



innovations agronomiques

n°109 / Janvier 2026

Ce numéro fait suite au carrefour de l'innovation agronomique dédié aux résultats des projets **DEPHY EXPE 2 - Des systèmes utilisant les pesticides en ultime recours : résultats et enseignements de 6 ans d'expérimentations** le 13 mars 2025 co-organisé par INRAE, Agreenium, la cellule d'Animation Nationale du réseau DEPHY Ecophyto et le lycée agricole du Valentin.

Sont présentés les résultats des projets DEPHY EXPE 2 arrivant à leur terme en décembre 2024 pour diffuser les connaissances des principaux enseignements de ces essais « systèmes » qui ont éprouvé pendant 6 ans des combinaisons de leviers alternatifs à la lutte chimique pour maîtriser les bioagresseurs des cultures : diversification de l'agroécosystème, méthodes de contrôle biologique, choix de matériel végétal, stratégie d'évitement, prophylaxie... Les modalités de mises en œuvre des alternatives testées, leurs conditions de réussite et de diffusion et leurs impacts sur les performances techniques, économiques et environnementales de systèmes ont été discutées.



/// Crédits photos : Louise MALOT • Matthieu HIRSCHY • CABIOSOL





Innovations Agronomiques

Volume 109 – Janvier 2026

Dephy Expe 2

Ce numéro fait suite au carrefour de l'innovation agronomique dédié aux résultats des projets DEPHY EXPE 2 - Des systèmes utilisant les pesticides en ultime recours : résultats et enseignements de 6 ans d'expérimentations le 13 mars 2025 co-organisé par INRAE, Agreeum, la cellule d'Animation Nationale du réseau DEPHY Ecophyto et le lycée agricole du Valentin. Sont présentés, les résultats des projets DEPHY EXPE 2 arrivant à leur terme en décembre 2024 pour diffuser les connaissances des principaux enseignements de ces essais « systèmes » qui ont éprouvé pendant 6 ans des combinaisons de leviers alternatifs à la lutte chimique pour maîtriser les bioagresseurs des cultures : diversification de l'agroécosystème, méthodes de contrôle biologique, choix de matériel végétal, stratégie d'évitement, prophylaxie... Les modalités de mises en œuvre des alternatives testées, leurs conditions de réussite et de diffusion et leurs impacts sur les performances techniques, économiques et environnementales de systèmes ont été discutées.

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 Gaugury, 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 : Virginie Brun, Chambres d'agriculture France ; Jordan Le Bars, Chambres d'agriculture France ; Matthieu Hirschy, ACTA ; Emeric Emonet, ACTA ; Romario Jacques, ACTA ; Louise Malot, ACTA

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) : 978-2-7380-1491-7

ISBN (ePub) : 978-2-7380-1492-4

DOI : <https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol109>

Pour citer ce numéro : Collectif. Innovations Agronomiques. Dephy Expe 2, 2026, 109.
<https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol109>

Photo de couverture : Louise MALOT, Matthieu HIRSCHY, CABIOSOL

Licence : CC BY-NC-ND 4.0



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/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

Chloé GASPARI, François WARLOP, Maxime JACQUOT, Mathilde VEIS BARCELLI, Jeanne DELHOMMEL, Julia FREZEL, Julien RONZON & Maxime CATALOGNA, 2026 - **Évaluation de la Multi-Performance en Systèmes Agroforestiers de type verger-maraîcher.**
Innovations Agronomiques 109, 1-14
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art01>

Kevin MOREL, Suzanne PELOIS, Andrea ADAMKO-SEVESTRE, Victoire BARILLET & Clémentine FAYOL, 2026 - **Concilier fertilité, autonomie et travail en maraîchage biologique : expérimentation de systèmes de cultures innovants - projet PERSYST.**
Innovations Agronomiques 109, 15-29
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art02>

Lisa FOLTON, Nathalie CORROYER, Bruno CORROYER & Jean-Louis BENASSI, 2026 - **SYDRA : conception et évaluation de systèmes de culture cidricoles agroécologiques.**
Innovations Agronomiques 109, 30-43
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art03>



Bruno PARIS, Roxane CALVAIRE, Léo KERAUDREN, Emilie MAUGIN, Doïna NJIKE, Jacques FILLÂTRE, Isabelle CABEU, Sophie DESCAMPS, Laurent CAMBOURNAC, Solène HENRY, Amandine RUBIN, Bastien FASSI, Elysa FILLALI-AICART, Stephen AMBROGIO & Fabien ROBERT, 2026 - **2.ZERHO : Des combinaisons de leviers et un outil numérique en horticulture pour approcher le**

pilotage en zéro pesticide.
Innovations Agronomiques 109, 44-57
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art04>

Julien CHETTY, Marion SCHWARTZ, Mathias CHRISTINA & Alizé MANSUY, 2026 - **Réduire les herbicides en cultures de canne à sucre, à quel prix.**
Innovations Agronomiques 109, 58-71
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art05>

Laurent BRUN, Christophe CHAMET, Freddy COMBE, Myriam CODINI, Florence FEVRIER, Amandine FLEURY, Valérie GALLIA, Maëlle GUIRAUD, Eric HOLSTALNOU, Capucine JORANT, Marion MICHAUD, Alexandre PERRIN, Claude-Eric PARVEAUD & Julie POISSY, 2026 - **MIRAD - Maîtrise des Intrants et des Résidus phytosanitaires pour des vergers d'Abricotiers Durables.**
Innovations Agronomiques 109, 72-84
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art06>

Marie-Laure GREIL, Marie-Hélène RAMES, Rémi SEGARD, Vincent VALLEJO, Malick SOW, Elisa D'ALIBERT, Olivier BEGUE, Quentin HOFFMANN & Dominique MONTY, 2026 - **Favoriser une régulation naturelle des bio-agresseurs par la diversification et multiplication des habitats en vergers de prunier.**
Innovations Agronomiques 109, 85-97
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art07>

Enguerrand BUREL, Ambrogio COSTANZO, Alexandre TRICHEUR, Anne-Laure DE CORDOUE, Loïc VIGUIER, Florence LETAILLEUR, Aloïs ARTAUX, Jean CHAMPION, Clément BARDON, Aurélien DUPONT, Eve-Anna SANNER, Delphine BARBERIS, Clémence ISAC & Florian CELETTE, 2026 - **Made in AB – Maîtrise des ADvEntices en AB.**
Innovations Agronomiques 109, 98-112
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art08>

Jérôme LAMBION, Pierre LASNE & Anthony GINEZ avec la collaboration de : Marine BRUNO, Aurélie FERRER, Valérie FONTAINE, Benjamin GARD, Emilien GENETIER, Camille GIRAUDET, Danny LEBRETON & Inès MAHE, 2026 - **Contribution des aménagements agroécologiques à la régulation des ravageurs en cultures maraîchères sous abri : Projet DEPHY COSYNUS 2019-2024.**

Innovations Agronomiques 109, 113-125
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art09>

Metty TREBEAU, Dominique BARRY-ETIENNE, Myriam DUCHEMIN, Azimé YOL & Patricia LACLAU, 2026 - **Diversité des Champignons Mycorhiziens à Arbuscules (CMA) dans les sols de Martinique dans un contexte de modèle du jardin créole antillais.**
Innovations Agronomiques 109, 126-138
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art10>

Jay Ram LAMICHHANE & Véronique LAUDINOT, 2026 - **Evaluation des risques liés à l'utilisation de semences non traitées sur le rendement et la qualité grainière du blé tendre d'hiver.**
Innovations Agronomiques 109, 139-150
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art11>

Sophie MAILLANT, Clément MUNIER & Nathael LECLECH avec la collaboration de : Camille CHAUVIN, Sarah GUILLOCHEAU, Battle KARIMI, Latounde MOYEDE & Marie-Noëlle PONS, 2026 - **Impacts de systèmes sobres en produits phytosanitaires sur la biologie du sol.**



Innovations Agronomiques 109, 151-164
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art12>

Emilie CASTEIL, Laëtitia BRIACHE, Corentin CHATEAU, Olivier FAVARON, Gwénaëlle LE BIHAN, Ludivine QUINET, Franck VIAL & Vincent FALOYA, 2026 - **Systèmes de culture agroécologiques légumiers incluant la carotte, économiquement viables et économes en produits phytosanitaires.**

Innovations Agronomiques 109, 165-176
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art13>

Bruno POTTIEZ, Samuel ALEXANDRE, Stéphane HERVIEU, Maxime DERBECOURT, Marie BERNARD, Sandrine OSTE, Olivier BARLET, Olivier LEY, Hélène BAUDET, Maryline MAGNIN-ROBERT, Rémi PLATEL, Brice LOUVEL & Ali SIAH, 2026 - **Minimisation de l'utilisation des pesticides en systèmes de grandes cultures et cultures légumières en Hauts-de-France.**

Innovations Agronomiques 109, 177-187
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art14>

Xavier BURGUN, Marion LE BOT, Caroline GOUTTESOULARD, Guillaume DELANOUE, Marc VERGNES, Lionel LEY Olivier KEICHINGER & Marie THIOLLET-SCHOLTUS, 2026 - **Le projet BEE, une démarche de protection agroécologique de la vigne pour intégrer le biocontrôle.**

Innovations Agronomiques 109, 188-200
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art15>

Christophe GAVIGLIO, 2026 - **Le projet NextGenViti un laboratoire pour des solutions innovantes, les apports de la robotique et de la pulvérisation fixe pour la réduction des pesticides en viticulture.**

Innovations Agronomiques 109, 201-212
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art16>

Violette AURELLE, Olivier BONNARD, Yohan CHARBONNIER, Cyril CONDOMINES, Thomas COSTES, Brice GIFFARD, Louis GROSS, Benjamin JOUBARD, Gaëtane LE PROVOST, Nicolas MOKUENKO, Océane RICAU, Sylvie RICHART CERVERA, Adrien RUSCH, Alex STEMMELEN & Pauline TOLLE, 2026 - **Diversifier les paysages viticoles à travers les pratiques agricoles et les habitats semi-naturels pour préserver la biodiversité.**

Innovations Agronomiques 109, 213-222
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art17>

Pierre SCHNEIDER, Louise MALOT, Romario JACQUES, Matthieu HIRSCHY, François BRUN & Emeric EMONET, 2026 - **Dispositif DEPHY EXPE 2 : un jeu de données sur les performances et les leviers agroécologiques de 120 systèmes de culture utilisant les produits phytopharmaceutiques en ultime recours.**

Innovations Agronomiques 109, 223-236
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art18>

Pierre SCHNEIDER, Matthieu HIRSCHY, Romario JACQUES, Louise MALOT & Emeric EMONET, 2026 - **Synthèse du dispositif DEPHY EXPE 2 : proposition méthodologique pour réaliser une synthèse transversale**

Innovations Agronomiques 109, 237-247
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art19>

Pierre SCHNEIDER, Matthieu HIRSCHY, François BRUN, Romario JACQUES, Louise MALOT & Emeric EMONET, 2026 - **DEPHY EXPE 2 : analyse transversale des performances de systèmes de cultures & économes en produits phytopharmaceutiques**

Innovations Agronomiques 109, 248-262
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art20>



Évaluation de la Multi-Performance en Systèmes Agroforestiers de type verger-maraîcher

Chloé GASPARI¹, François WARLOP¹, Maxime JACQUOT¹, Mathilde VEIS BARCELLI¹,
Jeanne DELHOMMEL², Julia FREZEL³, Julien RONZON³, Maxime CATALOGNA³

¹ GRAB, BP 11283 - 84911 Avignon cedex 9, France

² Bio de Provence, 885 chemin de la forêt - 84140 Avignon, France

³ Ferme de la Durette, chemin des Semailles - 84140 Avignon, France

Correspondance : chloe.gaspari@grab.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art01>

Résumé

Le projet EMPUSA a permis de poursuivre l'évaluation multi-critères (durabilité agronomique, économique, environnementale) de la ferme-pilote de la Durette installée dans le Vaucluse depuis 2013. De nombreux indicateurs ont été mobilisés, outre l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT), depuis 2016 pour caractériser les performances du système agroforestier implanté, associant fruitiers et légumes diversifiés (verger-maraîcher). Ces suivis montrent une réduction effective des IFT en arboriculture et en maraîchage, objectif premier du programme Ecophyto, qui s'accompagne de réductions variables des rendements selon les cultures concernées. Le résultat économique honorable est rendu possible par une gestion de la diversité cultivée au sein d'un collectif de travail. Des suivis fins de la régulation naturelle des ravageurs montrent par ailleurs un effet intermittent positif de l'agroforesterie.

Mots-clés : agroécologie, agroforesterie, services écosystémiques, multi-performance, verger-maraîcher

Abstract: Multi-performance assessment on Durette farm - Results from Empusa project

The EMPUSA project has enabled the multi-criteria assessment (agronomic, economic and environmental sustainability) of the Durette pilot farm set up in the Vaucluse (southern France) since 2013. In addition to the IFT index (related to pesticide use), numerous indicators have been used since 2016 to characterise the performance of the agroforestry system planted, combining fruit trees and diversified vegetables. The monitoring shows an effective reduction in IFTs in fruit trees and market gardening, the primary objective of the Ecophyto programme, accompanied by variable reductions in yields depending on the crops concerned. The honourable economic result is made possible by managing the diversity of crops as part of a working group. Careful monitoring of natural pest control also shows that agroforestry has a positive intermittent effect.

Keywords: agroecology, agroforestry, ecosystemic services, multi-performance, market gardening

1. Introduction

La diversification des systèmes cultivés est désormais reconnue comme un levier majeur de l'agroécologie, pour conférer plus de résilience au système et à l'exploitation agricole (Vialatte et al., 2022). Elle s'accompagne de contraintes d'ordre agronomique, ergonomique (design), ainsi que socio-économiques (compétences diversifiées, temps de travail et compromis...).



En maraîchage diversifié, un nombre croissant d'installations adopte le modèle du verger-maraîcher. Cette orientation permet notamment de valoriser un foncier souvent limité — 50 % des nouveaux installés ne disposent pas de terres propres (Warlop et al., 2017). Elle offre également la possibilité d'élargir la gamme de produits proposés sur les étals et de tirer parti des nombreux services écosystémiques rendus par les arbres présents dans les parcelles : protection contre le vent, création d'ombrage, apport de matière organique, et augmentation de la biodiversité.

De nombreux vergers-maraîchers, installés depuis 15 ans, ont été suivis au sein de plusieurs projets afin de capitaliser sur les pratiques (projets SMART, PEI SAM, Arbratatouille, ALMANAC...), les enseignements, et de produire des références.

Parallèlement, deux systèmes ont été co-conçus dans le cadre du projet Dephy Expé VERTiCAL (2012-2018)¹, un sur la plateforme TAB (Drôme), et un sur la **ferme pilote de la Durette** (Vaucluse). Ce dernier a été conçu afin d'**évaluer l'effet de la diversification sur la pression des bioagresseurs et l'IFT**, ainsi que la **possibilité pour des agriculteurs, de vivre des revenus tirés d'un système si diversifié**.

Dans la continuité du projet VERTiCAL (2012–2018), le projet EMPUSA vise à expérimenter des systèmes agroforestiers pluristratifiés, associant des espèces fruitières et des cultures annuelles, conduits en contexte climatique méditerranéen et en agriculture biologique (AB). Ce premier projet avait mis en évidence une diminution marquée de l'IFT par rapport aux références Agreste, 2018 (1,3 IFT pour la pêche) sur la ferme pilote de la Durette (Castel et al., 2019), mais le système alors jeune n'avait pas permis de conclure à une efficacité économique du système. L'objectif principal d'EMPUSA est d'évaluer les performances de ce verger-maraîcher en phase de début de maturité du système avec d'une part l'entrée en production des fruitiers et d'autre part l'installation sur la ferme des agriculteurs. La dimension socio-économique conditionne la performance du système et sera ici traitée simultanément aux performances agronomiques et environnementales. Parallèlement, une expérimentation a été menée pour évaluer la régulation naturelle des ravageurs.

2. Contexte et objectifs

2.1. La ferme pilote de la Durette : un système de culture et d'expérimentation

Ce site original est une ferme à part entière sur laquelle les agriculteurs font partie du système évalué. Il a été lancé en 2010 par le Grab qui a géré les plantations des arbres fruitiers et assuré les investissements de départ. Le foncier a ensuite été sécurisé par Terre de Liens en 2018.

La dimension humaine et socio-économique est centrale et incontournable pour juger de la pertinence de ce système innovant. Elle permet en effet de mieux appréhender la possibilité pour des producteurs de conduire un système si diversifié, d'en dégager les conditions de réussite, et de rendre compte des forces et des limites du système tel qu'il a été conçu.

De 2016 à mi-2020, deux agriculteurs étaient installés sous le statut juridique de couveuse d'entreprise. Cette phase a permis la prise en main du système de production, la création d'outils pour la conduite des cultures, et l'élaboration d'itinéraires techniques adaptés. En 2020, ils se sont constitués en Groupement Agricole d'Exploitation en Commun (GAEC). Une troisième exploitante les a rejoints en 2022, suivie d'une quatrième en milieu d'année 2024.

Chaque exploitant est responsable d'un atelier spécifique au sein de la ferme, ce qui a notamment permis de rendre l'atelier arboriculture plus productif, mais tous interviennent sur la production

¹ <https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/projet-vertical>

maraîchère. Les ateliers maraîchage et arboriculture reposent sur des rythmes de travail différents, et l'arbitrage est souvent orienté pour répondre aux exigences des cultures maraîchères (Thèse R. Paut.).

2.2. Caractéristiques de la ferme pilote de la Durette

La Durette est une ferme agroforestière² située dans la zone péri-urbaine d'Avignon et valorise en circuits courts ses fruits et légumes. Sur une surface de 4,6 ha, ce système comporte 0,95 ha d'infrastructures agroécologiques (IAE) intégrant des haies diversifiées ou mono-espèce, une mare, et des zones refuges pour les animaux (renards, mustélidés, amphibiens, reptiles), 0,39 ha de tunnel dédié au maraîchage, et 2,44 ha de verger-maraîcher associant des doubles rangs d'arbres fruitiers et des bandes maraîchères. Les 0,82 ha restants constituent le réseau de tournières naturellement enherbé de la ferme. Les premiers arbres ont été plantés en 2014.

La partie verger comporte les 6 grandes espèces rosacées (prune, pêche, abricot, cerise, poire, pomme) plantés sur 4 parcelles. Les doubles rangs de fruitiers sont espacés de 6 m, et les espaces entre arbres varient de 5 m pour les fruits à pépins à 6 m pour les fruits à noyaux. Une bande de 2 m est préservée de part et d'autre du rang d'arbre, dédiant une largeur de 10 m à chaque double rang de fruitier. Afin de perturber le déplacement et l'installation des bioagresseurs, les rangs de fruits à pépin sont en alternance avec des fruits à noyaux. Sur 36 rangs de fruitiers, on compte 32 variétés qui s'échelonnent pour proposer des fruits sur l'ensemble de l'année. L'espace dédié au maraîchage est également large de 10 m, permettant l'installation de 6 planches cultivables.

