the question of milk contamination at the farm. This study showed that the DNA of *Cryptosporidium* spp. could be detected in milk in recruited farms affected by cryptosporidiosis (15.4%, n=78), but significantly less frequently in farms producing milk for the raw milk sector. Practices related to milking hygiene (teat cleaning, milking parlor cleaning and lighting) and animal housing (type of beds and housing mode) significantly impact the contamination of raw milk.

Keywords: *Cryptosporidium* spp.; raw milk; DNA detection; farming practises; risk practises

1. Introduction

Les parasites protozoaires du genre *Cryptosporidium* spp. infectent un large spectre d'hôtes dont l'Homme. A ce jour, 44 espèces sont décrites dont 19 espèces sont zoonotiques c'est-à-dire qu'elles



peuvent infecter la fois l'Homme et les animaux. Parmi elles, *Cryptosporidium parvum* et *C. hominis* sont responsables de 95 % des cas humains, *C. parvum* étant capable d'infecter un très large spectre d'hôtes et notamment le bétail. Au sein de l'espèce *C. parvum*, une analyse moléculaire du gène *gp60* permet de caractériser différents sous-types, le sous-type IIa et notamment IIaA15G2R1, étant dominant chez l'Homme et l'animal en Europe (Ryan *et al.*, 2021). La transmission à l'Homme se fait par voie féco-orale directe (contacts avec hôtes infectés) ou indirecte (eau, aliment), suite à l'ingestion d'oocystes, formes excrétées en grandes quantités dans les fèces des hôtes infectés. La dose conduisant à l'infection de 50 % des individus immunocompétents (DI₅₀) est faible, estimée entre 10 et 83 pour *C. hominis*, et entre 9 et 1042 pour *C. parvum* (Chappell *et al.*, 2006 ; Okhuysen *et al.*, 1999). Les personnes infectées sont asymptomatiques ou présentent des symptômes intestinaux habituellement spontanément résolus chez les patients immunocompétents (12 jours). L'infection peut devenir chronique ou être très grave, voire mortelle, chez les patients immunodéprimés (transplantés, infectés par le VIH) et chez les enfants malnutris (Centers for Disease Control, 1982 ; Kotloff *et al.*, 2013). A l'heure actuelle, aucun traitement n'a montré d'efficacité significative sur la cryptosporidiose chez les patients présentant un déficit immunitaire (Khan and Witola, 2023). La prévalence mondiale de la cryptosporidiose est estimée à 8 % (Dong *et al.*, 2020). Aux Etats-Unis, la déclaration de la maladie est obligatoire et 823 000 cas de cryptosporidiose d'origine hydrique sont estimés chaque année, pour un coût direct des soins de santé associés évalué à 19 millions US\$ (Collier *et al.*, 2021). En France, la déclaration n'est pas obligatoire. Depuis la création en 2017 du CNR-LE Cryptosporidiose, étendu en CNR des Cryptosporidioses, Microsporidioses et autres protozooses digestives (CMAP) en 2023, le nombre de déclarations de cas est passé de 151 à 1892 (Costa *et al.*, 2020). La plus importante épidémie de cryptosporidiose liée à de l'eau de distribution a eu lieu en 2019 dans la région de Grasse (13369 cas estimés).

La cryptosporidiose est aujourd'hui l'une des causes les plus importantes de diarrhée néonatale chez les bovins au niveau mondial. En Europe, des prévalences de 13 à 93 % ont été décrites dans les fèces des bovins, les veaux non sevrés étant plus particulièrement touchés (Buchanan *et al.*, 2025). Les niveaux de prévalence ont été associés à certains facteurs liés à la ferme tels que la présence d'autres bétails (Smith *et al.*, 2010), l'épandage de fumier dans les champs avoisinant (Smith *et al.*, 2014), la localisation géographique de la ferme, les revêtements de sols utilisés (Díaz *et al.*, 2018) et l'utilisation de litières de fumier recyclées (Lasprilla-Mantilla *et al.*, 2019). L'espèce *C. parvum* est prédominante chez les veaux non sevrés alors que les espèces *C. bovis*, *C. ryanae* sont plutôt retrouvées chez les veaux plus âgés, et *C. andersoni* chez les bovins adultes (Robertson *et al.*, 2014). *C. hominis* peut également être détectée chez les veaux (Razakandrainibe *et al.*, 2018). A l'exception de *C. ryanae*, toutes ces espèces sont zoonotiques. Au sein de l'espèce *C. parvum*, le sous-type *gp60* IIa est majoritaire chez les veaux à l'échelle mondiale (72,2 %). En Europe, c'est le sous-type IIaA15G2R1 qui est prédominant (32,4 %) (Chen *et al.*, 2023). La cryptosporidiose est le plus souvent asymptomatique chez les vaches adultes. Chez les jeunes veaux, elle se manifeste sous forme de diarrhées aiguës liquides et profuses, associées à une déshydratation, une anorexie et une croissance ralentie, voire la mort, pouvant entraîner d'importantes pertes économiques pour les éleveurs (de Graaf *et al.*, 1999 ; Roblin *et al.*, 2023). Une fois infectés, les veaux excrètent de grandes quantités d'oocystes dans leurs fèces (jusqu'à 10⁹ oocystes/g). A ce jour, les composés antimicrobiens disponibles permettent de réduire l'excrétion d'oocystes et la gravité de la maladie chez les animaux affectés mais ne permettent pas de guérir de la maladie. L'halofuginone est le seul traitement approuvé en Europe mais pas aux Etats-Unis, car son efficacité est controversée (Khan and Witola, 2023). Depuis 2024, un premier vaccin a été mis sur le marché en France pour les mères afin de protéger les veaux. Son efficacité pour limiter la dispersion de la maladie au sein de l'élevage devra être démontrée dans les prochaines années.

En 2010, 13 % des cryptosporidioses mondiales étaient estimées d'origine alimentaire, représentant 8,6 millions de cas de maladie diarrhéique (Kirk *et al.*, 2015). Depuis 40 ans, une vingtaine d'épidémies de cryptosporidiose humaine ont été imputées à la consommation de lait cru ou de lait insuffisamment



pasteurisé (vache, chèvre) (EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ), 2018 ; Gharpure, 2019 ; Ursini *et al.*, 2020). En France, une épidémie de cryptosporidiose est survenue en 2017 dans un collège avec 176 cas identifiés. Un fromage blanc au lait de vache non pasteurisé a été fortement suspecté (Loury *et al.*, 2019). Quatre autres épidémies ont été rapportées entre 2022 et 2025 en France avec suspicion de produits laitiers au lait cru de vache et chèvre (données CNR cmAP). Les produits au lait cru sont considérés comme les plus à risque car les barèmes de pasteurisation du lait réglementaires (+63°C, 30 minutes) ou courants (+72°C ou +75°C, 15 secondes) inactivent probablement les oocystes s'ils sont correctement appliqués et/ou non défaillants. L'efficacité de la thermisation reste à démontrer dans la matrice laitière, selon les couples temps/température appliqués, et les différents procédés de fabrication utilisés en filière lait cru (Fayer, 1994 ; Fujino *et al.*, 2002 ; Harp *et al.*, 1996 ; Travaillé *et al.*, 2016). Des contaminations post-traitement peuvent également survenir tel que cela a été suspecté dans une récente épidémie associée à du lait pasteurisé provenant d'un distributeur automatique en Angleterre (Gopfert *et al.*, 2022). Aucune norme internationale ou française n'est disponible pour la détection de *Cryptosporidium* spp. dans le lait et les produits laitiers. Des méthodes basées sur la détection d'oocystes par microscopie ou d'ADN du parasite par PCR ont été décrites, avec des seuils de détection entre 50 et 500 oocystes/L (Di Pinto and Tantillo, 2002 ; Harper *et al.*, 2002 ; Laberge *et al.*, 1996 ; Orlandi *et al.*, 2004 ; Rosenthal *et al.*, 2015 ; Shahrokhi *et al.*, 2022). Ces méthodes permettent de caractériser la contamination du lait par le parasite mais ne fournissent aucune indication sur son caractère infectieux et ne renseignent donc pas sur le risque pour l'Homme. Seules deux études ont décrit des prévalences du parasite de 0 % (microscopie) et 4 % (PCR) dans du lait de vache à Cuba et en Iran (Adesiyun *et al.*, 1996 ; Shahrokhi *et al.*, 2022).

Les objectifs de l'étude étaient : i) d'évaluer la contamination du lait dans des élevages bovins atteints de cryptosporidiose en détectant l'ADN de *Cryptosporidium* par PCR en temps réel via une nouvelle méthode sensible préalablement validée ; ii) d'étudier les pratiques pour identifier d'éventuelles pratiques à risque de contamination.

2. Matériel et méthodes

2.1. Modalités d'échantillonnage dans les élevages

Des élevages laitiers volontaires de l'ouest (Bretagne, Normandie) et de l'est (Bourgogne-Franche-Comté, Auvergne-Rhône-Alpes) de la France ont été visités par les vétérinaires pour des diarrhées néonatales. En cas de validation de cryptosporidiose par un test rapide sur fèces de veaux, trois types d'échantillons ont été collectés par le vétérinaire : 1) fèces de chaque veau diarrhéique ; 2) mélange de fèces de vaches (aire de raclage) ; 3) lait de tank préférentiellement collecté par la trappe supérieure (2 L). Entre janvier 2023 et février 2025, 78 élevages ont été échantillonnés au moins une fois et 94 échantillons de lait de tank et 271 prélèvements de fèces (veaux + vaches) ont été collectés.

2.2. Détection de l'ADN de *Cryptosporidium* spp. dans le lait cru de vache par PCR en temps réel

L'échantillon de lait cru (1 L) a été pré-chauffé à +37°C, puis centrifugé à 5000 g pendant 10 min à +10°C. Le culot a été lavé 3 fois vigoureusement dans du tampon phosphate salin 1X (PBS, Fisher) additionné de Tween 80 (Sigma) à 0,01 % (Vf = 225 mL). Le culot final a été remis en suspension dans 30 mL d'eau distillée stérile qui ont été filtré sur un sac à filtre (Interscience, 161025). Le filtrat a ensuite été centrifugé à 5000 g pendant 10 min et le culot remis en suspension dans 600 µL de tampon PBS additionnés de 120 µL de tampon MT (FastDNA™ SPIN Kit for Soil, MP Biomedicals). L'ADN a ensuite été extrait tel que précédemment décrit (Durand *et al.*, 2020). L'ADN de *Cryptosporidium* spp. a été détecté par qPCR Taqman en temps réel en ciblant une séquence du gène codant pour l'ARNr 18S (Elwin *et al.*, 2022). En parallèle, un contrôle interne d'amplification (IAC) synthétique a été détecté pour