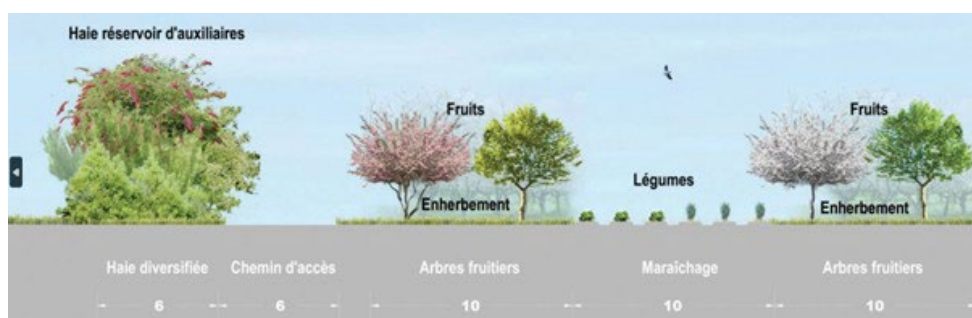


Schéma 1 : Coupe transversale du verger-maraîcher de la ferme pilote de la Durette

2.3. Leviers agroécologiques mobilisés

L'objectif général est de proposer un système de rupture associant des innovations techniques et des pratiques plus traditionnelles, afin de leur conférer une résilience optimale et de réduire à minima les intrants phytosanitaires. Un des principaux services attendus porte sur la meilleure régulation naturelle des ravageurs par un meilleur équilibre écologique des systèmes.

Pour répondre à ces objectifs, de nombreux leviers ont été mobilisés. Ils concernent l'organisation paysagère, des stratégies d'actions sur les populations initiales, d'évitement, d'atténuation, ou encore des solutions de rattrapages (Grab, 2018). Parmi les leviers testés, la vente en circuits courts est centrale. Ce levier concerne l'écosystème « ferme » et permet, en améliorant la rémunération du producteur, d'optimiser la valorisation des productions.

3. Matériel & méthode

Dans la continuité du projet Vertical, un jeu d'indicateurs a été mobilisé pour suivre la multi-performance du système Durette dans ses différentes composantes.

² www.grab.fr/durette



3.1. Évaluation des performances socio-économiques

Différents indicateurs (Tableau 1) permettent de dresser un état des lieux de la performance socio-économique du système. Ils sont comparés aux références produites par le Casdar MMBio (2019-2023)

Tableau 1 : Variables mesurées pour les indicateurs économiques et socio-techniques

Variable mesurée	Source	Indicateurs calculés	Méthode de calcul
Viabilité économique	Bilans comptables	Rémunération des producteurs	Bilan comptable
		Charges pour 1000 m ²	Type de charge / surface développée ramené à 1000m ²
		Produits pour 1000 m ²	Produits par ateliers / surface développée ramené à 1000m ²
		Chiffre d'affaires / UTH	
		Chiffres d'affaires / atelier de production	
Optimisation du système	Rendements commercialisés	Tonnage annuel / culture / atelier	Conversion en poids des productions vendues à l'unité (ex : salade) et addition des rendements
Qualité de la récolte	Enquête clients	Note d'appréciation	Moyenne
Risque financier du système	Fichier de vente	Répartition du risque économique	Chiffre d'affaires des productions principales (> à 5 % du CA)
		Vulnérabilité commerciale	Représentativité du client principal (en %) du CA total
Charge de travail	Temps de travaux annuels	Temps de travail hebdomadaire	
		Nombre de semaine de plus de 50 h	
		Nombre de semaine de vacances	

3.2. Évaluation des performances agronomiques

Des indicateurs permettent d'évaluer la performance agronomique de la ferme (Tableau 2)

Tableau 2 : Variables mesurées pour les indicateurs agronomiques

Variable mesurée	Source	Indicateurs calculés	Méthode de calcul
Maîtrise des bioagresseurs	Observations terrain et retours producteurs	Pression des bioagresseurs de l'atelier arboriculture	Moyennes / variétés / an
	Rendements commercialisés	Tonnage annuel / culture	Conversion en poids de certaines productions vendues à l'unité en poids (ex : salade) et addition des rendements
	Agenda de traitements	IFT des ateliers fruits et légumes	Dose appliquée / dose homologuée x surface traitée / surface de la parcelle



Compte tenu des objectifs précédemment cités, le système ne possède pas de témoin. Les références à dire d'experts qui permettent de situer les résultats de la ferme de la Durette sont détaillés, Tableau 3.

Tableau 3 : Références témoins utilisées pour comparer le système de la Durette

Type de référence	Espèce / thématique	Source
Références IFT	Pomme de terre, pomme, abricot, pêche	Réseau de DEPHY Ferme
	Tomate, poireau, melon, chou, carotte, cerise et prune	Enquêtes sur les pratiques culturales, Agreste 2020a
Références rendements de	Pomme, abricot, et pêche	Réseau de DEPHY Ferme
	Carotte, melon, poireau, pomme de terre, tomate	Guide technique ITAB
	Cerise, poire	L'arboriculture fruitière en AB région PACA - Inosys
	Prune	Référentiel technico-économique en filière fruit d'été, Chambre d'Agriculture de Corse

3.3. Évaluation de la régulation naturelle des ravageurs

Dans cette étude, l'objectif est de comparer le service de prédation sur deux types de proies potentielles (leurs de chenilles et œufs d'insectes) dans 4 types de « systèmes » comparés : fruitiers en culture pure (F), légumes en culture pure (L), fruitiers en verger-maraîcher (F-VM) et légumes en verger-maraîcher (L-VM).

Nous émettons deux hypothèses sur ces systèmes cultivés :

- l'association de l'arboriculture fruitière et du maraîchage permet un meilleur service de prédation que lorsque ces types de cultures sont cultivés indépendamment ;
- dans les vergers-maraîchers, il y a des différences dans les services de prédation réalisés pour les deux types de cultures.

L'évaluation du service de prédation a été réalisée dans la région d'Avignon, un réseau de parcelles en agriculture biologique constitué de 4 vergers-maraîchers (dont la ferme pilote de la Durette), 3 vergers en culture pure et 3 parcelles de maraîchage en culture pure.

De 2019 à 2023, 4 à 5 sessions annuelles de mesures ont été organisées, entre avril et juillet. Des cartes de prédation (avec des œufs d'*Ephestia kuehniella*, teigne de la farine) et des chenilles en pâte à modeler ont été exposées respectivement 2 et 7 jours par session. Des proies sentinelles ont été placées à 5 emplacements voisins dans les cultures pures et à 20 emplacements voisins dans le système verger-maraîcher (5 sous les fruitiers et 15 dans les légumes), avec 3 à 5 proies sentinelles par emplacement.

Après exposition, le taux de prédation a été mesuré sur les cartes et les chenilles en pâte à modeler. Et nous avons distingué le type de prédateur ayant laissé des marques sur les chenilles (arthropodes, oiseaux, mammifères ou prédateurs non identifiés).

Plusieurs indicateurs sont calculés pour le service de prédation :



- (i) intensité et fréquence de la prédation sur les œufs sentinelles ;
- (ii) diversité, fréquence et richesse de la prédation sur les chenilles de pâte à modeler.

L'analyse statistique des différences entre les types de systèmes a été réalisée séparément pour chaque indicateur à l'aide de modèles mixtes linéaires tenant compte de l'année et de l'exploitation. Les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel R (version 4.2.2).

3.4. Évaluation des performances environnementales

Cette catégorie regroupe des indicateurs environnementaux, dont la variable estimée est ici les émissions de gaz à effet de serre.

Deux diagnostics ont été effectués sur la Durette entre les années 2019 et 2023 et permettent de situer le caractère vertueux de la ferme dans le paysage agricole.

L'outil Diag. Climat consiste à analyser les émissions annuelles de Gaz à effet de Serre (GES) liées à l'activité de la ferme, et en parallèle le stockage annuel de carbone sur la ferme (ce stockage compense ou non les émissions de GES émises). Ce parallèle entre émissions et stockage permet d'obtenir un bilan annuel net des émissions (le bilan brut ne concerne que les émissions). Les émissions de GES sont exprimées en tonnes équivalent CO₂, et lissent les émissions de méthane, protoxyde d'azote, ammoniac et autres sur une même unité.

L'outil Diag. énergie consiste à analyser les consommations annuelles d'énergie directes (électricité, gaz, carburant) et indirectes (intrants comme les engrais, les phytos, l'aliment des volailles, l'utilisation de plastique, la présence de bâtiments...) d'une ferme.

4. Résultats et discussion

4.1. Performances socio-économiques

4.1.1. Commercialisation :

Des cultures très diversifiées

La ferme produit une large diversité de fruits et légumes et commercialise chaque année entre 32 et 48 cultures (une culture peut rassembler différents types de légumes : exemple les brocolis et les cabus entrent dans la culture choux).

Entre 5 et 8 cultures dépassent 5 % du poids total produit chaque année sur la ferme. La pomme de terre, la tomate, le chou et la carotte apparaissent presque chaque année dans ces cultures. Entre 5 et 8 cultures dépassent 5 % du chiffre d'affaires annuel total de la ferme. La carotte, le haricot, la pomme de terre et la tomate sont représentés chaque année.

Des débouchés très diversifiés

La commercialisation repose principalement sur la vente de paniers hebdomadaires, approvisionnant en moyenne entre 58 et 85 foyers chaque semaine. En 2023, cela a représenté un total de 4 431 paniers, correspondant à 250 clients. Une part des excédents de production est écoulee via des épiceries bio, ce canal de distribution ayant représenté 11 % du chiffre d'affaires total de la ferme en 2023. Le prix moyen du panier semble évoluer en fonction de la diversité des produits proposés à la commercialisation : l'année 2022 a été la plus diversifiée, et le coût moyen du panier plus élevé.

La vente par panier passe par un site en ligne (Socleo³) qui permet de réaliser des commandes. Chaque client est ainsi en mesure de commander selon ses besoins en diversité et en fréquence.

3 Ferme de la Durette - Actualités



L'analyse des prix pratiqués (com. pers. GRAB, 2023) montre que la plupart des légumes sont vendus à un coût plus bas que la moyenne départementale enregistrée pour des maraîchers diversifiés de circuits courts.

En 2023, le principal client issu du réseau d'épicerie biologiques n'a représenté que 3 % du chiffre d'affaires total, proportion similaire à celle du principal client particulier. Entre 2019 et 2023, la clientèle en épicerie oscille entre 7 et 12 clients. Cet indicateur montre la faible dépendance économique de la ferme à un client unique, et témoigne ainsi de sa bonne résilience économique.

4.1.2. Résultats économiques de la ferme

Chaque année, le GAEC emploie un ouvrier saisonnier pour la période de pleine activité, du printemps à l'automne, ainsi qu'un apprenti dont la rémunération est partiellement couverte par des dispositifs d'aide publique. Les charges liées à ce poste sont plus élevées de 37 % par rapport aux références. Les charges opérationnelles enregistrent - 36,7 % de charges. Elles regroupent les dépenses liées au matériel végétal, animal, et aux activités de commercialisation. Les charges spécifiques sont équivalentes entre la Durette et la référence. Elles incluent les frais de gestion, les coûts de mécanisation, et les dépenses liées aux bâtiments fonciers. C'est sur les charges de structure que la ferme fait des économies : - 89,4 % qui s'expliquent par l'auto-adaptation d'outils achetés d'occasion (épandeur, dents Michel, disques), ou l'auto-production de matériel (porte-outil automateur électrique « chtit-bine », lame souleveuse et autre matériel tracté).

En 2021 et 2022, la ferme comprenait un atelier d'élevage de canes pondeuses. Cet atelier a été relancé fin 2024 avec un élevage de poules pondeuses, les œufs de canes n'ayant pas rencontré le succès escompté. La ferme propose, en plus des fruits et légumes, des produits transformés à partir des fruits abîmés (purées, jus), ou des excédents de légumes récoltés en fin d'hiver (soupes). Ces produits d'appels valorisent davantage les paniers.

Les charges et les produits sont inférieurs aux références avec des écarts respectifs de 1 500 € et 2500 € en moyenne. Toutefois, l'exploitation génère un résultat d'exploitation de 2 000 € pour 1 000 m². Il permet la rémunération de trois exploitants à hauteur de 1 328 € par mois, soit 95 % du SMIC.

4.1.3. Temps de travail

Les exploitants cherchent à concilier performance économique et qualité de vie, et les résultats correspondent à leur prévisionnel. Leur charge de travail moyenne correspond aux références et atteint 2 200 heures par an. Ils parviennent à prendre environ quatre semaines de congés par an. En moyenne, 30 semaines par an sont travaillées entre 30 et 45 heures hebdomadaires, et 16 semaines dépassent les 45 heures.

4.1.4. Discussion des résultats

Un système viable et vivable

La diversification du système permet une autonomie commerciale, et constitue un atout pour attirer la clientèle : ils y trouvent des fruits, des légumes, et des œufs. Elle apporte une agilité au système qui en fait sa robustesse : quand un aléa climatique ou technique affecte la productivité d'une culture, les producteurs ont la possibilité de se retourner vers une autre - un gel sur abricot en 2021 a pu par exemple être compensé par des cultures de légumes d'automne.

Un biais méthodologique peut expliquer l'écart de produits de la ferme de la Durette avec la référence : celle-ci est calculée pour une ferme uniquement en maraîchage, avec une partie tunnel et une partie plein champs considéré dans les 1 000m². Les 1 000m² de la ferme de la Durette comprennent des légumes plein champs, de l'arboriculture à faible densité, et des tunnels en faible proportion.

En 2024, la ferme fait vivre 3 personnes à hauteur d'un SMIC pour 42h de travail hebdomadaire et 4 semaines de congés payés, et embauche un ouvrier saisonnier ainsi qu'un apprenti. Ce résultat est en



adéquation avec les projections des producteurs qui cherchent à allier revenu acceptable et qualité de vie. Basés sur la dimension collective du GAEC ils se répartissent la charge mentale, les astreintes, et s'organisent pour alléger les conditions de travail.

Perspectives des producteurs pour améliorer leur résultat

Avec l'arrivée d'une 4ème productrice, le collectif de producteurs s'organise pour dégager des revenus supplémentaires. Il a pour ambition de rester sur les mêmes volumes de production légumière, et de mieux optimiser le verger. Pour améliorer les rendements à la surface, les rangs de fruitiers de densité faible ont été densifiés par la plantation d'un arbre supplémentaire entre chaque arbre déjà en place. L'amélioration de sa conduite devrait également participer à une évolution positive du chiffre d'affaires.

La réduction des charges en maraîchage est la piste privilégiée. D'autres pistes sont envisagées comme miser sur le gain de fertilité lié aux pratiques d'épandage de matière organique et diminuer le recours à la farine de plume, ou mieux réguler le climat sous abris pour réduire le recours à la lutte bio (insectes sur acariens achetés). Les producteurs continuent d'améliorer et d'optimiser leurs itinéraires pour obtenir de meilleurs rendements à surface équivalente sans augmenter le temps de travail.

Le développement de l'atelier poules pondeuses démarré en 2024 devrait générer un chiffre d'affaires supplémentaire de 18 000€ pour 10 000€ de bénéfices.

4.2. Performances agronomiques

4.2.1. Atelier arboriculture

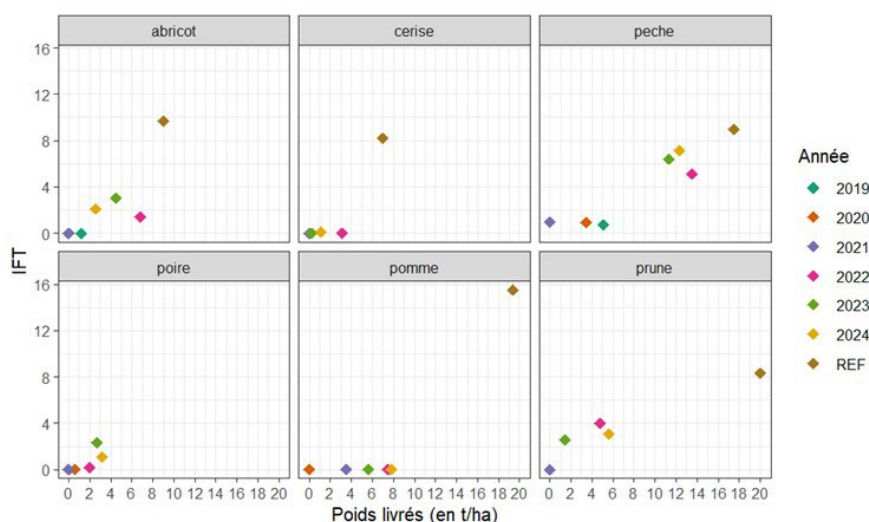


Figure 1 : Rendements (en t/ha) et IFT (en nombre d'interventions tout type de traitement compris) pour les espèces principales de l'atelier arboriculture de la ferme de la Durette.

Une forte réduction d'IFT

Les IFT inscrits sur la figure 1 récapitulent les interventions de biocontrôle et hors

biocontrôle réalisées sur les différentes cultures de l'atelier arboriculture depuis 2019, et les rendements associés. En prenant la moyenne des 3 dernières années, années les plus traitées, nous observons une baisse d'IFT par rapport aux références de 77,43 % en abricot, de 99,57 % en cerise, de 30,73 % en pêche, de 100 % en pomme, et de 63,33 % en prune. Sur poirier, l'hoplocampe constitue le principal ravageur. Concernant le pêcher, la cloque est efficacement maîtrisée à l'aide de bouillie sulfo-calcique ; toutefois, la pression exercée par la tordeuse orientale reste problématique, notamment sur les variétés tardives. Pour cette espèce, 17 % des fruits, majoritairement piqués, ont été transformés en 2024. Le monilia sur abricot est actuellement bien contrôlé. La pression de puceron est bien régulée sur la majeure partie des cultures, sauf pour la pêche avec le puceron farineux ou des traitements sont réalisés. La pression de tavelure sur pommier est très faible du fait de la faible densité de plantation. La principale problématique phytosanitaire rencontrée sur la ferme de la Durette concerne le carpocapse, dont la pression demeure élevée malgré l'installation de filets de protection. En 2024, 46 % des fruits ont été orientés vers la transformation, correspondant approximativement à la proportion de fruits piqués.



Des rendements en deçà des standards de production mais satisfaisants en circuit court ?

Le rendement des abricotiers varie avec l'alternance, et les conditions climatiques (notamment le gel). Lors des années favorables (2022), la production a atteint près de 7 t/ha, se rapprochant ainsi de la référence de 9 t/ha. Le rendement des cerisiers demeure faible, un résultat davantage imputable aux conditions de conduite (défaut de pollinisation) qu'à des contraintes sanitaires. La production de pêches semble se stabiliser autour de 12 t/ha, tandis que la référence standard est établie à 16,5 t/ha. Les rendements en poires, prunes et pommes restent globalement bas. Les rendements comptabilisent les fruits piqués envoyés en transformation, aussi l'écart de rendement observé par rapport aux références ne peut être uniquement imputé à la pression des bioagresseurs.