évaluer la présence d'inhibiteurs de qPCR (Murphy *et al.*, 2019). Les réactions de qPCR ont été réalisées en duplex à partir de 10 µL d'ADN dans un volume final de 25 µL contenant 1X de master mix (Sensifast Probe kit Bioline, Ozyme), 600 nM de chaque amorce 18S, 80 nM de sonde 18S, 250 copies d'IAC, 100 nM de chaque amorce IAC, 40 nM de sonde IAC, 1 mg/mL d'albumine de sérum bovin (Sigma) et de l'eau ultrapure (Hyclone). L'amplification a été réalisée dans un thermocycleur CFX96 (Bio-Rad, France) selon le thermoprogramme suivant : + 95°C 5 min ; 45 x (+ 95°C 15 sec, + 60°C 60 sec, + 72°C 30 sec). Un contrôle positif (extrait d'ADN d'une suspension de 10000 oocystes de *C. parvum*, fournisseur INRAE Nouzilly) et un contrôle négatif (eau) ont été inclus systématiquement ; toutes les qPCR ont été réalisées en duplicats. Les extraits étaient considérés positifs si au moins un des réplicats produisait une valeur de Cq < 40.

2.3. Détection de l'ADN de *Cryptosporidium* spp. dans les fèces des animaux par PCR

L'ADN a été extrait à partir des fèces en utilisant le kit d'extraction QIAamp® PowerFecal® Pro (Qiagen) selon les recommandations du fabricant. Puis, une PCR triplex visant à détecter *Cryptosporidium* spp., *C. parvum* et *C. hominis* a été réalisée tel que précédemment décrit (Hadfield *et al.*, 2011).

2.4. Caractérisation de l'ADN de *Cryptosporidium* spp. dans les échantillons de lait et de fèces

Les espèces de *Cryptosporidium* ont été identifiées par amplification en PCR nichée du gène codant pour l'ARNr SSU suivie d'un séquençage, comme décrit par Koehler *et al.* (2017). Les sous-types ont été déterminés au sein de l'espèce *C. parvum* par amplification en PCR nichée du gène *gp60* suivie d'un séquençage, interprété selon la nomenclature associée (Robinson *et al.*, 2025 ; Sulaiman *et al.*, 2005). Pour les deux cibles, le séquençage a été effectué sur le produit de PCR obtenu lors de la seconde réaction. Chaque réaction de PCR a été réalisée avec 5 µL d'ADN matrice dans un volume final de 50 µL contenant 1X de tampon Dream Taq incluant 20 mM MgCl₂, 200 nM de chaque dNTP, 100 nM de chaque amorce, 1,25 µL de DMSO à 100 % et 2,5 unités de DreamTaq DNA polymérase (Thermo Scientific™). L'amplification a été réalisée dans un thermocycleur CFX96 (Bio-Rad, France) selon le thermoprogramme suivant : +94°C 3 min ; 40 x (+94 °C 45 sec, +55 °C 45 sec, +72 °C 1 min) ; +72 °C 7 min. Chaque série de PCR incluait un contrôle négatif (absence d'ADN) et deux contrôles positifs : ADN génomique de *C. parvum* provenant d'oocystes purifiés (INRAE Nouzilly) et ADN génomique de *C. hominis* (CNR cmAP). Les produits d'amplification ont été visualisés sur des gels d'agarose à 2 % colorés avec MIDORI green advance (NIPPON Genetics EUROPE) et examinés sous UV. Les amplicons ont été purifiés avec le kit Exonuclease I/Shrimp Alkaline Phosphatase Exo-SAP-IT (USB Corporation, OH, États-Unis), puis séquencés avec les mêmes amorces que la seconde PCR à une concentration de 3,2 µM dans un volume PCR de 10 µL. Le séquençage a été effectué avec des réactifs BigDye™ Terminator v3.1 (Applied Biosystems™) sur un analyseur de séquences ABI 3500 (Applied Biosystems, CA, États-Unis). Les chromatogrammes des séquences obtenues ont été analysés via 4Peaks (Nucleobytes, Pays-Bas).

2.5. Enquêtes sur les pratiques

En s'appuyant sur les hypothèses de contamination du lait mieux connues pour d'autres pathogènes d'origine fécale présents dans les élevages (*E. coli* STEC, *Listeria monocytogenes*) et sur la circulation de *Cryptosporidium* spp. à dire d'experts, un questionnaire a été élaboré intégrant six chapitres : conception et entretien de la laiterie, conception de la salle de traite, pratiques d'hygiène de traite, logement des mères et des veaux, gestion des mises-bas et des animaux malades, alimentation et abreuvement des veaux. Des enquêtes semi-directives ont ensuite été conduites dans 58 élevages sur les 78 échantillonnés (respectivement 32 et 26 dans les bassins laitiers Est et Ouest), associées à des



observations durant la traite. En parallèle, les données de paiement du lait (dénombrement de spores butyriques et flore totale) ont été collectées pour les 3 mois précédant le prélèvement. Lors du lavage de la machine à traire, des mesures de durées de cycle de lavage, températures et doses de produit lessiviel ont été réalisées. Les pratiques ont été comparées entre les élevages positifs et négatifs (*i.e.* < 20 oocystes/L) en ADN de *Cryptosporidium* dans le lait.

2.6. Analyses statistiques

Sur la totalité des élevages ($n=78$), le nombre d'élevages présentant un lait positif en ADN de *Cryptosporidium* a été comparé en fonction de la destination du lait (filiale thermisée vs. filiale lait cru) à l'aide du logiciel (XLSTAT 2025.2.0). Le test exact de Fisher a été appliqué avec l'hypothèse nulle H_0 suivante : il n'y a pas de différence dans le nombre d'élevages avec lait positif selon la destination du lait.

Les réponses au questionnaire recueillies auprès des éleveurs lors des enquêtes dans les 58 élevages ont été enregistrées dans une base de données au format tableur Excel. Trois cent trente-deux variables ont été étudiées dont 286 ont fait l'objet de statistiques analytiques avec le logiciel RStudio et les packages dplyr et ggplot2 (version 4.3.1) (tri des variables sur la base des effectifs de réponses et de la variabilité des modalités de réponses). Après analyse descriptive des différences, le test de Wilcoxon a été utilisé pour les variables quantitatives et le test de Fisher pour les variables qualitatives ($\alpha = 0,05$). Pour l'ensemble des tests, une différence statistique a été retenue si $p\text{-value} < 0.05$.

3. Résultats/Discussion

3.1. Détection et caractérisation de *Cryptosporidium* spp. chez les animaux

L'ADN de *Cryptosporidium* a été détecté par PCR du gène *gp60* dans 88 % et 46 % des échantillons de fèces de veaux et vaches respectivement (Tableau 1). Parmi les espèces identifiées, *C. parvum* a majoritairement été retrouvée chez les veaux et les vaches. Chez les vaches, les espèces *C. bovis*, *C. andersoni* et *C. occultus/suis* ont aussi été mises en évidence.

Tableau 1 : Détection et caractérisation de *Cryptosporidium* spp. dans les fèces des animaux

Type d'échantillons (nombre total)	Pourcentage échantillons positifs (nombre)	Espèces identifiées & fréquence de détection (%)
Fèces veaux (183)	88 % (161)	<i>C. parvum</i> - 99 % (159/160) ^a ; 17 sous-types <i>C. ryanae</i> - 1 % (1/160)
Fèces vaches adultes (78)	46 % (36)	<i>C. parvum</i> - 83 % (29/35) ; 11 sous-types <i>C. bovis</i> - 11 % (4/35) <i>C. andersoni</i> - 3 % (1/35) <i>C. occultus/suis</i> - 3 % (1/35)

^a Nombre d'échantillons où l'espèce a été identifiée/nombre total d'échantillons pour lesquels une espèce a été identifiée.

Au sein de l'espèce *C. parvum*, 17 et 11 sous-types différents ont été identifiés chez les veaux et les vaches respectivement. Trois sous-types (IIaA15G2R1, IIaA16G2R1 et IIaA17G1R1, données non montrées) ont été majoritairement retrouvés à la fois chez les veaux et les vaches et correspondent à ceux qui sont généralement décrits chez les bovins (Chen *et al.*, 2023). Un même sous-type de *C. parvum* a été obtenu chez les veaux et vaches lors d'une même visite pour 43 % des élevages (données non montrées). La diversité des espèces et des sous-types de *C. parvum* observée entre les



veaux et les vaches indique que la transmission verticale n'est pas la source majeure de contamination des veaux, tel que cela a déjà été décrit (Hoque *et al.*, 2023 ; Mavrides *et al.*, 2025). De nombreuses souches circulent et/ou persistent au sein des élevages et les sources de contamination des animaux sont probablement variées.

3.2. Détection et caractérisation de *Cryptosporidium* spp. dans le lait cru de vache

Sur les 78 élevages échantillonnés présentant des veaux positifs à la cryptosporidiose, l'ADN de *Cryptosporidium* a été détecté dans le lait de tank dans 15,4 % d'entre eux (n=12/78). Parmi les 12 élevages positifs, une différence significative a été observée ($p\text{-value} = 0,031$) entre les élevages qui destinaient leur production à la filière lait thermisé (n=10) et ceux en filière lait cru (n=2), ces derniers représentant 59 % des élevages de l'étude (Tableau 2). Parmi les espèces identifiées, *C. parvum* était majoritaire (8/12), suivie de *C. andersoni* (3/12) et *C. hominis* (1/12). Le sous-type IIaA15G2R1 de *C. parvum*, le plus fréquent chez l'Homme (Ryan *et al.*, 2021), a été principalement identifié dans le lait. Sur un unique élevage, le même sous-type IIaA15G2R1 a été identifié chez les veaux, vaches et dans le lait. Ce sous-type étant très répandu, une analyse simultanée de plusieurs séquences d'ADN (MLVA, Multiple Loci VNTR Analysis) a été réalisée pour caractériser les souches au sein de ce sous-type. Ceci a permis de mettre en évidence que les souches différaient entre les veaux et les vaches, et qu'un mélange de souches était présent dans l'échantillon de lait (données non montrées). Ainsi, au moment où les prélèvements ont été réalisés, la contamination du lait via les fèces des animaux n'a pas été démontrée. La variabilité des sous-types et des profils MLVA indique que, comme cela a été observé chez les animaux, la contamination du lait est probablement d'origine diverse et semble multifactorielle. Échantillonner divers supports et milieux environnementaux dans les élevages positifs en ADN de *Cryptosporidium* dans le lait, et notamment ceux pour lesquels la contamination a persisté dans le temps, pourrait permettre de mieux comprendre les voies potentielles de contamination du lait.

3.3. Comparaison des pratiques dans les élevages positifs et négatifs en ADN de *Cryptosporidium* spp. dans le lait

Les principales caractéristiques de structure des élevages enquêtés sont indiquées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques de structure des élevages enquêtés.