4.2.2. Résultats des observations agronomiques de l'atelier maraîchage

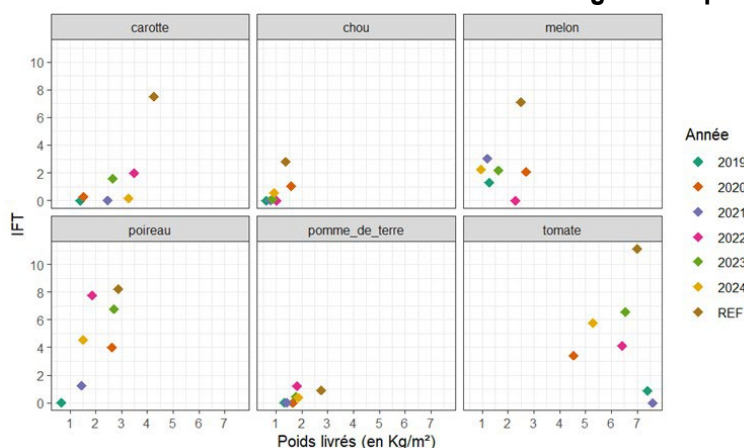


Figure 2 : Rendements (en kg/m²) et IFT (en nombre d'interventions tout type de traitement compris) pour les espèces principales de l'atelier maraîchage plein champ de la ferme de la Durette

Une forte réduction d'IFT

La Figure 2 récapitule les interventions de biocontrôle et hors biocontrôle réalisées sur l'atelier maraîchage, ainsi que les rendements associés depuis 2019. En maraîchage, les interventions ne sont pas systématiques : elles sont déclenchées en fonction de l'évaluation du niveau de pression parasitaire par les producteurs, et donnent une indication sur la pression des bioagresseurs. Figurent sur ce graphique les espèces classiquement traitées. Entre 2019 et 2024, la moyenne des traitements réalisés révèle une réduction d'IFT sur toutes les cultures. - 83,6 % en carotte, - 93,6 % en melon, - 79,3 % en poireau, - 22,3 % en pomme de terre et - 50,7 % en tomate. Sur carotte et melon, l'oïdium constitue la principale problématique sanitaire. Sur chou, la piéride est le ravageur prédominant. Les bioagresseurs majoritairement observés sur poireau sont des lépidoptères. En pomme de terre, les rares traitements recensés ciblent essentiellement le doryphore. Enfin, en tomate, *Tuta absoluta* demeure le bioagresseur le plus difficile à maîtriser.

Des rendements en moyenne en deçà des standards de production

L'analyse des rendements (Figure 2) met en évidence des dynamiques différenciées selon les cultures. En carotte et en poireau, la productivité montre une tendance à l'amélioration, en particulier au cours des trois dernières années, marquées par de meilleurs rendements. En revanche, les rendements du chou et de la pomme de terre demeurent relativement stables d'une année à l'autre, tandis que ceux de la tomate et du melon présentent une variabilité plus marquée entre les années.

En réalisant une moyenne à partir des 3 dernières années de cultures qui représentent davantage les résultats de la ferme, les rendements observés restent inférieurs aux références techniques. Il faut cependant rappeler que les données de la Durette sont exprimées en rendement commercialisé tandis que les références sont exprimées en rendement commercialisable. Dans ce contexte, on observe un écart avec les références de - 26,14 % en carotte, de - 32,67 % en chou, de - 35,14 % en melon, de - 29,5 % en poireau, de - 34 % en pomme de terre, et de - 13 % en tomate.



Des rendements bien valorisés pour des pressions variables de bioagresseurs

La Figure 2 montre également que le nombre d'IFT n'est pas corrélé au rendement. En carotte par exemple, l'année la plus traitée (2022) a donné le meilleur résultat, mais donne en 2024 un rendement quasi similaire à 2022 sans traitement. Les années les plus traitées en melon n'ont pas donné les meilleurs rendements. Par ailleurs, à IFT équivalent, l'année 2020 a été nettement plus productive que l'année 2023. Ces observations sont corroborées par une enquête (com. pers. GRAB, 2024) menée auprès des producteurs, selon laquelle les pertes de rendement dues aux ravageurs sont perçues comme limitées.

4.2.3. Discussion des résultats

Une baisse d'IFT répondant aux attentes

Le recours aux intrants est plus faible que les références en maraîchage et en arboriculture, ce qui valide nos objectifs de réduction initiaux. Cependant, nous ne pouvons pas affirmer que ce taux est dû à une baisse de pression des bioagresseurs. Une forte pression en *Cydia pomonella* et *Drosophila suzukii* a nécessité l'installation de filets sur les fruits à pépins et les cerisiers. La problématique du carpocapse reste majeure dans ce système.

D'autres facteurs peuvent expliquer cette baisse d'IFT comme la vente en circuit court moins exigeante sur la qualité finale des légumes, la possibilité de transformer des fruits et légumes piqués, et la volonté des producteurs de favoriser les régulations naturelles. Nous savons, pour avoir analysé la fidélité de la clientèle de la ferme et l'avoir questionnée (com. pers. enquête GRAB, 2022), que les fruits vendus sont estimés de bonne qualité (82 % des clients sont très satisfaits). L'hypothèse d'une vente de fruits abîmés est donc à exclure.

Une productivité maximisée dans un contexte extensif

L'analyse montre que les rendements sont globalement inférieurs aux rendements de références. Nous savons cependant que le système de références constitue un biais dans notre comparaison (paragraphe 3.2)

L'écart de rendement constaté peut toutefois être en partie expliqué par le système de conduite des cultures. Concernant l'atelier maraîchage, nous constatons (travaux menés dans le projet Almanac) une compétition sur les planches de légumes les plus en proximité avec les rangs de fruitiers. Par ailleurs, la surface développée pouvant atteindre en moyenne 1,8 à 2 rotations dans les références atteint ici 1 à 1,2 rotations : les cultures étant souvent intercalées avec des engrais verts.

Concernant l'atelier arboriculture, la faible densité de plantation peut contribuer à expliquer un rendement inférieur aux références, en accentuant les faibles productions des premières années de culture. Les fruitiers présentent en effet une diminution de densité sur rang de 59 % pour la pêche et la prune, 50 % pour l'abricot, et 70 % pour la pomme et la poire. Une gestion tardive de la vigueur et de la pollinisation, notamment sur cerisier, a pu retarder l'entrée en production. La modification de l'itinéraire technique des pommiers, passant d'une conduite en plein vent à une conduite sous filet, a sans doute des conséquences sur l'efficacité de la conduite des arbres. La conduite de rangs de fruitiers avec une plus grande densité de plantation pourrait permettre d'obtenir plus tôt des rendements significatifs et de conduire les arbres sous forme palissée pour optimiser leur gestion dont la protection par filet. Ce levier densification a d'ailleurs été mis en place à la Durette (paragraphe 4.1.5).

Rappelons qu'il s'agit d'un verger très diversifié (Paragraphe 4.1.1), qui exige plus de maîtrise technique, plus d'opérations étalées dans le temps par rapport à un verger mono-variétal pour lequel sont établies les références disponibles et utilisées ici. C'est par ailleurs un atelier qui est sous le joug de compromis quand le maraîchage, activité économique dominante, mobilise tous les associés.

Des biais méthodologiques peuvent expliquer l'écart de rendement en maraîchage. L'expression de rendements commercialisés à la Durette et de rendement au champ pour la référence est le principal



biais. La pratique des associations de cultures (carotte et radis par exemple) en est un autre : elle double la déclaration des surfaces, biaise le calcul de rendement au m² associé quand dans la réalité la planche est *in fine* bien valorisée. La traçabilité des rendements constitue le dernier biais : pour les séries de légumes qui se chevauchent, nous ne pouvons pas distinguer le rendement provenant des tunnels des rendements provenant du plein champ. Des ratios ont été calculés en fonction des surfaces déclarées sur le logiciel d'assolement (Bringel).

Si les rendements apparaissent plus faibles, il est important de rappeler qu'ils sont maximisés notamment par l'atelier transformation qui permet de valoriser les fruits abîmés, ainsi que les légumes d'automne invendus.

4.3. Évaluation de la régulation naturelle des ravageurs : service de prédation

L'analyse statistique pluriannuelle (Tableau 4) de comparaison des 4 systèmes à faible IFT montre que les vergers maraîchers ne fournissent pas un service de prédation plus élevé que les monocultures. Les analyses effectuées par année (tableau 4) pour l'intensité de prédation des œufs sentinelles montrent quelques preuves d'un avantage de l'agroforesterie : avec en 2020 une prédation plus haute dans les légumes en VM que dans les légumes en culture pure et en 2022 une prédation dans les fruitiers en VM plus haute que dans les fruitiers seuls. Les faibles différences entre systèmes agroforestiers et système de référence en culture pure peuvent s'expliquer par le fait que les vergers et les parcelles de légumes considérés comme cultures pures dans notre étude ont des pratiques très favorables à la régulation naturelle (pas ou très peu de traitements, habitats semi-naturels très présents, etc.)

Tableau 4 : Résumé des analyses statistiques pluriannuelles 2019-2022 (modèles linéaires mixtes) pour 6 indicateurs de service de prédation suivis dans 4 types de système de culture.

Indicateur de prédation	Fruitiers en culture pure				Fruitiers en VM				Légumes en culture pure				Légumes en VM				AIC	R² du model (R² du système)
	moy.	±	et	group	moy.	±	et	group	moy.	±	et	group	moy.	±	et	group		
Chenille en pâte à modeler																		
Fréquence	6,07	±	1,65	a	9,22	±	1,61	a	8,17	±	1,68	a	9	±	1,61	a	967	0,43 (0,04)
Intensité par les oiseaux	4,64	±	0,61	ab	3,51	±	0,59	a	6,4	±	0,75	b	5,33	±	0,6	b	1929	0,71 (0,29)
Intensité par les arthropodes	3,62	±	0,83	ab	2,61	±	0,83	a	2,86		0,86	ab	2,83	±	0,83	b	6887	0,97 (0,03)
Richesse	0,91	±	0,38	ab	1,24	±	0,39	a	0,83	±	0,39	ab	0,87	±	0,38	b	916	0,39 (0,02)
Œufs sentinelles																		
Fréquence	0,81	±	0,18	b	0,55	±	0,17	ab	0,52	±	0,17	ab	0,39	±	0,15	a	2047	0,19 (0,02)
Intensité	2,18	±	0,46	b	1,83	±	0,45	b	2,05	±	0,46	ab	1,66	±	0,45	a	2592	0,95 (0,03)

Tableau 5 : Résumé des analyses statistiques annuelles (modèles linéaires mixtes) pour l'intensité de prédation des œufs sentinelles suivis dans 4 types de système de culture.

Année	Fruitiers en culture pure				Fruitiers en VM				Légumes en culture pure				Légumes en VM				AIC	R ² du modèle (R ² du système)
	moy.	±	et	group	moy.	±	et	group	moy.	±	et	group	moy.	±	et	group		



2019	3,52 ± 0,49	a	2,91 ± 0,47	a	4,04 ± 0,65	a	3,13 ± 0,47	a	632	0,86 (0,11)
2020	1,08 ± 0,14	ab	0,99 ± 0,11	a	1,53 ± 0,14	b	0,87 ± 0,66	a	545	0,68 (0,40)
2021	1,73 ± 0,42	ab	1,8 ± 0,4	b	1,61 ± 0,42	ab	1,37 ± 0,4	a	655	0,94 (0,04)
2022	2,09 ± 0,21	b	1,63 ± 0,19	a	1,44 ± 0,21	a	1,49 ± 0,19	a	674	0,78 (0,21)

En ce qui concerne notre hypothèse sur les différences de prédation dans les cultures maraîchères, nos résultats montrent que les services de prédation sur les chenilles en pâte à modeler sont plus importants dans les arbres fruitiers que dans les cultures maraîchères. Inversement, les services de prédation sur les œufs de papillons sentinelles sont plus importants dans les cultures maraîchères que dans les arbres fruitiers. Comme le souligne le R-carré plus élevé du modèle statistique sur l'intensité de prédation des chenilles par les oiseaux, il semble que les oiseaux jouent un rôle important dans la prédation des arbres fruitiers, peut-être sous-estimé dans les vergers mais souligné ici par l'association avec une culture annuelle.

4.4. Performance environnementale : GES

L'empreinte carbone de la ferme est en moyenne de 24,4 t.eq.CO₂, les émissions nettes sont en moyenne à 13,5 t.eq.CO₂ pour un stockage moyen de 11 t.eq.CO₂. Les experts invitent à la prudence quant à des comparaisons des émissions entre fermes car les variations sont très importantes entre sites. Pour donner un ordre de grandeur, l'empreinte carbone moyenne d'un habitant en France en 2021 est de 8,9 t.eq.CO₂.

Actuellement, le premier poste d'influence du bilan carbone est l'apport de matière organique (MO) dû notamment au compostage de déchets verts (66 à 86 % du bilan). Il affecte le bilan climat car il tient compte des émissions liées au processus de fabrication (émissions d'ammoniac et de protoxyde d'azote lors du compostage de la matière et carburant utilisé pour retourner le compost ou pour broyer les déchets verts). Il affecte également le bilan énergie qui tient compte du carburant utilisé pour la manutention et le transport de la MO. Le second poste du bilan climat est le carburant (6 à 25 % du bilan), tandis que celui du bilan énergie est l'électricité.

Le stockage de carbone est très conséquent sur la ferme, il s'explique par la présence du réseau important de haies, du verger et de son enherbement permanent, et de la surface assolée en couverts végétaux. Ces pratiques de stockage viennent compenser en partie les émissions de GES liées aux apports très importants de MO. L'outil de diagnostic a fait un choix méthodologique de calcul qui ne prend pas en compte l'impact positif des apports de broyat de végétaux dans le calcul du stockage du carbone, et les quantités apportées suggèrent un stockage de carbone plus important que celui énoncé.

5. Conclusion

La ferme pilote de la Durette est une exploitation hautement diversifiée avec plus de 40 espèces/types de fruits et légumes commercialisés par an, provenant du verger-maraîcher et de cultures sous abris. Son analyse économique montre qu'il s'agit d'un système viable qui repose sur des produits issus principalement de la vente de légumes (80 %). Il permet la rémunération de 4 exploitants à hauteur du SMIC mensuel pour 42h de travail hebdomadaire en moyenne. L'exploitation de la ferme par un collectif semble être nécessaire pour une gestion optimale des cultures à ce haut niveau de diversification. Dans d'autres vergers-maraîchers, gérés par des personnes seules, les fruitiers sont implantés pour d'autres services que celui de production (micro-climat, biodiversité, paysage, etc.). Les IFT des productions de légumes et fruits du verger-maraîcher sont plus faibles que les références connues. Cependant, la



production commercialisée de légumes est légèrement inférieure aux références et les productions en fruits nettement inférieures. Ce sont les productions en fruits à pépins qui sont les moins performantes avec notamment des densités de plantation trop faibles et une pression forte en carpocapse dans le secteur. Concernant le service de prédation par la biodiversité fonctionnelle, nous constatons des différences ponctuelles par rapport à des systèmes peu diversifiés à niveau d'IFT comparables.

Les évaluations et les retours d'expériences sur le verger-maraîcher de la ferme pilote de Durette permettent d'identifier des voies pour améliorer la performance de ces systèmes agroforestiers, comme la conduite des arbres fruitiers (palissage, densité), le choix des espèces cultivées (porte-greffe, pollinisateur), l'orientation des lignes de cultures.

Les études à l'échelle du système entier (verger-maraîcher et cultures sous-abris) ont démontré leur intérêt pour appréhender ces systèmes pionniers et complexes. Les futurs projets pourront s'intéresser plus finement à des processus au sein de ces systèmes pour optimiser la conception et la conduite de ces modèles agroforestiers à base de fruits et légumes.

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

François WARLOP : <https://orcid.org/0000-0002-3574-4339>

Maxime JACQUOT : <https://orcid.org/0000-0002-7093-3688>

Contributions des auteurs

C. Gaspari, F. Warlop, M. Jacquot, J. Delhommel ont contribué à la rédaction de l'article. M. Veis-Barcelli, J. Frezel, J. Ronzon, M. Catalogna ont contribué à la relecture de l'article. Tous les auteurs et autrices ont lu et approuvé le manuscrit final.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs ne déclarent aucun lien d'intérêt.

Remerciements

Les partenaires du projet remercient le Ministère de l'Agriculture et l'Agence Française de la Biodiversité (AFB) pour le soutien financier alloué, et tout particulièrement Cathy Eckert, Emeric Emonet, Gabrielle Galipaud et Baptiste Labeyrie, membres actifs de la CAN DEPHY pour leur présence, leur soutien et leur accompagnement. Nous remercions les membres du comité scientifique pour leurs précieux conseils. Nous remercions chaleureusement les stagiaires qui ont contribué à l'acquisition des données sur les deux sites, sans oublier les producteurs de la ferme pilote sans lesquels rien ne serait possible : Julien Ronzon, Maxime Catalogna, Julia Frezel et Sara Bosshardt.



Déclaration de soutien financier

Le projet Empusa a reçu le soutien financier du Ministère de l'Agriculture (projet Ecophyto Expé 2018-2024).

Références bibliographiques

Agreste 2020a. Enquêtes sur les pratiques culturales

Castel L., Plessix S., Gaspari C., Warlop F., Fourrié L., Montrognon Y., Ronzon J., Labeyrie B., Ray T., Cadet D., Arlaud C., Paut R., Tchamitchian M., Bouvier JC., Jammes D., Filleron E., Sieffert A. et Fanguède A., 2019 - Concevoir et expérimenter des vergers agroforestiers en Agriculture Biologique (VERTiCAL). *Innovations Agronomiques* 76, 273-289. <https://doi.org/10.15454/5zao4b>

[Grab, 2018, Deux systèmes agroforestiers conçus pour réduire la dépendance aux intrants, https://www.grab.fr/durette/](https://www.grab.fr/durette/)

Jacquot, M., Boiron, L., Warlop, F. (2024). How about biological control in market gardening agroforestry? Proceedings of the 21st International Conference on Organic Fruit-Growing, Filderstadt 2024.02.19-21. Ed. FOEKO e.V. 2024: 128-131

Paut, R., Sabatier, R., Dufils, A., Tchamitchian, M. (2021). How to reconcile short-term and long-term objectives in mixed farms? A dynamic model application to mixed fruit tree - vegetable systems. *Agricultural Systems*, 187

Rey F., Coulombel A., Melliand M.L., Jonis M., Leclerc B., Argouarc'h J., Conseil M., 2017. Guide Technique ITAB Produire des légumes biologiques, 320 pages

Vialatte A., Martinet V., Tibi A. (coord.) et al. (2022) Augmenter la diversité végétale des espaces agricoles pour favoriser la régulation naturelle des bioagresseurs et protéger les cultures. Rapport scientifique d'ESCo – INRAE (France). [DOI : 10.17180/q7wm-q442]

Warlop F., Corroyer N., Denis A., Conseil M., Fourrié L., Duha G., Buchmann C., Lafon A., Servan G., 2017. Associer légumes et arbres fruitiers en agroforesterie : Principes, éléments techniques et points de vigilance pour concevoir et conduire sa parcelle. Projet SMART. 40 pages. Juin 2017.