Critère

Nombre moyen de vaches laitières	91 [Est : 83 ; Ouest : 100]
Litrage annuel moyen	682 000 L [Est : 606 258 L ; Ouest : 773 192 L]
Production moyenne de lait par vache	7131 L/an
Destination du lait	Transformation lait cru : 59 % ; Transformation lait traité thermiquement : 41 %
Couchage des animaux	Paille/dérivés de paille : 90 % ; Sciure : 7 % ; Autres : 3 %
Installation de traite	Salle de traite : 71 % ; Robot(s) de traite : 17 % ; Lactoduc d'étable : 10 % ; Pots trayeurs : 2 %

Au total, 58 élevages atteints de cryptosporidiose (*i.e.* fèces de veaux positifs), incluant 9 élevages positifs et 49 élevages négatifs en ADN de *Cryptosporidium* spp. dans le lait de tank, ont été visités pour enquête et observation. Le litrage de la dernière campagne laitière a été relevé comme significativement plus faible dans les élevages positifs (418 000 L en moyenne) que dans les élevages négatifs (732 000 L en moyenne) ($p\text{-value} = 0,0319$). Par ailleurs, le dénombrement de spores



butyriques, indicateur de qualité du lait pour son paiement, était supérieur au seuil de 450 spores/L le mois du prélèvement dans 83 % des élevages positifs contre seulement 15 % des élevages négatifs (p -value = 0,0033). Cet indicateur traduit un risque de contamination du lait via les fèces et suggère que le portage de *Cryptosporidium* spp. par les vaches peut représenter une source de contamination du lait.

Des pratiques en lien avec l'hygiène de la traite ont été identifiées comme ayant un impact significatif sur la contamination du lait cru (Tableau 3, p -value < 0,05) : trayons sales avant branchement, non-utilisation de lavettes individuelles pour nettoyer les trayons et éclairage de la salle de traite insatisfaisant. Ces résultats sont en accord avec de précédentes études qui ont établi que ces pratiques étaient associées à un risque accru de contamination du lait par des microorganismes d'origine fécale (Sanaa et al., 1993 ; Vissers et al., 2007). Par ailleurs, le lavage de la salle de traite avec de l'eau de puits ou de forage est également apparu comme une pratique plus fréquente dans les élevages positifs (Tableau 3, p -value < 0,05). Sous l'influence d'eaux de surfaces ou de sols contaminés, ces eaux peuvent en effet contenir des oocystes de *Cryptosporidium* spp. (Daraei et al., 2021 ; Schreiber et al., 2015 ; Sischo et al., 2000 ; Smith et al., 2014) et ainsi représenter une source de contamination des systèmes de traite.

Tableau 3 : Pratiques associées significativement à la contamination du lait cru par de l'ADN de *Cryptosporidium* spp. Les proportions d'élevages positifs et négatifs en ADN de *Cryptosporidium* spp. sont déterminées pour chaque pratique et les différences significatives indiquées par les p -values (α = 0,05).

	Proportion d'élevages positifs	Proportion d'élevages négatifs	p -value
Hygiène de traite			
Trayons sales avant branchement	25 %	0 %	0,0271
Pas d'utilisation de lavettes individuelles	83 %	29 %	0,0256
Eclairage de la salle de traite non satisfaisant	33 %	6 %	0,0421
Lavage de la salle de traite avec eau de forage/puits	89 %	41 %	0,0237
Gestion des animaux			
Logement des vaches en aire paillée	67 %	12 %	0,002
Logement des veaux pendant le 1 ^{er} mois de vie en collectif	44 %	18 %	0,0345
Abreuvement des veaux au seau sans tétine	89 %	49 %	0,0333

Concernant la gestion des animaux, le logement des vaches en aire paillée était plus pratiqué dans les élevages positifs en ADN de *Cryptosporidium* spp. (Tableau 3, p -value = 0,002). Ce type de litière est plus difficile à maintenir propre et peut conduire à la souillure fécale des mamelles des vaches en lactation et par conséquent, à la contamination du lait avec des microorganismes d'origine fécale (Lévesque, 2004; Robles et al., 2020; Vissers et al., 2007; Ward et al., 2002). Le logement collectif des veaux a également été associé à la contamination du lait par de l'ADN de *Cryptosporidium* spp. (Tableau 3, p -value = 0,0345). Certaines études ont rapporté que la proximité entre les veaux augmentait le risque d'infection par le parasite (Brainard et al., 2020). Enfin, l'utilisation de seau sans tétine pour l'abreuvement des veaux était plus fréquente dans les élevages positifs (Tableau 3, p -value = 0,0333). Comme tous les mammifères nouveau-nés, les veaux éprouvent le besoin de téter, la succion étant indispensable à leur développement. Si ce besoin n'est pas satisfait, des comportements de succion croisée entre veaux peuvent être observés (Jensen and Budde, 2006), notamment au-dessous du ventre qui peut être une zone chargée en oocystes en cas de cryptosporidiose. Ainsi,



abreuver les veaux à l'aide de seaux avec tétines réduirait le risque de succions croisées et limiterait donc la propagation des oocystes entre les veaux et leur infection. Globalement, certaines pratiques en lien avec la gestion des veaux peuvent concourir au maintien d'une pression parasitaire élevée au niveau de l'élevage qui est favorable à la dissémination entre animaux et dans les environnements. La persistance du parasite dans la ferme multiplie les sources potentielles de contamination en oocystes et contribue probablement à augmenter la probabilité de contaminer le lait.

4. Conclusion

Cette étude a mis en évidence qu'en cas de circulation du parasite *Cryptosporidium* spp. au sein d'un élevage laitier, la contamination du lait par de l'ADN du pathogène est possible mais reste globalement peu fréquente (15,2 % des élevages recrutés). Très peu d'élevages destinant leur lait à la filière lait cru présentent une contamination du lait. Les pratiques rigoureuses mises en œuvre pour éviter la contamination du lait par les pathogènes d'origine fécale dans ces élevages semblent également efficaces pour maîtriser le danger *Cryptosporidium*. L'hygiène de traite, les conditions de logement des vaches et des veaux, le mode d'abreuvement des veaux, ainsi que la qualité de l'eau utilisée pour le lavage de la salle de traite sont des pratiques à intégrer dans la maîtrise de la qualité du lait vis-à-vis du parasite *Cryptosporidium*. La diversité des souches de *Cryptosporidium* spp. identifiées au sein des élevages, chez les animaux et dans le lait, suggère des origines de contamination variées et une probable persistance de certaines souches. A ce jour, les sources de contamination du lait n'ont pas été clairement établies. Des études restent à réaliser pour mieux comprendre les voies de contamination du lait par ce pathogène.