Projets associés au suivi de la multi-performance

Almanac, 2023-2025, <https://almanac.projet-agroforesterie.net/>

CASDAR MMBIO. https://rd-agri.fr/detail/PROJET/casdar_projet_18aip066

Empusa, 2019 – 2024, <https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/projet-empusa>

SMART, 2013-2015, <https://www.grab.fr/projet-smart/>

Vertical, 2012-2018, <https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/projet-vertical>

Pour citer cet article : Chloé Gaspari, François Warlop, Maxime Jacquot, Mathilde Veis Barcelli, Julia Frezel, et al.. Évaluation de la Multi-Performance en Systèmes Agroforestiers de type verger-maraîcher. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.1-14. [10.17180/ciag-2026-vol109-art01](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Concilier fertilité, autonomie et travail en maraîchage biologique : expérimentation de systèmes de cultures innovants - projet PERSYST

Kevin MOREL¹, Suzanne PELOIS², Andrea ADAMKO-SEVESTRE³, Victoire BARILLET⁴,
Clémentine FAYOL²

¹ UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 22 place de l'agronomie, F-91 120 Palaiseau, France

² FRAB – Fédération Régionale des Agrobiologistes de Bretagne, 29 avenue des peupliers, 35110 Cesson-Sévigné

³ Grab, Plateforme d'expérimentation AwenBio, Lycée Agricole Public de Suscinio, 29600 Morlaix, 29 avenue des peupliers, 35110 Cesson-Sévigné

Correspondance : kevin.morel@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art02>

Résumé

Nous avons évalué pendant 4 ans des systèmes de culture innovants en maraîchage biologique dans l'Ouest de la France combinant différentes modalités de réduction de travail du sol et d'apports de matières végétales exogènes en complément de couverts végétaux. Nos résultats suggèrent que des apports végétaux exogènes peuvent se substituer aux engrais organiques du commerce ou aux fertilisants d'origine animale pour maintenir ou améliorer la fertilité des sols et assurer des rendements identiques mais peuvent impacter négativement les conditions de travail, en particulier sans équipement adapté. Le travail du sol limité (sans labour) n'a pas d'impact significatif sur la fertilité, le rendement ou le travail. Le travail du sol très limité a des impacts contrastés en fonction des contextes et des conditions initiales.

Mots-clés : Maraîchage ; Agriculture Biologique ; Conservation des sols ; Matière organique ; Temps de travail ; Pénibilité du travail

Abstract: Balancing fertility, autonomy and work in organic market gardening: experimenting with innovative cropping systems – PERSYST project

Over a four-year period, we evaluated innovative cropping systems for diversified organic vegetable production in Western France, combining contrasting approaches to soil tillage reduction and fertilization based on exogenous plant biomass, in addition to cover crops. Our findings demonstrate that exogenous plant biomass can effectively replace conventional organic fertilizers or animal manure to maintain or enhance soil fertility while ensuring comparable yields. However, it may negatively affect labor conditions, particularly when equipment is not properly adapted. Reduced soil tillage (without plowing) had no significant impact on soil fertility, yield, or labor. The effects of no-tillage were context-dependent, varying according to initial conditions and specific contexts.

Keywords: Vegetable production; Organic farming; Soil conservation; Organic Matter; Working time; Labor arduousness

1. Introduction

Le maraîchage, qui se distingue par la production d'une large gamme de légumes en plein champ ou sous abri avec des rotations courtes et une surface relativement restreinte (souvent moins de 10ha), fait néanmoins face à de nombreux défis. Ce type de production nécessite une optimisation des surfaces



de production, une maîtrise et des moyens techniques poussés ainsi qu'une mobilisation de main d'œuvre importante. En agriculture biologique, le non-recours aux produits phytosanitaires de synthèse peut augmenter le nombre d'interventions mécaniques ou manuelles et pose des enjeux forts de charge et de pénibilité du travail (Dumont, 2017). La grande diversification des cultures sur des surfaces réduites amène les maraîchers à avoir recours à des pratiques intensives d'utilisation du sol, avec un nombre important d'interventions de travail du sol et des apports réguliers de fertilisants organiques, plus ou moins rapidement dégradés. Ces pratiques présentent des risques de diminution de la fertilité du sol à court et moyen terme, d'une augmentation de la sensibilité des plantes aux bioagresseurs et d'une dégradation agronomique, sociale et économique plus globale des systèmes (Thibault et Lecompte, 2018). De plus, de nombreux maraîchers biologiques souhaitent gagner en autonomie par rapport aux engrais organiques industriels ou aux fertilisants d'origine animale, en particulier dans des contextes où le développement de la méthanisation peut créer des concurrences sur l'accès au fumier et au lisier. L'objectif du projet PERSYST-Maraîchage⁴ (Ecophyto II+, DEPHY) était de co-concevoir, d'expérimenter et d'évaluer des systèmes de culture (SDC) innovants en maraîchage biologique combinant différents leviers (travail du sol, apports de matières végétales, intégration de couverts) visant à (i) améliorer la fertilité des sols en postulant qu'elle contribue à la santé des plantes, (ii) favoriser l'autonomie vis-à-vis des engrais organiques industriels et des fertilisants d'origine animale, (iii) maîtriser la charge de travail et la pénibilité physique et mentale. Une version plus détaillée de cet article est consultable sur <https://hal.inrae.fr/hal-05031252>.

2. Dispositif expérimental et collecte de données

2.1. Le projet PERSYST-Maraîchage : une combinaison de deux types d'essai-système

Cette recherche a été conduite dans le cadre du projet DEPHY Expe PERSYST-maraîchage (2019-2024) regroupant la Fédération Régionale des Agrobiologistes de Bretagne (FRAB), les Groupements d'Agriculture Biologique (GAB) de ce réseau à l'échelle départementale (pour les 4 départements bretons et la Loire Atlantique), le Groupe de Recherche en Agriculture Biologique (Plateforme expérimentale AwenBio) et INRAE. Une traque aux innovations préliminaire (Le Cam, 2019) a servi de base à la mise en place d'un double dispositif du printemps 2020 au printemps 2024 (4 années de culture) visant à répondre à notre question de recherche en combinant deux types d'essai-système : (i) une **expérimentation système en station** comparant un système de culture (SDC) de référence (témoin) à deux SDC innovants avec des règles de décision formalisées pour chaque système avec des ajustements possibles chaque année (SDC1 et SDC2) (ii) un « **observatoire piloté** » (OP) constitué d'essais de système de culture innovant, sans témoin, en conditions réelles sur 10 fermes maraîchères professionnelles et dont les règles de décision ne sont pas figées car pouvant évoluer chaque année en fonction de l'apprentissage des maraîchers.

2.2. La station

La station Awen Bio se situe près de Morlaix (coordonnées GPS 48.613087, -3.838578) dans la zone légumière du Finistère Nord en climat océanique. La structure du sol est limoneuse avec un taux de matière organique au démarrage du projet de 3,3%. Les systèmes expérimentaux ont été co-conçus par les maraîchers de l'OP, les techniciens et les scientifiques du projet, en combinant de manière cohérente les pratiques innovantes recensées dans la traque aux innovations. Les participants ont fait le choix de suivre une même rotation pour les trois systèmes de cultures (**Tableau 1**) qui est une rotation légumière type en plein champ dans la région : carotte/chou/pomme de terre/courge/oignon.

⁴ <https://www.agrobio-bretagne.org/persyst-maraichage/>



Le SDC de référence (SDCref) est représentatif des pratiques courantes en système de production biologique de légumes dans la région avec un labour à 30-35 cm, un apport de fumier systématique chaque année. **Le SDC1** avait pour objectif d'entretenir la fertilité du sol sans apport de fumier à partir d'apports verts d'herbe fraîche broyée et un travail du sol limité (inférieur à 20 cm sans utilisation d'outils animés). **Le SDC2** s'inspire de l'approche de « maraîchage sur sol vivant » (MSV). En maraîchage biologique, cette approche promeut la combinaison du non-travail du sol, sa couverture permanente et des apports exogènes de matières organiques⁵. Très médiatisée, cette démarche suscite un fort engouement mais également des questionnements dans le secteur du maraîchage. Le parti pris du SDC2 est d'expérimenter une version extrême du MSV avec un non-travail du sol strict et un entretien de la fertilité par des apports massifs de matière carbonée (ici du compost de déchets verts). Les trois systèmes visaient à maximiser les couverts végétaux entre les cultures. Les détails des itinéraires techniques pour les trois systèmes ainsi que les règles de décision adoptées sont consultables sur <https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/site-awen-bio-persyst-maraichage>.

Tableau 1 : Caractéristiques des trois systèmes de culture expérimentés sur la station.

Système	Travail du sol	Apports végétaux extérieurs (t de matière sèche/ha)	Autres sources de fertilisants (t de matière brute/ha)	Gestion des adventices	Destruction des couverts
SDCref	Classique	Aucun	Toutes les années : Fumier de bovin (20) avant toutes les cultures	Paillage plastique ; Mécanisation pour faux-semis, binage et buttage ; Désherbage manuel	Broyés et enfouis.
SDC1	Limité	Toutes les années : Apports d'herbe broyée incorporée au vibroculteur avant chou (12) et courge (12).	Aucun	Paillage plastique ; Mécanisation pour faux-semis, binage et buttage ; Désherbage manuel	Broyés et enfouis.
SDC2	Aucun	En année 1 seulement : Compost de déchets verts enfoui (116) pour toutes les cultures. Toutes les années : Compost de déchets verts en surface avant carotte (173) ; Paille sur oignon (18) et pomme de terre (18).	En année 1 seulement : Fumier de bovin (20) avant toutes les cultures	Paillage plastique ; Paillage végétal (foin, paille, compost) ; Désherbage manuel	Broyés, parfois roulés et laissés en surface.

Le dispositif expérimental est composé de 15 micro-parcelles de 180 m² chacune. Chaque légume a été implanté chaque année pour les 3 SDC de 2020 à 2023, soit 4 répétitions temporelles. Avant l'expérimentation, la parcelle expérimentale était en prairie depuis 2 ans. La prairie a été cassée avec un passage de chisel puis les micro-parcelles ont été travaillées selon la logique de chaque SDC (donc avec un labour uniquement pour SDCref).

2.3. L'observatoire piloté (OP)

A partir de la traque aux innovations initiales, les techniciens maraîchage du réseau FRAB de chaque département impliqué ont sélectionné deux fermes maraîchères biologiques qui avaient déjà mis en place des pratiques innovantes de gestion de la fertilité ou qui étaient en train d'y réfléchir (Tableau 2).

⁵ <https://www.maraichagesolvivant.fr/>



Les fermes de l'OP présentent un taux élevé de matière organique de départ en 2020 (moyenne de 4.5%) avec une diversité de textures de sol. Ces fermes sont menées par des maraîchers expérimentés avec entre 8 et 25 ans d'activité (12 en médiane) au démarrage du projet. Il est à noter que les 4 fermes avec un travail du sol très limité, se revendiquant d'approches de MSV, avaient commencé à expérimenter ces pratiques innovantes plusieurs années avant le projet là où les innovations testées par les autres fermes ont démarré avec le projet.

Tous les SDC de l'OP ont pour point commun d'intégrer des couverts végétaux entre les cultures. En écho à la station, les SDC de l'OP, en plein champ ou sous abri froid, se distinguent par une diversité de combinaisons en termes de (i) modalités de travail du sol (TS) : classique (travail du sol profond et outils lourds comme la charrue), limité (travail du sol superficiel sans labour), très limité (absence de travail du sol avec très occasionnellement du travail du sol limité si besoin), (ii) de présence ou non d'apports végétaux exogènes à la parcelle cultivée (AV), (iii) de présence ou non d'autres sources de fertilité (AF).

Chaque année les légumes intégrés dans les SDC innovants variaient dans une logique de rotation propre à chaque ferme avec 3 à 7 cycles de cultures suivis par ferme sur les 4 années (Tableau 2). Au total, 47 cycles de culture ont ainsi été suivis avec 18 légumes représentés. Le détail des successions de culture pour chaque ferme est détaillé sur la page Ecophytopic dont le lien a été donné dans le Tableau 2.

2.4. Collecte et analyse des données

Pour évaluer les impacts des SDC innovants expérimentés en station et dans l'OP sur différentes dimensions de leur durabilité (fertilité du sol, production, travail, santé des plantes), des indicateurs quantitatifs ont été mesurés via différentes méthodes (**Tableau 3**). Lors des ateliers de co-conception, les différents participants ont défini trois dimensions de la fertilité : physique (suivie par les indicateurs de structure et de stabilité du sol), biologique (suivie par le taux de matière organique et la biomasse microbienne), chimique (suivie par les teneurs en différents éléments jouant un rôle dans la nutrition des plantes). En station, les températures du sol à 10 cm de profondeur ont été mesurées régulièrement en 2020 et 2023 pendant la saison de culture avec un thermomètre.

Tableau 2 : Caractéristiques des 10 fermes de l'observatoire piloté et des systèmes de culture testés.

Ferme*	SAU en légumes (ha)	Structure de sol	MO en 2020 (%)	Surface expé (m2)	Mode de production	Nb cultures**	Travail du sol (TS)	Apports végétaux exogènes (AV) ***	Autres sources de fertilité (AF)***
22 (1)	2,5	Limono-sableux	4,2	60	Plein champ	5	Limité	Foin (1 ;17) et paille (1 ;30)	Fumier bovin/volaille (1 ;20)
22 (2)	14	Limono-sableux	4,1	60	Plein champ	4	Classique	Ensilage d'herbe (1 ;8) et herbe fraîche (2 ;8)	Fumier volaille (1 ;10)
29 (1)	1	Limoneux	4,6	60	Abri	4	Limité	Herbe fraîche (2 ;104)	Fumier d'âne (2 ; NA) et engrais organique (1 ; NA)



29 (2)	5	Limoneux	5	1800	Plein champ	3	Très limité	Bois raméal fragmenté (1 ;108) et herbe fraîche (1 ;160)	non
35 (1)	2,55	Limoneux	3,7	144	Plein champ	3/1	Très limité	non	non
35 (2)	1,1	Limoneux	2,9	180	Plein champ	4/2	Classique	non	non
44 (1)	2,5	Limono-sableux	6,6	45	Abri	6	Très limité	non	Engrais organiques NPK 4,5-2-1 (2 ;5,6) et 2-2,5-3 (1 ;2,2)
44 (2)	1,32	Sableux	2,6	450	Plein champ	4	Limité	Foin (3 ;68)	non
56 (1)	11,8	Limono-sableux	6,5	576	Plein champ	4	Classique	non	Sulfate de potassium (3 ;0,6)
56 (2)	1,65	Sablo-limoneux	5,1	51	Abri	7	Très limité	Enrubannage de luzerne (6 ;160) et foin (1 ;20)	non

* Code utilisé pour accéder au détail des pratiques sur <https://ecophytopic.fr/dephy/conception-de-systeme-de-culture/projet-persyst-maraichage> (Menus « Description site » et « Système Dephy »)** Nombre de cycles de culture suivis sur les 4 ans du projet (le premier chiffre correspond au nombre de légumes et le chiffre après le signe / au nombre d'années en prairie.

***Entre parenthèses sont indiquées d'abord le nombre d'apports puis la quantité cumulée apportée sur la durée de l'expérimentation (2020-2023) en tonnes de matière sèche par hectare pour AV et en tonnes de matière brute par hectare pour AF. Les couleurs utilisées dans les trois dernières colonnes ont pour objectif de faciliter la visualisation des modalités de pratiques dont l'effet a été testé par la suite. Pour TS, le dégradé de marron est lié à l'intensité du travail du sol : Très limité (marron foncé), Limité (marron intermédiaire), Classique (clair). Pour AV, la couleur verte indique que des apports végétaux exogènes ont été réalisés (AV_oui) et l'absence de couleur non réalisés (AV_non). Pour AF, la couleur grise indique que des apports d'autres sources de fertilité ont été réalisés (AF_oui) et l'absence de couleur non réalisés (AF_non).

Les participants ont également considéré qu'*in fine*, la fertilité du sol se reflétait dans la capacité du SDC à produire, et donc que le rendement était une mesure indirecte de la fertilité. Les rendements commercialisables ont été mesurés pour toutes les cultures suivies. Etant donné la diversité des légumes suivis, des rendements relatifs (Rdt_rel) ont été calculés en rapportant les rendements aux rendements de référence pour chaque légume en conditions d'agriculture biologique dans l'Ouest de la France. Ces rendements moyens (indépendants de l'année) sont détaillés dans l'Annexe 1 de la version longue de cet article⁶. Pour chaque cycle de culture, les temps de travail par opération et Indices de Fréquence des Traitements (IFT) ont également été enregistrés.

Tableau 3 : Indicateurs quantitatifs mesurés en station et sur l'OP.

Indicateur	Détail	Unité	Méthode et fréquence de mesure
Structure_P	Qualité structurale du sol au printemps (P)	Note de 0 à 34 (<10 : mauvais ; 10 à 25 : moyen ; >25 :	« Drop-Test » aboutissant à une note pondérée à partir de 8 observations du sol ⁷ chaque année

⁶ <https://hal.inrae.fr/hal-05031252>

⁷ Version française présentée ici : https://agriressources.fr/fileadmin/user_upload/Auvergne-Rhone-Alpes/177_Eve-agriressources/fertisols/RESSOURCES/Diagnostic/EU_Le_drop_test_guide.pdf Travail inspiré par <https://www.vaderstad.com/globalassets/united-kingdom/vsa/vsa-guide.pdf>



Structure_A	et à l'automne (A)	satisfaisant)	
Stabilité_P	Stabilité structurale du sol au printemps (P) et à l'automne (A)	Note de 1 (peu stable) à 6 (très stable)	« Slake-Test » basé sur la capacité des mottes de sol à résister à un temps de trempage dans l'eau ⁸ chaque année
Stabilité_A			
MO	Matière organique du sol	%	Analyses de sol classiques réalisées par des laboratoires spécialisés chaque année au printemps, avant enfouissement des couverts végétaux ou apport végétal de l'année.
BM	Biomasse microbienne du sol	mgC/kg	
Cmin	Potentiel de minéralisation du carbone du sol	mgC/kg/28j	
Nmin	Potentiel de minéralisation de l'azote du sol	mgN/kg/28j	
P2O5 (Olsen)	Teneur de l'élément dans le sol	mg/kg	
K2O		mg/kg	
MgO		mg/kg	
CaO		g/kg	
Rendement	Rendement commercialisable	kg, pièce ou botte/m ²	Sur la station : moyenne réalisée à partir d'un échantillonnage de 4 placettes par légume et système. Sur OP : rendement total de la parcelle ou échantillonnage.
Rdt_rel	Rendement relatif	Ratio	Ratio entre le rendement mesuré et le rendement bio de référence dans la région pour le légume considéré.
Temps de travail	Pour les différentes opérations culturales en intégrant attelage des outils.	h/ha	Enregistrement tout au long des cultures (intégrant les actions manuelles et mécanisées). Si plusieurs personnes travaillaient, le temps considéré est multiplié par le nombre de personnes.
IFT	Indice de Fréquence des Traitements phytosanitaires	Ratio	Nombre de doses de référence des produits phytosanitaires utilisés par culture ⁹

Pour la station, la satisfaction qualitative de l'expérimentatrice (de 1 : très faible à 5 : très forte) a été enregistrée après chaque culture pour chaque SDC pour les paramètres suivants : qualité de la récolte, pénibilité physique, charge de travail, pression en adventices, pression en maladies et ravageurs, satisfaction globale. Pour l'OP, pour chaque culture, les maraîchers ont caractérisé qualitativement l'évolution perçue (Plus ; Moins ; Equivalent) par rapport à leurs pratiques de référence avant le démarrage de l'expérimentation pour les paramètres suivants : charge de travail, pénibilité physique, charge mentale, pics de travail, rendement, qualité de la récolte, rentabilité économique, qualité du sol, pression en ravageurs, en maladies et en adventices. Pour la culture, la satisfaction globale (Totale ; Partielle ; Non) était également collectée. Les indicateurs quantitatifs et qualitatifs relevés étaient compilés et discutés chaque année lors d'entretiens annuels menés par les techniciens du réseau GAB-FRAB et/ou un chercheur INRAE. Un entretien final de bilan global a également été mené au printemps

⁸ Test réalisé avec le kit ABSol© sur des mottes de sol de 4-5 cm de diamètre plongées dans l'eau. La note correspond au nombre de minutes pendant lesquelles la motte a résisté au trempage (de 1 : moins d'1 minute ; à 6 : plus de 5 minutes).