Ethique

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

Toutain C. (<https://orcid.org/0009-0004-5997-8086>) ;

Laithier C. (<https://orcid.org/0009-0008-7195-7973>) ;

Villier V. (<https://orcid.org/0000-0003-3679-7616>) ;

Favennec L. (<https://orcid.org/0000-0003-3386-2240>) ;

Razakandrainibe R. (<https://orcid.org/0000-0003-3188-7794>) ;

Costa D. (<https://orcid.org/0000-0003-3418-2597>) ;

La Carbona S. (<https://orcid.org/0000-0002-3408-1369>) .



Contributions des auteurs

Conceptualisation : Laithier C., Favennec L., Camuset P., Quentin X., La Carbona S.

Méthodologie : Laithier C., Waché-Duvauchelle A., Favennec L., Razakandrainibe R., Costa D., Camuset, P., Quentin, X., La Carbona S.

Validation : Toutain C., Laithier C., Razakandrainibe R., Costa D., Camuset, P., Quentin, X., La Carbona S.

Investigation : Fazilleau J., Toutain C., Laithier C., Villier V., Camuset, P., Quentin, X., Le Blond M., Cazeaux C.

Préparation du manuscrit : Fazilleau J., Toutain C., Laithier C., Razakandrainibe R., Costa D., La Carbona S.,

Supervision : Toutain C., Razakandrainibe R., Costa D., La Carbona S.

Obtention du financement : Laithier C., Favennec, L., La Carbona S.

Tous les auteurs ont lu et adhèrent à la version publiée du manuscrit.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, 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 vétérinaires de la Société Nationale des Groupements Techniques Vétérinaires qui ont permis le recrutement des élevages et procédé aux collectes d'échantillons ; tous les éleveurs qui ont accepté d'intégrer l'étude ; les stagiaires Lisa Perrousset (Isara), Margot Cornu (Oniris) et Méline Boute (UniLasalle) qui ont réalisé les enquêtes ; Christophe Chartier (BIOEPAR INRAE ONIRIS) et Isabelle Villena (UR7510 ESCAPE, Université de Reims Champagne-Ardenne) pour leurs contributions dans la conception du questionnaire d'enquête.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a bénéficié du soutien de l'UMT ACTIA PROTORISK (2020-2024), puis PARASAFE (2025-2029) (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la souveraineté alimentaire) et du CASDAR (avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural).

Références bibliographiques

Adesiyun, A. A., Webb, L. A., Romain, H., & Kaminjolo, J. S. (1996). Prevalence of *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter* spp., *Yersinia enterocolitica* and *Cryptosporidium* spp. in bulk milk, cows' faeces and effluents of dairy farms in Trinidad. *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 49, 303–309.

Brainard, J., Hooper, L., McFarlane, S., Hammer, C. C., Hunter, P. R., & Tyler, K. (2020). Systematic review of modifiable risk factors shows little evidential support for most current practices in *Cryptosporidium* management in bovine calves. *Parasitology Research*, 119, 3571–3584.

Buchanan, R., Wieckowski, P., Matechou, E., Katzer, F., Tsaousis, A. D., & Farré, M. (2025). Global prevalence of *Cryptosporidium* infections in cattle: A meta-analysis. *Current Research in Parasitology & Vector-Borne Diseases*, 7, 100264.