⁹ <https://alim.agriculture.gouv.fr/ift/>



2024. Lors de ces entretiens, l'expérimentatrice et les maraîchers étaient aussi invités à parler du contexte de l'année, du déroulé et des résultats des pratiques expérimentées, des apprentissages réalisés ainsi que des points de vigilance et perspectives associés. Ces propos, ainsi que les discussions entre maraîchers, techniciens, expérimentatrice lors des portes ouvertes de ferme ou de la station pendant le projet, ont fait l'objet de prise de notes pour une analyse qualitative. Il est à noter que sur la station et l'OP, la pénibilité physique était évaluée globalement pour le cycle de culture et n'intégrait donc qu'indirectement la part de travail manuel et mécanique sur la culture.

Les analyses statistiques ont été réalisées sous R. Pour les indicateurs quantitatifs, la corrélation avec les pratiques innovantes a été évaluée par une ANOVA et test post-hoc de Tukey si les conditions d'analyse de la variance étaient validées, avec un test de Kruskal-Wallis suivi d'un test post-hoc de Dunn sinon. Pour les indicateurs qualitatifs, leur corrélation avec les pratiques innovantes a été évaluée par des tests de Chi2. Le détail des différents tests statistiques et fonctions utilisées est accessible dans la version longue de l'article¹⁰) Pour l'analyse des indicateurs quantitatifs, les valeurs absolues ont été considérées pour la station car comparables entre elles (même contexte pédoclimatique). Pour intégrer la diversité des contextes de l'OP, l'analyse a été effectuée sur les variations des indicateurs par rapport à la valeur initiale mesurée dans chaque ferme (valeurs relatives) sauf pour les rendements qui étaient rapportés à la référence régionale en bio (Rdt_rel). Dans cet article, **nous présentons l'effet moyen des pratiques innovantes des différents SDC sur la durée du projet**. L'effet de l'année est considéré comme une source de variabilité non expliquée impactée par exemple par les conditions climatiques (température, humidité). Dans la même optique, l'effet de chaque légume n'est pas intégré dans les différentes analyses à l'exception des rendements obtenus sur la station qui seront détaillés par légume.

3. Résultats et discussions

3.1. Résultats de la station

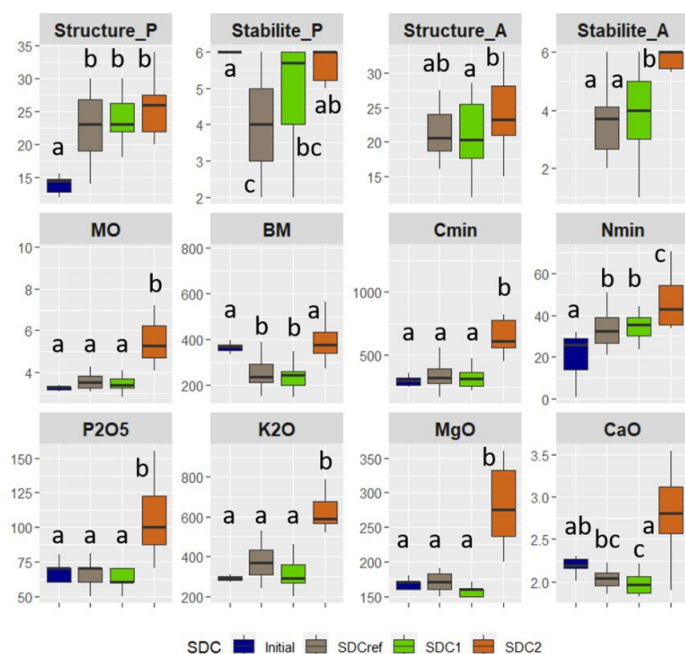


Figure 1 : Effet des trois systèmes expérimentés en station sur les indicateurs de sol. Les lettres indiquent des différences significatives (p -value=0,05) entre les groupes. Les valeurs d'état initial correspondent aux mesures réalisées au printemps 2020 avant la mise en place des systèmes. Les valeurs pour SDCref, SDC1 et SDC2 intègrent toutes les mesures réalisées après la mise en place des systèmes, de l'automne 2020 au printemps 2024. Pour Structure_A et Stabilité_A, il n'y a pas d'état initial puisque ces indicateurs ont été mesurés pour la première fois à l'automne 2020 après une première saison de culture. La description et les unités des indicateurs de sol sont présentées dans le Tableau 3.

¹⁰ <https://hal.inrae.fr/hal-05031252>



Globalement, **les pratiques de non travail du sol et les apports massifs de compost du SDC2 sont associées à des meilleures performances par rapport à la plupart des indicateurs de fertilité du sol** (Figure 1). En effet, SDC2 montre une augmentation significative par rapport à SDC1 et SDCref des indicateurs de fertilité à la fois physique, chimique et biologique suivants : Stabilité_A, MO, BM, Cmin, Nmin, P2O5, K2O, MgO, CaO. Par rapport à l'état initial, SDC1 et SDCref voient leur valeur de Stabilité_P, BM et CaO diminuer alors que SDC2 maintient le niveau initial. Par rapport à l'état initial, les trois SDC améliorent Structure_P mais il n'y a pas de différence significative entre les 3 SDC. **Les pratiques du travail du sol limité et d'apports d'herbe fraîche du SDC1 ne montrent aucune différence significative par rapport au SDCref combinant un travail du sol classique et des apports de fumier.**

En termes de rendement, SDC2 montrent en revanche des performances globalement inférieures à SDCref et SDC1 alors que SDC1 montre des performances équivalentes à SDCref (Figure 2). Bien que les indicateurs de sols soient meilleurs pour SDC2, les moins bons rendements de ce système sont expliqués par différents facteurs : (i) **une plus forte pression en adventices** perçue par l'expérimentatrice associée à l'arrêt du travail du sol, l'utilisation de paillage organique, la non-utilisation de désherbage mécanique (hors brûlage de carotte), et la difficulté de plaquer les bâches plastiques au sol en présence de résidus de culture importants pour SDC2. A cet égard, SDC2 ne montre pas de différence de rendement par rapport aux autres systèmes pour les deux légumes pour lesquels la gestion des adventices a été jugée satisfaisante : la carotte et la courge. Dans SDC2, la carotte était semée dans une couche de compost de 15-20 cm, ce qui permettait une germination et un développement en-dehors de la concurrence des adventices du sol. La courge sur toile tissée avec un développement végétatif rapide limitait également la concurrence avec les adventices pour les 3 SDC ; (ii) **un réchauffement du sol moins rapide au printemps** lié au non travail du sol et à l'effet isolant des résidus de culture ou paillage¹¹ ; (iii) **un tassement du sol plus important** : le sol de la station a une tendance naturelle au tassement et en 2022, un tassement du sol en profondeur a été noté pour les trois SDC. Il a été choisi de passer la décompacteuse sur SDCref et SDC1 mais pas sur SDC2 pour être cohérent avec l'approche stricte de non travail du sol. Ce tassement profond ne transparaît pas dans la note de structure du Drop-Test qui analyse les 30-40 premiers cm du sol ; (iv) **une implantation plus difficile des cultures** dans les résidus des couverts broyés mais non enfouis.

Pour l'oignon, les rendements des trois SDC sont inférieurs à la référence car la variété utilisée (Sturon) était une variété population peu productive. Cette variété a été choisie car c'était la seule variété disponible à la fois en graines (pour SDCref et SDC1) et en bulbilles (SDC2). En effet, dans le SDC2, les oignons étaient implantés en bulbilles pour favoriser leur démarrage dans un sol non travaillé.

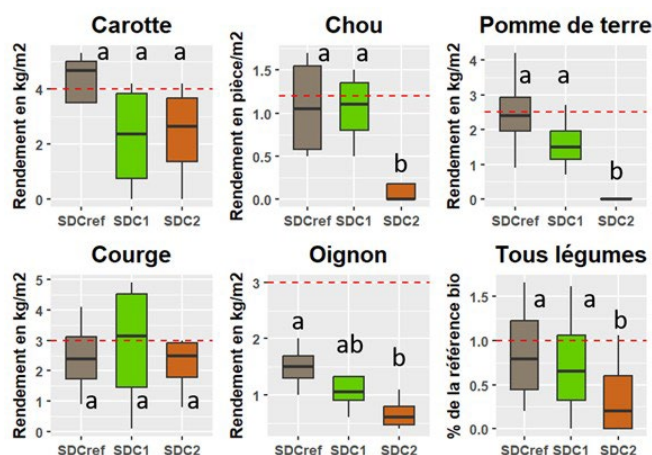


Figure 2 : Effet des trois systèmes expérimentés en station sur les rendements. La ligne rouge pointillée indique le rendement de référence en bio dans la région. Le graphique en bas à droite considère les rendements de tous les légumes ramenés à la référence bio (Rdt_rel) pour ce légume. Les lettres indiquent des différences significatives entre les groupes avec une p-value de 0,05 pour « Tous les légumes » et de 0,1 pour chaque légume individuel (p-value plus haute considérée car moins de points de données).

¹¹ Graphique visible (Figure 4) à <https://hal.inrae.fr/hal-05031252>



Le temps de travail total moyen, de 769h/ha pour SDCref, 804h/ha pour SDC1 et 940h/ha pour SDC2, n'est pas significativement différent selon les SDC (Figure 3). Cependant, ce temps de travail se répartit différemment selon les SDC. De manière cohérente, le SDCref (travail du sol classique) est associé à un temps de travail du sol supérieur au SDC1 (travail du sol limité), lui-même ayant un temps de travail du sol supérieur à SDC2 (non-travail du sol). Pour les autres postes de travail, SDCref et SDC1 sont équivalents en particulier pour le temps moyen dédié aux apports végétaux et de fumier. Un apport d'herbe fraîche dans SDC1 prend plus de temps qu'un apport de fumier (cf. valeurs extrêmes de SDC1 dans cette catégorie) mais les apports de fumier sont réalisés sur chaque culture de la rotation de SDCref alors que les apports d'herbe fraîche concernent uniquement deux cultures de la rotation de SDC1 (chou et courge). **Les apports réguliers de matière végétale (compost, paille et foin) de SDC2 sont associés à un temps de travail supérieur par rapport aux apports de fumier de SDCref.** Cependant SDC2 présente par construction moins de temps de travail lié au désherbage mécanique. **Le temps de travail moyen dédié au désherbage manuel est supérieur pour SDC2 (374h/ha) comparé à SDC1 (277) et SDCref (196).** Du fait de la forte variabilité interannuelle et entre légumes, cette différence n'apparaît pas significative statistiquement mais est ressentie par l'expérimentatrice, expliquant les moindres scores de satisfaction concernant la pénibilité pour SDC2.

Cette plus grande pénibilité perçue pour SDC2 associée à des rendements inférieurs explique que SDC2 présente significativement plus de notes de faible satisfaction globale que SDC1 et SDCref. SDCref présente plus de notes de très haute satisfaction, car c'est un système éprouvé localement, maîtrisé par l'expérimentatrice. Entre les deux systèmes innovants, SDC1 apparaît globalement plus satisfaisant à l'expérimentatrice.

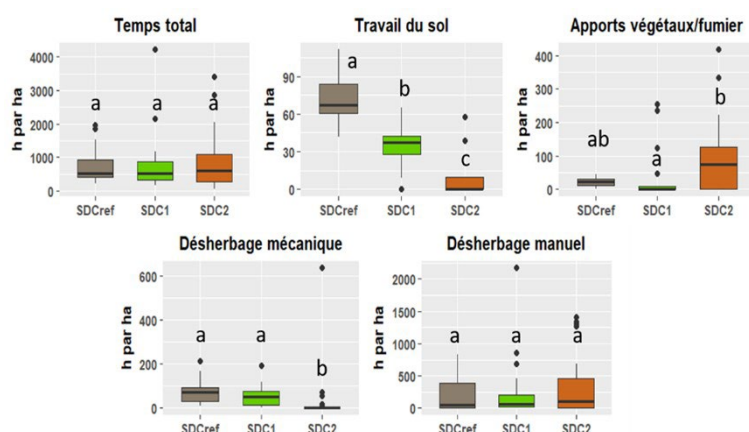


Figure 3 : Temps de travail annuel et pour quelques postes clés pour les trois systèmes expérimentés en station tous légumes confondus. Les graphiques montrent la variabilité interannuelle de 2020 à 2023. Les lettres indiquent des différences significatives entre les groupes avec une p-value de 0,05. Le désherbage mécanique inclut le passage de herse étrille, bineuse, butteuse et brûlage thermique sur carottes.

En termes de pression en bioagresseurs, les notes de satisfaction ne diffèrent pas significativement entre SDC, ce qui est à relier au fait qu'il n'y a aucune différence significative entre les IFT : $0,44 \pm 0,81$ pour SDCref ; $0,72 \pm 0,83$ pour SDC1, $0,71 \pm 0,91$ pour SDC2. De manière qualitative, l'expérimentatrice signale une pression supérieure en limaces sur SDC2 qui s'est traduite par l'utilisation d'anti-limaces sur 4 cycles de cultures, contre 2 sur SDC1 et 0 pour SDCref.

3.2. Résultats de l'OP

3.2.1. Évolution des indicateurs quantitatifs et qualitatifs

De manière globale, toutes pratiques confondues, les fermes de l'OP ont augmenté Structure_P (+20% en moyenne), MO (+8%), Cmin (+20%) et Nmin (+18%). Au-delà de ces variations globales, certaines pratiques sont associées significativement à l'évolution de certains indicateurs. Les fermes qui ont réalisé des apports végétaux exogènes ont vu une augmentation significative de Cmin et ont maintenu des valeurs de P2O5 et MgO identiques aux valeurs de départ. Les fermes sans apports végétaux ont maintenu Cmin mais ont vu leurs valeurs de P2O5 et MgO diminuer (**Figure 4**).



Les fermes sans autres apports de fertilité (à part les apports végétaux ou les couverts végétaux) ont vu MO et Nmin augmenter alors que ces indicateurs se sont maintenus pour les fermes utilisant du fumier ou des fertilisants organiques du commerce. Cela peut être expliqué par le fait que les systèmes reposant uniquement sur les apports végétaux ont en général apporté plus de matière végétale (103 ± 118 TMS/ha sur les 4 ans) que les systèmes combinant apports végétaux et autres sources de fertilité (32 ± 45 TMS/ha). Le travail du sol très limité est associé à un maintien de la teneur de départ en MgO alors que le travail du sol limité est lié à une augmentation et le travail du sol classique à une diminution de cet élément dans le sol. Une hypothèse d'explication est que le travail du sol classique favorise la lixiviation de cet élément contrairement à du travail du sol limité ou très limité.

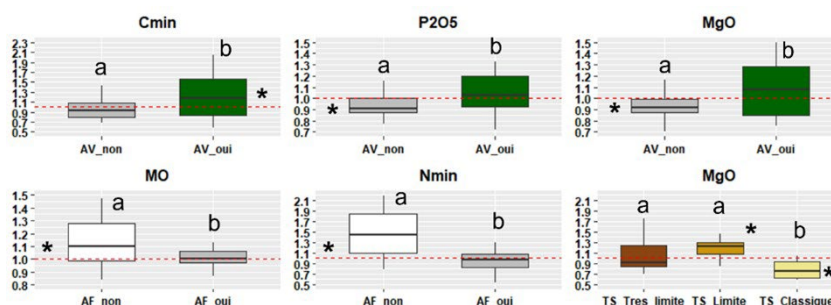


Figure 4. Indicateurs de sol dont l'évolution est impactée significativement par la présence (oui) ou l'absence (non) d'apports végétaux (AV), d'apports de fertilisants extérieurs (AF) ou par le travail du sol (TS). Les lettres indiquent des différences significatives entre les pratiques (p-value : 0,05 pour tous les indicateurs sauf pour MO et MgO à 0,1). Pour chaque modalité de pratique, les astérisques indiquent une différence significative de la moyenne de l'indicateur par rapport à 1, c'est-à-dire des valeurs différentes des valeurs initiales (supérieures si au-dessus de la ligne rouge, inférieures si au-dessous). Se reporter au **Tableau 3** pour le détail des indicateurs.

Les pratiques expérimentées (AV, AF ou TS) n'ont aucun impact significatif sur le rendement relatif (Rdt_rel). **En moyenne, les rendements obtenus sont inférieurs aux références régionales car Rdt_rel est significativement inférieur à 1 ($0,81 \pm 0,41$).** Ces rendements inférieurs aux références peuvent s'interpréter par le caractère expérimental et non encore maîtrisé des pratiques testées ou par l'inadéquation des références régionales de rendement considérées par rapport au potentiel pédoclimatique des différentes fermes de l'OP.

Les pratiques innovantes testées impactent tous les indicateurs de travail et certains indicateurs agronomiques qualitatifs¹². La non-corrélation entre rendement et pratiques expérimentées est confortée par le jugement qualitatif des maraîchers sur les variations de rendement.

En termes de qualité du sol perçue par les maraîchers, la seule pratique innovante qui est associée à une évolution positive est l'apport de matières végétales, ce qui est cohérent avec leur impact positif mesuré quantitativement (**Figure 4**) mais le travail du sol n'a pas d'impact significatif. **Le travail du sol très limité est associé à moins de charge de travail et à une pénibilité physique inférieure car les opérations de travail du sol sont supprimées** ici sans variation de la pression en adventices (donc sans impact sur le désherbage manuel). Il est également associé à une qualité des légumes perçue par les maraîchers équivalente ou supérieure, ce qui fait écho à certaines hypothèses des maraîchers qui associent « un sol de qualité à des légumes de qualité ». **Les apports végétaux sont satisfaisants d'un point de vue agronomique** comme substitutions à d'autres sources de fertilité car ils n'ont aucun impact sur le rendement ou la qualité des récoltes. Cependant, ils sont liés à une surcharge de travail, de pénibilité physique, de charge mentale et de pics de travail. En effet, les maraîchers expliquent qu'apporter des matières végétales nécessitent des opérations supplémentaires

¹² Le résultat des tests statistiques est détaillé à <https://hal.inrae.fr/hal-05031252> (Tableau 4 et 5).



en amont (ex : récupération et manutention de compost ; gestion, fauche), séchage/enrubannage/ensilage d'une prairie au printemps quand le travail en maraîchage est déjà important) et rendent plus complexes, pénibles et chronophages les apports au champ en comparaison des engrais organiques ou animaux. Selon les maraîchers de l'OP, ces apports ont été parfois mécanisés en particulier pour les systèmes en plein champ (par exemple avec des épandeurs) mais le plus souvent manuels en particulier sous abri et sur les petites surfaces de l'expérimentation. Un consensus se dégage des maraîchers de l'OP sur la nécessité de pouvoir mécaniser ces opérations avec du matériel adapté pour les généraliser, par exemple pour dérouler une botte de luzerne sur une planche de maraîchage (ce qui manuellement est jugé long et pénible).

Le **travail du sol limité** présente les mêmes impacts sur les indicateurs de travail que les apports végétaux, ce qui est expliqué par le fait que toutes les fermes de l'OP mettant en place du travail du sol limité réalisaient également des apports végétaux. Le travail du sol limité est associé à une baisse de la qualité des légumes. Aucun élément des échanges avec les maraîchers ne permet d'interpréter cette observation.

L'**usage d'autres sources de fertilité** (engrais organiques du commerce ou d'origine animale) est associé à plus de charge de travail et de charge mentale liées aux opérations de fertilisation. Ces autres sources de fertilité sont associées à une qualité inférieure des récoltes qui ne peut être interprétée d'après les échanges avec les maraîchers. Les pratiques de travail du sol classique et de non recours aux apports végétaux ne causent pas de variation des indicateurs de travail (niveau équivalent), ce qui est cohérent car ces pratiques sont les pratiques classiques de référence. Le travail du sol classique est également associé à une rentabilité économique équivalente. Le non recours aux apports végétaux est associé à une rentabilité économique plus importante, ce qui signifie en creux que les systèmes avec des apports végétaux sont peu associés à une augmentation de la rentabilité économique. Cela s'explique car les apports végétaux mènent à un rendement équivalent avec plus de charge de travail (donc un coût supérieur de main d'œuvre).

En termes de bioagresseurs, les IFT ne sont pas interprétables car ils sont tributaires des niveaux de tolérance, des choix phytosanitaires des maraîchers qui n'étaient pas reliés aux pratiques innovantes testées et aux conditions climatiques. L'appréciation qualitative des maraîchers montre **qu'aucune pratique testée n'est associée à une augmentation ou une diminution de la pression en ravageurs, maladies ou adventices**.

Sur les 47 cycles de culture suivis entre les fermes et les années du projet, les maraîchers montrent dans la majorité des cas une satisfaction globale partielle (22/47) ou totale (18/47). Les systèmes de culture sans apports végétaux sont corrélés positivement à une satisfaction totale (p-value : 0.05) alors que les systèmes de culture avec apports végétaux sont associés à une satisfaction partielle (p-value : 0.05). Les autres pratiques n'ont pas d'impact sur la satisfaction globale. La satisfaction partielle pour les systèmes avec apports végétaux s'explique par le fait que ces pratiques apportent des bénéfices (ex : amélioration du sol, maintien du rendement sans dépendance aux intrants animaux ou commerciaux) mais peuvent apporter des contraintes en termes de travail.

4. Discussion générale et conclusion

Notre démarche expérimentale a combiné une expérimentation système en station (permettant une robustesse statistique plus forte mais dans un seul contexte) avec des suivis en fermes commerciales (avec des analyses statistiques moins puissantes mais représentant une diversité de situations). En confrontant les deux dispositifs, nous pouvons formuler les conclusions suivantes, enrichies par l'analyse qualitative des points de vigilance formulés par les maraîchers de l'OP.



4.1. Conclusions sur les apports végétaux exogènes

Des apports végétaux exogènes (herbe fraîche broyée, foin, paille, enrubannage de luzerne, ensilage d'herbe, compost, broyat) peuvent se substituer aux engrais organiques du commerce ou aux fertilisants d'origine animale pour maintenir ou améliorer la fertilité des sols et assurer des rendements identiques. L'OP permet de mettre en lumière que ce sont surtout les apports végétaux, et leur quantité, qui impactent les indicateurs de sol plutôt que le niveau de travail du sol. En moyenne, les quantités de matière sèche végétale apportées par les maraîchers de l'OP sur 4 ans (113 ± 96 TMS) sont intermédiaires entre les apports du SDC1 (24 TMS) et du SDC2 (325 TMS) mais leur impact positif sur les sols fait écho aux impacts perçus dans le SDC2. Cela laisse suggérer que si les apports végétaux réalisés dans SDC1 permettent de maintenir les indicateurs de sol proches de la référence, et aussi les rendements, une amélioration du sol nécessiterait des apports plus conséquents.

Les apports végétaux peuvent dans certains cas impacter négativement le travail en termes de charge, de pénibilité physique et mentale en particulier en l'absence d'équipement adapté pour (i) la gestion des prairies si cette matière végétale est produite sur la ferme (matériel pour faucher, ensiler, enrubanner) (ii) l'épandage de ces apports végétaux (ex : dérouleuse pour l'enrubannage, épandeur). De plus, la temporalité des opérations liées à la gestion d'une prairie extérieure à la parcelle (moment de la fauche) peut être contraignante car en concurrence avec les pics de travail en maraîchage au printemps. Dans le cas d'apports d'herbe fraîche, il est nécessaire que le moment de la fauche coïncide avec un moment pertinent pour apporter l'herbe sur le cycle de culture. A cet égard, ensiler ou enrubanner la prairie permet plus de flexibilité car la matière végétale peut être stockée et épandue à un autre moment. Pour limiter les concurrences de pics de travail et la surcharge de travail, il peut être pertinent de passer par une entreprise de travaux agricoles ou d'investir dans un équipement adapté. Fertiliser un hectare de maraîchage nécessitant entre 2 et 5 hectares de prairie, la généralisation de ces pratiques nécessite d'avoir les surfaces nécessaires sur la ferme ou de pouvoir accéder à cette biomasse à l'échelle territoriale. De plus, si les apports de biomasse venant de prairie permettent de gagner en autonomie pour la fertilisation des légumes, la question de la fertilisation des prairies demeure.

4.2. Conclusions sur la réduction/suppression du travail du sol

Le travail du sol limité (sans labour) n'a pas d'impact significatif sur la fertilité, le rendement ou le travail. Le travail du sol très limité a des impacts contrastés en fonction des contextes. En station, dans un sol ayant une tendance au tassement et sans intervention préalable pour diminuer la pression en adventices et s'assurer d'une bonne structure du sol en amont, le système avec non travail du sol strict et des apports carbonés conséquents a amélioré les indicateurs de fertilité du sol, mais a diminué le rendement et vu le temps de désherbage manuel – jugé pénible – augmenter. Sur les fermes du réseau, le travail du sol très limité, en revanche, n'impacte pas les rendements et diminue la charge et la pénibilité du travail. Ces meilleurs résultats sur les fermes s'expliquent par le fait que les maraîchers se revendiquant d'une démarche MSV insistent sur la nécessité d'être flexibles sur le non travail du sol et s'autorisent des interventions sur certains itinéraires techniques ou en rattrapage. De plus, ces maraîchers insistent que le non-travail du sol représente une difficulté supplémentaire au maraîchage qui demande de l'expérience pour être maîtrisé. Il est donc crucial d'être vigilant aux conditions préalables (structure du sol, taux de matière organique, pression en adventices contrôlée) avant d'arrêter le travail du sol et de ne pas être dogmatique quant à la possibilité d'intervenir à certains moments si besoin. Dans les approches MSV, le sol se réchauffe moins vite au printemps, ce qui retarde la récolte des primeurs. Il faut donc intégrer cette particularité, soit en adaptant sa commercialisation, soit en utilisant des tunnels nantais pour gagner en précocité, voire en travaillant le sol sur les parcelles dédiées aux cultures primeurs. En contrepartie, les maraîchers soulignent une portance plus importante qui permet de mieux intervenir sur les parcelles dans des contextes humides. Dans les approches MSV, la plantation dans des sols non travaillés couverts de paillage ou résidus de cultures peut nécessiter un matériel spécifique ou des pratiques adaptées (ex : utiliser des plants plutôt



que des semis de graines, utilisation de *strip till*, travail du sol très superficiel au cultirateur ou à la herse pour favoriser l'implantation, traçage de ligne de plantations ou semis avec des instruments à dents ou disques). Dans certains cas, ce type de plantation demande une irrigation supplémentaire au démarrage pour ameublir le sol. Nos résultats soulignent donc la nécessité d'une flexibilité par rapport au non travail du sol qui est parfois érigé comme un dogme rigide et font écho au travail de Faury (2020) qui montre que même sur les fermes se revendiquant du MSV, pour qui le non travail du sol strict est posé comme un idéal¹³, il existe un gradient de pratiques entre non travail du sol, travail du sol réduit et non labour, ce qui est plus généralement le cas en agriculture biologique de conservation (Peigné et al., 2014).

4.3. Impacts des pratiques expérimentées sur les bioagresseurs

Un des postulats du projet était qu'améliorer la fertilité du sol permettrait d'améliorer la robustesse des plantes et leur résistance aux bioagresseurs. A cet égard, aucun lien significatif n'a été établi dans cette étude entre les pratiques testées et la pression en bioagresseurs ou les IFT, bien que les maraîchers et l'expérimentatrice soulignent un point de vigilance supplémentaire à avoir concernant les rongeurs et les limaces dans des systèmes avec moins de travail du sol et des paillages organiques ou plastiques.

Lors des échanges, les maraîchers de l'OP (10/10) confirment ne pas rencontrer de problème particulier de maladie ou d'insectes liées aux pratiques testées. Les éventuels dégâts associés sont reliés avant tout au climat de l'année et aux pratiques de prévention mises en place ou non (ex : filets anti-insectes). Les pratiques de limitation du travail du sol et d'apports végétaux peuvent mener à une plus forte pression en limaces et en rongeurs (9/10) mais cette pression est gérée via une diversité de pratiques combinées (utilisation de plants résistants mieux que des semis, passage de rouleaux pour détruire les galeries, retrait des bâches avant une culture pour faciliter la prédation, anti-limaces, tolérance aux dégâts). La majorité des maraîchers (9/10) mentionnent que la maîtrise des adventices est un enjeu global dans ces systèmes innovants auxquels les maraîchers parviennent à répondre en articulant différentes techniques : occultation, paillage plastique ou organique, binage, implantation réussie des couverts pour limiter le développement des adventices, vigilance sur le fait que les apports végétaux réalisés ne contiennent pas de graines d'adventices, prairie de couvert long broyée régulièrement pour « épuiser les adventices vivaces » (ex : chardon) ou avant leur floraison, implantation de cultures peu sensibles aux adventices après un itinéraire sous paillage foin/paille qui est moins efficace que le paillage plastique.

4.4. Perspectives scientifiques

En station, 2 SDC innovants combinant de manière cohérente une modalité de travail de sol et d'apports végétaux ont été expérimentés. Cependant, l'OP nous montre que de multiples combinaisons sont possibles entre modalités de travail du sol, types d'apports végétaux, autres apports de fertilisants. Les apports végétaux pratiques sont d'une grande diversité en termes de matière (herbe, luzerne, bois), forme (frais, foin, enrubannage, ensilage, BRF), modes d'intégration (enfouies, laissées en surface) et sont parfois combinés. Vu le faible nombre de fermes dans l'OP (10) et la diversité des pratiques et de leurs combinaisons, les analyses statistiques se sont focalisées sur l'impact individuel de chaque modalité de pratique et les apports végétaux ont été caractérisés par une modalité binaire (Présence ou Absence). Il serait pertinent de mieux analyser l'impact des différents types d'apports végétaux et effets d'interactions entre travail du sol et pratiques d'apports végétaux comme suggéré par Norris et Congreves (2018), soit en multipliant le nombre de fermes suivies ou en limitant les modalités possibles de chaque pratique pour disposer de répétitions des différentes combinaisons dans différents contextes.

¹³ <https://www.maraichagesolvivant.fr/>



Dans cet article, notre analyse s'est focalisée sur l'effet des pratiques et nous avons délibérément fait le choix de ne pas considérer les effets par année ou l'interaction entre les pratiques et les années car (i) les fermes de l'OP n'avaient pas la même ancienneté dans les pratiques testées, ce qui rendait impossible de comparer les effets de cumuls ou de seuils au cours du temps, (ii) les fermes de l'OP se trouvant dans des contextes pédoclimatiques différentes, une même année pouvait avoir des caractéristiques différentes selon les fermes. Il nous semblerait cependant nécessaire de mieux caractériser l'impact des pratiques innovantes testées au cours du temps (évolutions, variabilité, dynamiques, seuils) et de voir comment les résultats de ces pratiques diffèrent selon les contextes climatiques (en particulier en année sèche ou humide). Cela impliquerait des suivis sur le temps long et/ou l'existence d'un témoin par ferme chaque année. Des suivis à long terme seraient nécessaires en particulier pour l'évolution de la teneur des sols en certains minéraux. En effet, certains maraîchers de l'OP craignent des carences sur le long terme en certains éléments minéraux, par exemple le calcium, dans les systèmes reposant uniquement sur des apports végétaux ou les couverts.

Dans notre projet, la consommation d'eau par les SDC innovants n'a pas été traitée quantitativement mais les maraîchers et l'expérimentatrice ont souligné qualitativement que dans certains cas, limitation du travail du sol et apports végétaux pouvaient au contraire nécessiter plus d'eau (ex : besoin d'irrigation avant implantation sur un sol non travaillé pour l'ameublir et permettre une implantation plus facile des légumes ; paillage « pompant » l'eau d'irrigation ; besoins d'eau pour dégrader les quantités importantes de matières organiques apportées). Le projet SEFERSOL (Langard et al., 2024) a montré à l'inverse que paillage (organique et plastique) et limitation/arrêt du travail du sol peuvent limiter la consommation d'eau en maraîchage. Il apparaît donc crucial de mieux analyser et évaluer la consommation d'eau des SDC innovants en maraîchage. SEFERSOL a également montré un lessivage d'azote supérieur dans un système maraîcher avec non travail du sol et apports de mulch régulier. Nous n'avons pas abordé cette question mais elle est au cœur de controverses vives autour des approches MSV qui entendent promouvoir la vie des sols en apportant souvent des quantités massives d'apports végétaux carbonés. Il est donc crucial de continuer à explorer l'impact de ces systèmes innovants sur les potentielles pollutions associées.

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

Kevin MOREL : <https://orcid.org/0000-0002-8211-3003>

Contributions des auteurs

R : rédaction ; M : implication dans la définition des méthodes ; D : pilotage et animation de la collecte de données ; A : analyse des données ; Re : relecture de l'article. Kevin Morel : R/M/A ; Suzanne Pelois : A ; Andrea Adamko-Sevestre, Victoire Barillet, Clémentine Fayol : M/D/A/Re



Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Nous tenons à remercier tous les maraîchers et maraîchères des fermes de l'OP (Les jardins de la Bardonnière ; Biodivy ; Biotaupes ; Carotte Sauvage ; Court Circuit ; Le Hingair ; la ferme de Kergalaon ; Kerziou ; Les Primeurs des Cinq Sens ; La Tindière) et tous les techniciens et techniciennes du réseau FNAB du Grand Ouest impliqués.

Déclaration de soutien financier

Les auteurs remercient l'Office français de la biodiversité, via le réseau DEPHY EXPE 2, et le Conseil Régional de Bretagne pour leur soutien financier.

Références bibliographiques

Dumont A., 2017. Analyse systémique des conditions de travail et d'emploi dans la production de légumes pour le marché du frais en Région wallonne (Belgique), dans une perspective de transition agroécologique. UCL - Université Catholique de Louvain.

Fauray A. A., 2020. *A holistic view of Maraîchage sur Sol Vivant: participatory action research with a group of market gardeners in France*. Mémoire de master. Norwegian University of Life Sciences, Å. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2727779/Master%27s%20thesis.pdf?sequence=1>

Langard E., Barbot C. Bogdanok M., Delaunay G., Munier C., Nussbaumer M., Nassr N., 2024. SEFerSol : Stratégies innovantes d'Entretien de la Fertilité du Sol en maraîchage biologique. *Innovations Agronomiques* 98, 125.

Le Cam V., 2010. Gestion durable de la fertilité des sols: étude des pratiques innovantes des maraîchers biologiques diversifiés du Grand Ouest. Mémoire AgroCampus Ouest. https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2020-04/M%20C3%A9moire_V.Le%20Cam.pdf

Morel K., Léger F., 2016. A conceptual framework for alternative farmers' strategic choices: the case of French organic market

Norris C.E., Congreves K.A., 2018. Alternative management practices improve soil health indices in intensive vegetable cropping systems: a review. *Frontiers in Environmental Science* 6, 50.

Peigné J., Casagrande M., Payet V., et al. 2016. How organic farmers practice conservation agriculture in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems* 31, 72–85.

Thibault C., Lecompte F., 2018. Gestion de la fertilité des sols en cultures légumières et maraîchères. Rapport d'étude du GIS Picléq. <https://www.picleg.fr/content/download/3887/37442?version=1>

Pour citer cet article : Kevin Morel, Suzanne Pelois, Andrea Adamko-Sevestre, Victoire Barillet, Clémentine Fayol. Concilier fertilité, autonomie et travail en maraîchage biologique : expérimentation de systèmes de cultures innovants -projet PERSYST. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.15-29. [10.17180/ciag-2026-vol109-art02](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



SYDRA : conception et évaluation de systèmes de culture cidricoles agroécologiques

Lisa FOLTON¹, Nathalie CORROYER², Bruno CORROYER², Jean-Louis BENASSI¹

¹ Institut Français des Productions Cidricoles, 293 rue du Champ de l'Isle, La Rangée Chesnel, 61500 Sées

² Chambre d'Agriculture Normandie, Service Vergers et Produits Cidricoles - Chemin de la Bretèque – CS 30059 - 76237 BOIS-GUILLAUME Cedex

Correspondance : lisa.folton@ifpc.eu, jl.benassi@ifpc.eu

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art03>

Résumé

Pendant 6 ans, le projet SYDRA a permis de concevoir, expérimenter et évaluer cinq systèmes de culture cidricoles agroécologiques en Normandie : trois vergers issus de conceptions de novo et deux reconceptions à partir de vergers en production. Chaque système a été conçu et adapté aux contraintes locales avec des combinaisons complexes de leviers innovants. Ces leviers ont contribué à réduire de plus de 80 % les indices de fréquence de traitement (IFT) hors biocontrôle par rapport à une référence 2013 de la filière cidricole. Pour les vergers adultes, le suivi technique rapproché sur de nombreuses années a permis de mettre en place des systèmes maîtrisant convenablement les bioagresseurs avec des productions correctes. Sur les jeunes vergers, la régulation des bioagresseurs est pour l'instant satisfaisante dans des conditions de faible pression, mais les performances agronomiques et économiques seront à vérifier sur les prochaines années.