- Bulumulla, S., Ash, A., Ryan, U., Combs, B., Larkins, A., Pingault, N., Bradford, D., & Barbosa, A. D. (2026). Molecular analysis of *Cryptosporidium* species in Western Australian human populations (2023–2025), and the emergence of rare *C. hominis* leA11G3T3 subtype. *Parasitology International*, 111, 103188.
- Chen, Y., Huang, J., Qin, H., Wang, L., Li, J., & Zhang, L. (2023). *Cryptosporidium parvum* and gp60 genotype prevalence in dairy calves worldwide: A systematic review and meta-analysis. *Acta Tropica*, 240, 106843.
- Daraei, H., Oliveri Conti, G., Sahlabadi, F., Thai, V. N., Gholipour, S., Turki, H., Fakhri, Y., Ferrante, M., Moradi, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Prevalence of *Cryptosporidium* spp. in water: A global systematic review and meta-analysis. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28, 9498–9507.
- de Graaf, D. C., Vanopdenbosch, E., Ortega-Mora, L. M., Abbassi, H., & Peeters, J. E. (1999). A review of the importance of cryptosporidiosis in farm animals. *International Journal for Parasitology*, 29, 1269–1287.
- Delafosse, A., Chartier, C., Dupuy, M. C., Dumoulin, M., Pors, I., & Paraud, C. (2015). *Cryptosporidium parvum* infection and associated risk factors in dairy calves in western France. *Preventive Veterinary Medicine*, 118, 406–412.
- Di Pinto, A., & Tantillo, M. G. (2002). Direct detection of *Cryptosporidium parvum* oocysts by immunomagnetic separation–polymerase chain reaction in raw milk. *Journal of Food Protection*, 65, 1345–1348.
- Díaz, P., Varcasia, A., Pipia, A. P., Tamponi, C., Sanna, G., Prieto, A., Ruiu, A., Spissu, P., Díez-Baños, P., Morrondo, P., & Scala, A. (2018). Molecular characterisation and risk factor analysis of *Cryptosporidium* spp. in calves from Italy. *Parasitology Research*, 117, 3081–3090.
- Durand, L., La Carbona, S., Geffard, A., Possenti, A., Dubey, J. P., & Lalle, M. (2020). Comparative evaluation of loop-mediated isothermal amplification (LAMP) vs qPCR for detection of *Toxoplasma gondii* oocysts DNA in mussels. *Experimental Parasitology*, 208, 107809.
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ). (2018). Public health risks associated with food-borne parasites. *EFSA Journal*, 16, e05495.
- Elwin, K., Robinson, G., Pérez-Cordón, G., & Chalmers, R. M. (2022). Development and evaluation of a real-time PCR for genotyping of *Cryptosporidium* spp. from water monitoring slides. *Experimental Parasitology*, 242, 108366.
- Fayer, R. (1994). Effect of high temperature on infectivity of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water. *Applied and Environmental Microbiology*, 60, 2732–2735.
- Fujino, T., Matsui, T., Kobayashi, F., Haruki, K., Yoshino, Y., Kajima, J., & Tsuji, M. (2002). The effect of heating against *Cryptosporidium* oocysts. *Journal of Veterinary Medical Science*, 64, 199–200.
- Gharpure, R. (2019). Cryptosporidiosis outbreaks — United States, 2009–2017. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, 68.
- Hadfield, S. J., Robinson, G., Elwin, K., & Chalmers, R. M. (2011). Detection and differentiation of *Cryptosporidium* spp. in human clinical samples by use of real-time PCR. *Journal of Clinical Microbiology*, 49, 918–924.
- Harp, J. A., Fayer, R., Pesch, B. A., & Jackson, G. J. (1996). Effect of pasteurization on infectivity of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water and milk. *Applied and Environmental Microbiology*, 62, 2866–2868.
- Harper, C. M., Cowell, N. A., Adams, B. C., Langley, A. J., & Wohlsen, T. D. (2002). Outbreak of *Cryptosporidium* linked to drinking unpasteurised milk. *Communicable Diseases Intelligence*, 26, 449–450.
- Hoque, S., Pinto, P., Ribeiro, C. A., Canniere, E., Daandels, Y., Dellevoet, M., Bourgeois, A., Hammouma, O., Hunter, P., Gentekaki, E., Kváč, M., Follet, J., & Tsaoasis, A. D. (2023). Follow-up investigation into *Cryptosporidium* prevalence and transmission in Western European dairy farms. *Veterinary Parasitology*, 318, 109920.
- Jensen, M. B., & Budde, M. (2006). The effects of milk feeding method and group size on feeding behavior and cross-sucking in group-housed dairy calves. *Journal of Dairy Science*, 89, 4778–4783.



- Khan, S. M., & Witola, W. H. (2023). Past, current, and potential treatments for cryptosporidiosis in humans and farm animals: A comprehensive review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 13, 1115522.
- Koehler, A. V., Korhonen, P. K., Hall, R. S., Young, N. D., Wang, T., Haydon, S. R., & Gasser, R. B. (2017). Use of a bioinformatic-assisted primer design strategy to establish a new nested PCR-based method for *Cryptosporidium*. *Parasites & Vectors*, 10, 509.
- Laberge, I., Ibrahim, A., Barta, J. R., & Griffiths, M. W. (1996). Detection of *Cryptosporidium parvum* in raw milk by PCR and oligonucleotide probe hybridization. *Applied and Environmental Microbiology*, 62, 3259–3264.
- Lasprilla-Mantilla, M. I., Wagner, V., Pena, J., Frechette, A., Thivierge, K., Dufour, S., & Fernandez-Prada, C. (2019). Effects of recycled manure solids bedding on the spread of gastrointestinal parasites in the environment of dairies and milk. *Journal of Dairy Science*, 102, 11308–11316.
- Lévesque, P. (2004). Symposium sur les bovins laitiers : Comment les bâtiments et l'équipement influencent-ils la qualité du lait. In *Conférence du Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ)*.
- Loury, P., Gross, L., Dugast, F., Favennec, L., Dalle, F., de Rougemont, A., Polack, B., Giraudeau, D., Valot, S., Costa, D., & Hubert, B. (2019). Cryptosporidiosis outbreak within a middle school in western France, November 2017. *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, 16, 295–300.
- Mavrides, D. E., Liapi, M., Malas, S., Tsaousis, A. D., & Gentekaki, E. (2025). First nationwide investigation of *Cryptosporidium* species and gp60 subtypes in dairy cattle in Cyprus. *Current Research in Parasitology & Vector-Borne Diseases*, 8, 100326.
- Murphy, H. R., Almeria, S., & da Silva, A. J. (2019). BAM 19b: Molecular detection of *Cyclospora cayetanensis* in fresh produce using real-time PCR. *Bacteriological Analytical Manual*.
- Orlandi, P. A., Frazer, C., Carter, L., & Chu, D. T. (2004). Detection of *Cyclospora* and *Cryptosporidium* from fresh produce: Isolation and identification by polymerase chain reaction (PCR) and microscopic analysis. In *Bacteriological Analytical Manual* (Chap. 19a). U.S. Food and Drug Administration.
- Razakandrainibe, R., Diawara, E. H. I., Costa, D., Le Goff, L., Lemeteil, D., Ballet, J. J., Gargala, G., & Favennec, L. (2018). Common occurrence of *Cryptosporidium hominis* in asymptomatic and symptomatic calves in France. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 12, e0006355.
- Robertson, L. J., Björkman, C., Axén, C., & Fayer, R. (2014). Cryptosporidiosis in farmed animals. In *Cryptosporidium: Parasite and disease* (pp. 149–235).
- Robinson, G., Chalmers, R. M., Elwin, K., Guy, R. A., Bessonov, K., Troell, K., & Xiao, L. (2025). Deciphering a cryptic minefield: A guide to *Cryptosporidium* gp60 subtyping. *Current Research in Parasitology & Vector-Borne Diseases*, 7, 100257.
- Robles, I., Kelton, D. F., Barkema, H. W., Keefe, G. P., Roy, J. P., von Keyserlingk, M. A. G., & DeVries, T. J. (2020). Bacterial concentrations in bedding and their association with dairy cow hygiene and milk quality. *Animal*, 14, 1052–1066.
- Roblin, M., Canniere, E., Barbier, A., Daandels, Y., Dellevoet-Groenewegen, M., Pinto, P., Tsaousis, A., Leruste, H., Brainard, J., Hunter, P. R., & Follet, J. (2023). Study of the economic impact of cryptosporidiosis in calves after implementing good practices to manage the disease on dairy farms in Belgium, France, and the Netherlands. *Current Research in Parasitology & Vector-Borne Diseases*, 4, 100149.
- Rosenthal, M., Pedersen, R., Leible, S., Hill, V., Carter, K., Roellig, D. M., & Centers for Disease Control and Prevention. (2015). Notes from the field: Cryptosporidiosis associated with consumption of unpasteurized goat milk — Idaho, 2014. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, 64, 194–195.
- Ryan, U., Zahedi, A., Feng, Y., & Xiao, L. (2021). An update on zoonotic *Cryptosporidium* species and genotypes in humans. *Animals*, 11, 3307.
- Sanaa, M., Poutrel, B., Menard, J. L., & Serieys, F. (1993). Risk factors associated with contamination of raw milk by *Listeria monocytogenes* in dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 76, 2891–2898.
- Schreiber, C., Rechenburg, A., Rind, E., & Kistemann, T. (2015). The impact of land use on microbial surface water pollution. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 218, 181–187.



Shahrokhi, S., Hajimohammadi, B., Eslami, G., Ehrampoush, M. H., & Fallahzadeh, M. H. (2022). Occurrence of *Cryptosporidium* spp. in traditional milk and dairy products supplied in Yazd City, Central Iran. *Journal of Food Quality and Hazards Control*.

Sischo, W. M., Atwill, E. R., Lanyon, L. E., & George, J. (2000). *Cryptosporidium* on dairy farms and the role these farms may have in contaminating surface water supplies in the northeastern United States. *Preventive Veterinary Medicine*, 43, 253–267.

Smith, R. P., Chalmers, R. M., Mueller-Doblies, D., Clifton-Hadley, F. A., Elwin, K., Watkins, J., Paiba, G. A., Hadfield, S. J., & Giles, M. (2010). Investigation of farms linked to human patients with cryptosporidiosis in England and Wales. *Preventive Veterinary Medicine*, 94, 9–17.

Smith, R. P., Clifton-Hadley, F. A., Cheney, T., & Giles, M. (2014). Prevalence and molecular typing of *Cryptosporidium* in dairy cattle in England and Wales and examination of potential on-farm transmission routes. *Veterinary Parasitology*.

Sulaiman, I. M., Hira, P. R., Zhou, L., Al-Ali, F. M., Al-Shelahi, F. A., Shweiki, H. M., Iqbal, J., Khalid, N., & Xiao, L. (2005). Unique endemicity of cryptosporidiosis in children in Kuwait. *Journal of Clinical Microbiology*, 43, 2805–2809.

Travaillé, E., La Carbona, S., Aubert, D., Guyot, K., Gargala, G., Dumètre, A., Villena, I., & Houssin, M. (2016). Development of qRT-PCR method to assess viability of *Giardia intestinalis* cysts, and *Cryptosporidium* spp. and *Toxoplasma gondii* oocysts. *Food Control*, 59, 359–365.

Ursini, T., Moro, L., Requena-Méndez, A., Bertoli, G., & Buonfrate, D. (2020). A review of outbreaks of cryptosporidiosis due to unpasteurized milk. *Infection*, 48, 659–663.

Vissers, M. M. M., Driehuis, F., Te Giffel, M. C., De Jong, P., & Lankveld, J. M. G. (2007). Short communication: Quantification of the transmission of microorganisms to milk via dirt attached to the exterior of teats. *Journal of Dairy Science*, 90, 3579–3582.

Ward, W. R., Hughes, J. W., Faull, W. B., Cripps, P. J., Sutherland, J. P., & Sutherst, J. E. (2002). Observational study of temperature, moisture, pH and bacteria in straw bedding, and faecal consistency, cleanliness and mastitis in cows in four dairy herds. *Veterinary Record*, 151, 199–206.

Pour citer cet article : Stéphanie LA CARBONA, Camille TOUTAIN, Xavier QUENTIN, Philippe CAMUSET, Juliette FAZILLEAU, Catherine CAZEAUX, Cécile LAITHIER, Maxime LE BLOND, Aurore WACHE-DUVACHELLE, Venceslas VILLIER, Loïc FAVENNEC, Romy RAZAKANDRAINIBE & Damien COSTA, 2026 - Parasite *Cryptosporidium* en élevage laitier touchés par la cryptosporidiose : probabilité de contamination du lait et pratiques à risque. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art18>



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.