Mots-clés : pomme à cidre, approche système, réduction des produits phytosanitaires de synthèse, biodiversité fonctionnelle

Abstract: SYDRA: design and evaluation of agroecological cider-apple growing systems

Over a 6-year period, the SYDRA project designed, tested and assessed five agro-ecological cider-apple growing systems in Normandy. Three are young orchards resulting from design workshops carried out at the start of the project, and two are the result of redesigns based on mature orchards. Each system has been designed and adapted to the local constraints using complex combinations of innovative levers. These levers have contributed to a reduction of more than 80 % of the Treatment Frequency Indicator (TFI) excluding biocontrol, compared with a 2013 reference for the cider-apple sector. For adult orchards, close technical monitoring over a significant number of years has enabled us to set up systems that adequately control bio-aggressors and produce decent yields. In young orchards, pest control is currently satisfactory in conditions of low pressure, but agronomic and economic performances will need to be confirmed over the next few years.

Keywords: cider apple, system approach, reduction of synthetic phytosanitary products, functional biodiversity

1. Introduction

En France, la filière cidricole représente une production d'environ 250 000 tonnes de pomme par an (UNICID, 2024). La surface de production se divise entre verger basse-tige spécialisé (environ 9 000 ha), verger haute-tige et pré-verger traditionnel haute-tige. Au total, la statistique agricole recense ainsi environ 14 300 ha déclarés (Agreste, 2024). La filière se regroupe majoritairement dans le Nord-Ouest



de l'hexagone et la Normandie est la première région cidricole française en surface et en production devant la Bretagne et Les Pays de Loire.

La production de pommes à cidre est à destination exclusive de la transformation (cidre, jus, spiritueux) sans contraintes sur le calibre et l'aspect visuel. Les traitements sont ainsi moins nombreux par rapport à la filière pomme à couteau (environ 15 contre 35 traitements par an) (Guerin *et al.*, 2022). La filière cidricole peut également compter sur de très nombreuses variétés, rustiques ou peu sensibles aux maladies. Ces spécificités des vergers de pommes à cidre les rendent propices à l'expérimentation de nouveaux systèmes de production à faible niveau d'intrants.

La réduction des intrants a constitué une priorité dans la filière cidricole, dès les années 1980-90, lors de la mise en place du nouveau verger cidricole spécialisé. La protection chimique systématique ne se justifiait pas, tant sur le plan économique que technique. L'Institut français des productions cidricoles (IFPC) s'est, de fait, engagé rapidement dans une démarche de production fruitière intégrée (PFI). Dès 2010, la volonté des producteurs cidricoles est d'aller au-delà de la PFI en privilégiant les stratégies de biocontrôle ou alternatives aux produits de synthèse pour renforcer la durabilité de la filière cidricole. L'ambition est d'améliorer l'impact environnemental de la production de pommes à cidre, d'apporter des réponses aux impasses techniques liées à la réduction de l'usage des pesticides (toutes familles confondues) et de renforcer les garanties de sécurité des aliments en réponse aux attentes sociétales et celles de la distribution (Guerin *et al.* 2020).

Dans ce contexte, l'IFPC a initié le projet multipartenarial « Verger Cidricole de Demain ». Grâce aux travaux menés dans ce projet entre 2012 et 2017, plusieurs stratégies ont été expérimentées pour réduire les pesticides (Guerin *et al.*, 2017 ; Albert *et al.*, 2017). Celles-ci reposent majoritairement sur des combinaisons de leviers relevant de l'efficacité et de la substitution (essentiellement par des produits de biocontrôle) selon la classification ESR (Efficacité, Substitution, Reconception) (Hill & MacRae, 1996). Ces leviers ont ainsi permis de tester une réduction annuelle moyenne des Indices de Fréquence de Traitements (IFT) hors biocontrôle de 48 % dans les parcelles innovantes par rapport au réseau des parcelles témoins du projet (parcelles conduites selon les itinéraires producteurs). Toutefois, les niveaux de réduction des IFT sont très variables selon les systèmes innovants expérimentés. De plus, l'impact de cette réduction sur les performances économiques des vergers (rendement, rentabilité et temps de travaux) met encore en évidence la difficulté de limiter certains intrants (ex. aphicides et herbicides), en particulier en jeune verger (Guerin *et al.*, 2020).

Débuté en 2019, le projet SYDRA s'inscrit dans la continuité de cette démarche de recherche de modes de production plus écologiques tout en restant durables économiquement et socialement. Les objectifs du projet sont de : 1) poursuivre le suivi et l'évaluation de vergers adultes, plantés dans les années 2010, sur leur phase de pleine production (8^e à 15^e feuilles) afin de fiabiliser la robustesse des combinaisons de leviers, et 2) concevoir des vergers dans une approche agroécologique qui renvoie majoritairement à des leviers reposant davantage sur la reconception des vergers. L'ambition de ce projet, est de repenser l'agroécosystème cidricole dans son ensemble (sa composition, sa diversité, son architecture, son agencement, son itinéraire technique, etc.) en se reposant en priorité sur les services écosystémiques (comme la régulation biologique des bioagresseurs) et non plus sur les produits phytosanitaires.

Le projet SYDRA est coordonné par l'Institut français des productions cidricoles (IFPC) en partenariat avec les Chambres d'agriculture de Normandie, le lycée professionnel agricole du Pays de Bray et un petit réseau de producteurs.

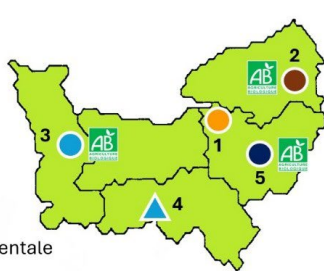
Cet article présente dans les grandes lignes les stratégies de gestion des bioagresseurs conçues et mises en place dans les vergers ainsi que leur méthode d'évaluation. Les résultats des principaux indicateurs pour caractériser la multi-performance des systèmes expérimentés seront présentés et discutés.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Cinq sites d'expérimentation en Normandie

Le projet SYDRA s'appuie sur un réseau multisite de cinq systèmes de culture en Normandie. Quatre systèmes sont implantés sur des parcelles de producteur, dont trois certifiées en agriculture biologique. Le dernier système est implanté sur la station expérimentale de l'IFPC. Ils sont répartis dans les différentes zones de production sur des territoires très diversifiés (plaine céréalière, environnement bocager...) ce qui permet de prendre en compte la diversité des paysages de production cidricole (Figure 5). Le réseau de parcelles est constitué de deux vergers en production, conçus dans le cadre du

-  Verger en AB
-  Plantation en 2011
-  Plantation en 2012
-  Plantation en 2021
-  Plantation en 2022
-  Site producteur
-  Site station expérimentale



précédent projet « Verger Cidricole de Demain », et de trois nouvelles plantations.

Figure 5 : Réseau des parcelles SYDRA : localisation et date de plantation.

2.2. Objectifs

L'objectif du projet est de concevoir, expérimenter et évaluer des systèmes cidricoles utilisant les produits phytosanitaires de synthèse uniquement en ultime recours sans nuire aux performances agronomiques et économiques des systèmes.

Dans cet article, les « produits hors biocontrôle » désignent les produits phytosanitaires de synthèse avec une autorisation de mise sur le marché (AMM) qui ne sont pas considérés comme biocontrôle selon la direction générale de l'alimentation (DGAL) (Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire - DGAL, 2024).

Le projet ambitionne une réduction des IFT hors biocontrôle de 50 % à 100 % en fonction des sites et des produits par rapport à une référence filière (Tableau 4). Cette réduction d'IFT des produits hors biocontrôle se base sur un IFT référence de la filière cidricole calculé sur la base des itinéraires techniques ayant servi à l'élaboration des fiches de synthèse Agribalyse, Version 1 du 21 octobre 2013, correspondant à l'itinéraire type d'un verger basse-tige conventionnel en PFI (IFPC, 2013a, b).

Tableau 4 : Objectifs de réduction des IFT hors biocontrôle par site et type de produits

Site	1	2	3	4	5
Global	-75 %	-75 %	-75 %	-75 à -100 %	-75 %
Herbicides			-100 %		
Fongicides	-50 %	-75 %	-75 %	-75 à -100 %	-75 %
Insecticides	-100 %	-75 %	-50 %	-75 à -100 %	-50 %
Substances de croissance	-50 %	-100 %	-100 %	-100 %	-100 %

2.3. Description des systèmes et leviers mobilisés

Plusieurs stratégies complémentaires ont été pensées lors de la conception de ces cinq systèmes (plantations 2011-2012 et 2021-2022). Elles sont basées sur les différents modes d'action du concept



ESR : l'efficacité des moyens de lutte, la substitution des produits de synthèse par des méthodes de lutte alternatives et la reconception des systèmes, en particulier pour les trois jeunes systèmes.

Ces trois nouveaux systèmes de verger cidricole ont été prototypés au cours de plusieurs ateliers de co-conception au début du projet SYDRA. Une attention particulière a été portée sur la stratégie de reconception et de diversification du verger cidricole. En effet, la réussite agronomique et économique de la réduction des intrants phytosanitaires repose sur une meilleure stabilité et résilience du système, qui peut être favorisée par la diversification du matériel végétal au verger.

Le levier génétique a été mobilisé via l'utilisation de variétés les plus tolérantes possibles, notamment à la tavelure, principale maladie dans la filière, et de variétés peu alternantes pour limiter les interventions fongiques et d'éclaircissage. L'implantation de porte-greffes alternatifs, moins sensibles au dépérissement que celui de référence (MM106), a été raisonnée selon les contextes de sol et les variétés sélectionnées. Le principe étant de générer des associations variété/porte-greffe permettant de limiter les effets de concurrence (alimentaire et hydrique) induits par l'absence d'herbicides.

La gestion du précédent cultural et la préparation du sol avant la plantation ont été intégrées dans la conception des nouvelles plantations (site 3 et 4). De la luzerne a été cultivée sur les parcelles avant la plantation des vergers afin d'optimiser la fertilité du sol pour anticiper la concurrence (azotée principalement) en situation d'enherbement total et de non-irrigation.

Les systèmes ont été diversifiés via le mélange de variétés de pomme à cidre, dont certaines résistantes à des bioagresseurs, le mélange d'espèces fruitières et le réagencement spatial du verger à différents niveaux de complexité. Le but est de limiter la propagation de certains bioagresseurs (tavelure, pucerons) dans les vergers en créant un espace qui leur est défavorable.

La lutte biologique par conservation est mise en place sur l'ensemble des sites. Plusieurs types d'infrastructures agroécologiques sont présents pour servir de ressources et/ou d'habitats aux auxiliaires :

- des haies diversifiées sont implantées en bordure des vergers en prenant en compte le paysage proche de la parcelle afin de créer des linéaires de haies servant de couloir de passage des auxiliaires ;
- des espèces fruitières autres que des pommiers à cidre, plantées sur le rang (site 4) et en haies fruitières très diversifiées (site 5) ainsi que des plantes aromatiques (romarin, menthe) sur le rang (site 3 et 5) servent de plantes de service dans la lutte contre le puceron (Ben-Issa et al., 2017) ;
- des bandes fleuries sont implantées dans les inter-rangs et en bordure de verger ;
- des nichoirs à mésanges et rapaces, des gîtes à chauves-souris et des piquets perchoirs sont mis en place pour favoriser les oiseaux et chiroptères pouvant contribuer à la régulation de certains ravageurs et rongeurs (campagnols).

Le principe de lutte biologique par augmentation est également mis en place sur les sites 3 et 5. Des lâchers d'auxiliaires (pupes de syrphes) sont utilisés comme moyens de lutte contre les pucerons.

Des méthodes de lutte physique se substituent aux herbicides et aux éclaircissants chimiques. Des méthodes de prophylaxie sont utilisées de manière complémentaire contre les maladies fongiques.

Les interventions phytosanitaires sont raisonnées en fonction de la pression des bioagresseurs suivant des règles de décision (RDD) préalablement définies. Cette pression de bioagresseurs est évaluée par des indicateurs de pilotage (voir partie 2.4) et également à l'aide d'Outils d'Aide à la Décision (OAD) notamment pour la gestion de la tavelure.

Les RDD se traduisent par des seuils d'intervention fixés annuellement en fonction de la sensibilité de la variété et de l'inoculum de l'année passée pour chaque type de bioagresseurs. Une liste de produits



autorisés sur le système est établie. Les RDD sont amenées à évoluer d'une année sur l'autre en fonction des avancées des connaissances, des évolutions réglementaires ou de réadaptations de règles jugées défavorables. En cas de nécessité de traitement, les produits de biocontrôle sont privilégiés.

D'autres produits de protection phytosanitaire considérés comme substance de base ou produits à faible impact sont également utilisés contre les ravageurs et maladies. Le lactosérum est utilisé pour lutter contre les maladies fongiques (site 2) (Crisp et al., 2006), des applications d'infra-doses de sucre (site 1) ou à base d'huiles essentielles (site 5) sont réalisées pour lutter contre les ravageurs (notamment carpocapse et pucerons) (Regnault-Roger et al., 2012 ; Arnault et al., 2015).

Le pâturage de brebis Shropshire est mis en place sur le site 2 comme moyen de gestion de l'enherbement pour limiter les passages mécaniques. D'autres bénéfices sont visés : fertilisation, prophylaxie contre les campagnols grâce au piétinement, réduction de la pression de certains bioagresseurs (maladies fongiques et vers de la pomme) par ingestion des feuilles et fruits au sol.

Les cinq systèmes étudiés dans le projet sont donc des combinaisons complexes de plusieurs leviers permettant de s'adapter au mieux aux différents contextes de production locaux (contexte pédoclimatique, pression des ravageurs et des maladies, agroéquipement présent sur l'exploitation, objectif de production de l'agriculteur, etc) et rendant possible une réduction des produits phytosanitaires (Tableau 2).

Tableau 5 : Leviers alternatifs mobilisés sur chaque système

		Sites concernés					Bioagresseurs visés					
Leviers mobilisés		1	2	3	4	5	Tavelure	Puceron cendré	Carpocapse	Anthonome	Hoplocampe	Campagnol
Année de plantation		2011	2012	2021	2021	2022						Adventices
Raisonnement de la protection phytosanitaire	OAD RIM Pro	X	X	X	X	X	X					
	Seuil d'intervention	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Produits de biocontrôle ou à moindre impact	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Levier génétique	Variétés tolérantes	X	X	X	X	X	X	X				
	Porte-greffes alternatifs			X	X	X						X
Diversification/ Réagencement spatial du verger	Précédent cultural boostant la fertilité du sol			X	X							X
	Mélange variétal	bloc de 3 rangs	bloc de 3 rangs	1 variété par rang	2 variétés sur le rang	bloc de 2 à 5 rangs	X	X				
	Variété tolérante en bordure de verger				X			X				
	Mélange d'espèces fruitières				X	X	X	X				
	Pâturage		X				X		X		X	X
Lutte biologique	Haies	autour	autour	autour	autour	au sein		X	X	X	X	
	Bandes fleuries	X		X	X	X		X	X	X	X	
	Plantes de services			X	X	X		X				
	Gîtes à chauves-souris			X	X	X		X	X	X	X	
	Nichoires à mésanges	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
	Nichoires, perchoirs à rapaces			X	X	X						X
	Lâchers d'auxiliaires			X		X		X				
Lutte physique	Bâche tissée	X				X						X



Désherbage mécanique du rang par broyage	x	x	x	x		x	x
Travail du sol sur le rang					x		x
Broyage de l'inter-rang	x	x	x	x	x		x

2.4. Suivis expérimentaux et méthodes d'évaluation

Des relevés de terrain se font tout au long de l'année sur les principaux bioagresseurs en pomme à cidre : tavelure, oïdium, anthonome, puceron cendré, carpocapse, hoplocampe, campagnol, adventices. Des indicateurs de pilotage, évaluant la pression des ravageurs (par capture et comptage), permettent le déclenchement des interventions en cas de dépassement des seuils d'interventions fixées dans les RDD. A partir de ces variables agronomiques issues des relevés de terrain (observations et interventions), d'autres indicateurs ont été calculés pour évaluer les performances des vergers sur les plans agronomique, économique, environnemental (**Tableau 6**).

Tableau 6 : Indicateurs utilisés pour évaluer les performances des systèmes

Indicateurs sur l'impact environnemental	IFT (Indice Fréquence Traitement) et pourcentage de réduction des IFT hors biocontrôle	Indicateur rendant compte de l'intensité d'utilisation des produits phytosanitaires calculé selon la méthode du Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire (2024)
Indicateurs agronomiques	Maitrise sanitaire des maladies et ravageurs	Evaluation qualitative des niveaux de dégâts des ravageurs et maladies (comptage ou évaluation sur une échelle de 1 à 9)
	Maitrise des adventices	Evaluation qualitative de la satisfaction du producteur vis-à-vis de la présence d'adventices problématiques et la croissance des arbres
	Vigueur des arbres	
Indicateurs technico-économiques	Faisabilité technique	Evaluation qualitative de la satisfaction du producteur et expérimentateur vis-à-vis de la mise en place et la gestion des leviers mis en place
	Rendement et alternance	Tonnes à l'hectare par an
	Nombre d'interventions	Nombre de passage par hectare
Indicateur de biodiversité et service rendue	Diversité de la flore et de la faune auxiliaire	Quantification de la flore mellifère des parcelles et des auxiliaires de cultures (oiseaux et insectes)
	Régulation naturelle des ravageurs	Qualification de la prédation et taux de prédation

Le projet n'ayant pas de système « témoin », les systèmes sont évalués sur leur capacité à atteindre les objectifs initiaux qui ont été assignés lors de la conception.

3. Résultats et discussions

3.1. Réduction des IFT hors biocontrôle

Sur les 5 systèmes du réseau, les IFT hors biocontrôle ont été réduits de plus de 80 % par rapport à la référence de la filière cidricole (**Figure 2**). Les produits hors biocontrôle utilisés sur les vergers sont majoritairement des fongicides, notamment les produits à base de cuivre. Deux des systèmes (sites 2 et 5) ont également utilisé des insecticides hors biocontrôle.

Les systèmes 1 et 5 utilisent plus de produits de biocontrôle que la référence filière. Le système 5 a un IFT hors biocontrôle important du fait de la sensibilité des variétés implantées.

Le système 4 a répondu à ses objectifs de réduction forte d'IFT hors biocontrôle, seul un traitement fongique à base de cuivre a été réalisé en 2024 pour limiter les dégâts sur la première récolte.



D'autres interventions de protection phytosanitaire des cultures contre les ravageurs et maladies ne sont pas prises en compte dans ces calculs d'IFT comme le lactosérum (site 2), les infra-doses de sucre (site 1) et d'autre produits à faible impact (huiles essentielles, savon noir) (site 5). Des lâchers

d'auxiliaires (pupes de syrphes) ont également été réalisés sur deux sites (3 et 5) contre les pucerons.

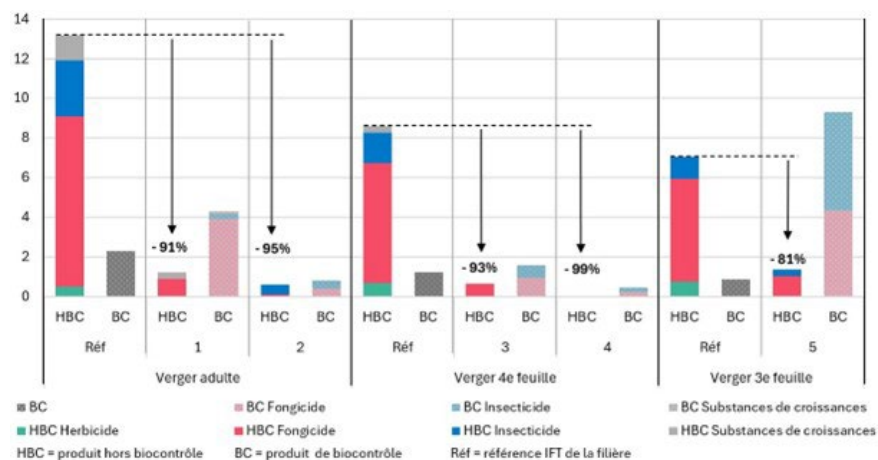


Figure 6 : Graphique des IFT de chaque système SYDRA au regard de la référence filière par âge et pourcentage de réduction de l'IFT hors biocontrôle par rapport à cette référence.

3.2. Maîtrise des bioagresseurs

Le Tableau 74 présente les notes de satisfaction, sur une échelle de 1 à 3, de la maîtrise des bioagresseurs par catégorie (ravageurs, maladies, adventices).

Tableau 7 : Notes de satisfaction des expérimentateurs de la maîtrise des bioagresseurs. Moyenne par catégorie et sur les 6 années du projet (ou depuis la plantation).

Bioagresseurs	Site et nombre d'années d'évaluation				
	1 6 ans	2 6 ans	3 4 ans	4 4 ans	5 3 ans
Adventices	3	3	2	1,75	3
Maladies	2,9	2,78	3	2,72	2,83
Ravageurs	2,62	2,6	2,47	2,96	2,4

Echelle de 1 (mauvaise maîtrise) à 3 (bonne maîtrise).

La maîtrise des dégâts de ravageurs et maladies est bonne sur les cinq vergers.

Des difficultés logistiques dans la gestion de l'enherbement sur jeune verger ont influencé la pousse des arbres et provoqué un retard de croissance sur le site 4 en 2022, ce qui diminue la note de satisfaction sur la maîtrise des adventices pour ce site (Tableau 8). Des interventions de désherbage manuel au pieds des arbres et de prophylaxie des fruits pour favoriser la croissance ont permis un retour à la normale de la croissance des arbres en 2024. Le site 3 a également été confronté à des difficultés dans la gestion de la luzerne, semée comme précédent cultural mais non détruite sur les inter-rangs lors de la plantation.

Les résultats de maîtrise des bioagresseurs et d'IFT sont à mettre en regard des pressions de bioagresseurs sur les systèmes. La pression de certains bioagresseurs a été faible ces dernières années grâce aux conditions météo qui leur étaient peu favorables. Le site 4, basé sur la station expérimentale de l'IFPC, profite d'un environnement proche contenant une grande diversité de variétés, peu propice aux ravageurs, la pression y est donc souvent plus faible que dans une exploitation agricole.

Il est également important de noter que les jeunes vergers ont été suivis sur peu d'années et que certains bioagresseurs sont peu présents en jeunes vergers (anthronome, carpocapse, hoplocampe). Au vu de ces aspects, nous ne pouvons pas encore conclure sur la pérennité de ces baisses d'IFT sur les



jeunes vergers. Il sera nécessaire de poursuivre l'étude de ces systèmes de culture de pomme à cidre durant leur phase de production.

3.3. Rendement

La bonne maîtrise des bioagresseurs permet un impact très limité sur le développement des arbres et le rendement. Les rendements annuels des vergers adultes (sites 1 et 2) sont corrects, voire importants (Figure 7).

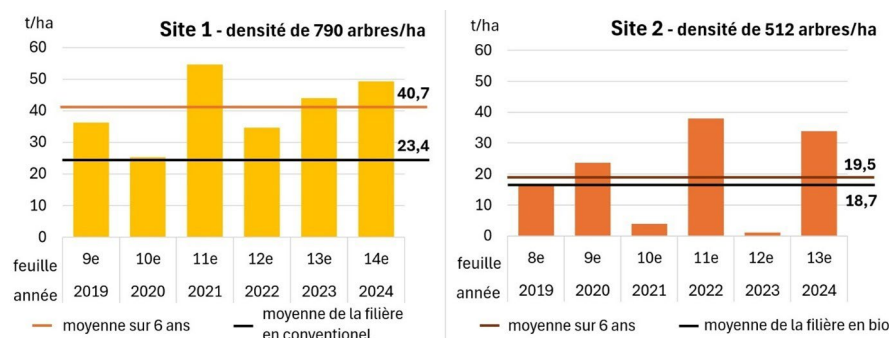


Figure 7 : Rendements annuels des vergers adultes en tonnes par hectare (site 1 à gauche, site 2 à droite) de 2019 à 2024. La première feuille correspond à la première année de production de feuilles.

Le rendement moyen en conventionnel de la filière de 2018 à 2024 est de 23,4 t/ha (IFPC, 2024). Les rendements du site 1 (conventionnel) sont très bons, avec une moyenne de 51,5 kg/arbre sur 6 ans, soit 40 t/ha, pour une densité d'arbre classique pour la filière cidricole (790 arbres/ha). Les rendements du site 2 sont corrects pour une parcelle en Agriculture Biologique sachant que, sur une même parcelle, on estime que le rendement en agriculture biologique est inférieur de -20 à -25 % au rendement en conventionnel soit 18,7t/ha. Le rendement annuel moyen de ce site est de 38 kg/arbre, soit environ 20 t/ha, sachant que la densité de la parcelle est plus faible que la densité classique de la filière (512 arbres par ha).

La parcelle du site 2 est très alternante. Ce phénomène est très présent en vergers de pommiers à cidre si aucune intervention d'éclaircissage (chimique ou mécanique) n'est réalisée. Une alternance est également présente sur le site 1 à l'échelle de l'arbre mais compensée à l'échelle de la parcelle. Il est important de noter que, hormis la gestion des bioagresseurs, ces vergers suivent les préconisations en termes de fertilisation et de taille, de manière à optimiser le rendement.

Les trois jeunes vergers sont en phase de montée en production. Pour le site 3, la moyenne des deux premières années de production (3^e et 4^e feuille) est de 0,88 t/ha. Le site 4 a eu un rendement de 0,8 t/ha en 2024 (4^e feuille) et le site 5 a eu un rendement de 11 t/ha en 2024 (3^e feuille). Le système 5 est composé de variétés types pomme de table qui entrent en production plus rapidement que les variétés de pomme à cidre présentes sur les systèmes 3 et 4. Ces rendements ne sont pas encore représentatifs car les arbres sont en croissance et nous n'avons que peu d'années de récolte. Il est donc pour l'instant difficile de conclure sur les rendements des jeunes parcelles, de plus les arbres implantés sont des combinaisons innovantes de variétés/porte-greffe. Nous avons néanmoins noté un retard de croissance des arbres dû à la concurrence de l'enherbement sur les sites 3 et 4 et un rendement inférieur à l'objectif attendu.

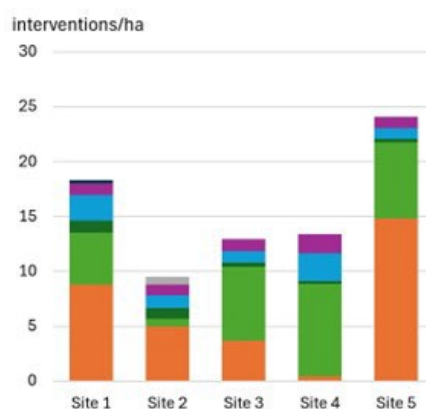
Les résultats plus détaillés sont disponibles sur les pages Ecophytopic du projet SYDRA.¹⁴

¹⁴ <https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/projet-sydra>



3.4. Nombre d'interventions

La Figure 4 présente le nombre annuel d'interventions par hectare pour les sites, moyenné sur 6 ans ou depuis la plantation. Les interventions pré-plantation et lors de la plantation ne sont pas prises en compte.



Type d'intervention	Site				
	1	2	3	4	5
■ Traitement phytosanitaire	8,8	5	3,7	0,5	14,8
■ Gestion de l'enherbement	4,8	0,7	6,8	8,4	7
■ Récolte	1,1	1	0,4	0,3	0,3
■ Fertilisation	2,3	1,2	1	2,5	1
■ Entretien des arbres	1	1	1,1	1,8	1
■ Gestion des animaux	0	0,7	0	0	0
■ Retrait de la bâche	0,3	0	0	0	0
Total général	18,3	9,5	12,9	13,4	24,1

Figure 8 : Nombre moyen d'interventions par hectare par an pour les cinq sites moyennés sur 6 ans (site 1 et 2) ou depuis la plantation (site 3,4,5).

Les traitements phytosanitaires regroupent les traitements à base de produit de synthèse, de biocontrôle, avec et sans AMM, ou par des substances de base.

Les traitements phytosanitaires représentent un grand nombre des interventions pour les sites 1, 2 et 5. Ces systèmes utilisent de nombreux produits de biocontrôle et de substance de base dans leur stratégie de lutte contre les maladies et ravageurs, nécessitant des passages réguliers sur les parcelles.

Le nombre de passages liés à la gestion de l'enherbement est assez important sur les sites 1, 3, 4 et 5 car aucune intervention herbicide n'est réalisée. Le temps de travail lié à l'entretien de l'inter-rang est plus important en jeune verger (site 3,4,5) car les interventions liées à la mise en place des bandes fleuries sont également incluses dans cette catégorie.

Pour le site 4, les interventions de gestion de l'enherbement représentent la majorité des interventions de la parcelle. Des passages réguliers de broyage ont notamment été nécessaires pour limiter la grenaison du rumex, particulièrement problématique sur cette parcelle. Des désherbages avec des outils manuels sur le rang ont également été nécessaire afin de limiter la forte concurrence adventice,



et son impact sur la croissance des arbres. Le site 3 a également nécessité des interventions complémentaires avec des outils manuels sur le rang pour gérer les adventices problématiques non détruites par broyage. Ces interventions de gestion de l'enherbement peuvent être plus ou moins chronophages en fonction du matériel utilisé et de la hauteur de l'herbe.

Le pâturage sur le site 2 permet de limiter de manière importante les passages de broyeur, mais des interventions sont tout de même nécessaires pour gérer les refus et limiter les adventices problématiques (ronces, orties...). Néanmoins, la gestion des animaux représente un poste de travail supplémentaire et la présence d'animaux nécessite un aménagement adéquat de la parcelle (clôture).

La récolte en vergers cidricoles est réalisée mécaniquement par ramassage des fruits au sol. Les interventions liées à la récolte ne représentent pas une part importante des interventions. Pour les jeunes vergers, à peine entrés en production, la récolte n'est pas réalisée sur la totalité de la parcelle en fonction de la durée de mise à fruits des différentes variétés.

Des opérations de prophylaxies manuelles ont été réalisées sur les sites 3 et 4 : suppression des pousses oidiées (site 3 et 4) et suppression des fruits en 2023 (site 4) pour favoriser la croissance des arbres.

Une analyse approfondie des temps de travaux afférents aux différentes opérations sera réalisée dans le cadre du projet SYDRA 2 en vue d'une évaluation technico-économique précise des différents systèmes.

3.5. Biodiversité et régulation naturelle observée dans les vergers

Un cortège d'auxiliaires est présent sur les vergers. De nombreuses espèces d'auxiliaires oiseaux et arthropodes ont été observées. Différentes espèces d'insectes et d'araignées prédatrices ont été observées en saison (coccinelles, syrphes, chrysopes, opilions, araignées...) à différentes phases de développement (œuf, larve et adulte).

Les taux de prédation d'œufs de carpocapse, utilisés comme proies sentinelles sur des cartes de prédation posées en 2023 sont supérieures à 50 % pour trois sites. Les taux sont assez élevés dans les vergers adultes en production (sites 1 et 2), plus attractifs pour les carpocapses (Figure 9). Nous pouvons supposer que la jeunesse des vergers des sites 3 et 5 ne favorise pas la présence des auxiliaires arthropodes prédateurs des œufs de carpocapse. Le taux de prédation sur les parcelles SYDRA a tendance à être plus élevé (en moyenne entre 7 et 30 %, sans différences statistiquement significatives) que le taux de prédation sur des cartes de prédation installées selon le même dispositif sur les parcelles moins diversifiées situées à proximité. Les taux de dégâts de carpocapse sont maîtrisés sur les vergers SYDRA, du fait des effets combinés des différents leviers mis en place (lutte biologique et traitement en biocontrôle).

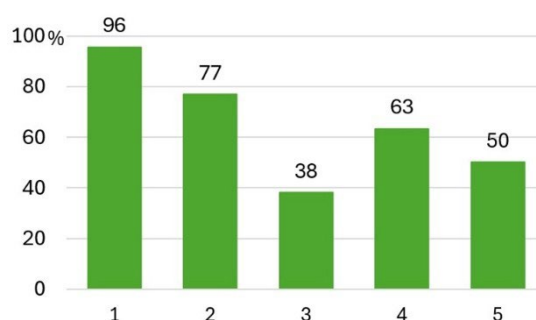


Figure 9 : Taux de prédation des œufs de carpocapse sur les sites en 2023

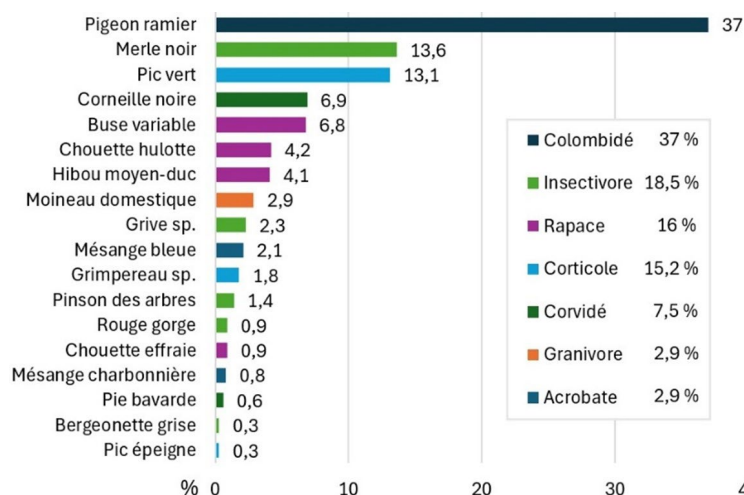


Figure 10 : Espèces observées sur 4 piquets perchoirs d'avril à août 2023 sur le site 4 et leur fréquence d'atterrissage sur le perchoir pour 662 observations.

Les oiseaux, potentiels prédateurs des ravageurs des pommiers, sont également présents sur les vergers. Les suivis de l'avifaune ont permis d'identifier 22 espèces d'oiseaux sur le site 3 et 18 sur le site 4. Les piquets perchoirs équipés de pièges photographiques sont également un

moyen d'identifier les espèces présentes et l'utilisation qu'ils ont de ces perchoirs.

Les nichoirs à mésanges installés sur les vergers sont occupés de façon variable suivant les sites (Tableau 8). Ces différences peuvent être expliquées par différents facteurs comme l'âge des vergers, la durée de présence des nichoirs, mais aussi le paysage environnant des parcelles qui influe sur la quantité de proies disponibles et de nichoirs naturels.

Tableau 8 : Taux d'occupation des nichoirs à mésange en 2023 et 2024

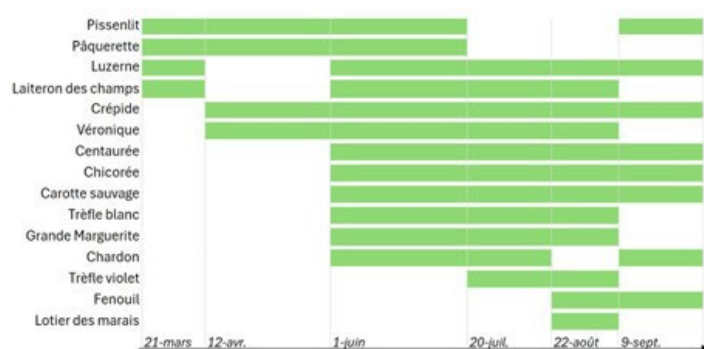
Site	1	3	4	5
Plantation	2011	2021	2021	2022
Durée de présence des nichoirs	5 ans	2 ans	2 ans	1 ans
2023	100 %	36 %	100 %	/
2024	100 %	43 %	100 %	40 %

Les mésanges ainsi que d'autres petits oiseaux insectivores (grimpereaux, moineaux, pinsons) ont été observés en train de prédater des larves de carpocapses et des anthonomes adultes sur des dispositifs de proies sentinelles.

3.6. Pérenité des leviers alternatifs testés

Les haies mises en place sur les jeunes verges (sites 3, 4 et 5) se sont bien implantées, mais sont encore en développement. La haie fruitière très diversifiée du site 5 pourrait devenir un débouché supplémentaire.

Les bandes fleuries semées dans les inter-rangs ont rencontré des difficultés à s'implanter ou à se ressemer complètement. Néanmoins, nous avons observé une diversité de plantes dans l'enherbement



des vergers et notamment des plantes fleuries mellifères (Figure 11). Ces ressources en fleurs ont été favorisées en limitant le nombre de broyages grâce à des broyages différés (site 1) ou alternés 1 rang sur 2 (site 4).

Figure 11 : Calendrier de floraison des plantes mellifères spontanées sur le site 4 en 2024.



Les plantes de services (romarin, lavandin, menthe poivrée) plantées sur le rang du site 3 ne se sont pas bien implantées ou n'ont pas résisté aux passages d'entretien de l'enherbement du rang. Seuls quelques spécimens sont encore présents sur la parcelle. La menthe semée sur le rang sur le site 5 et qui s'est bien développée n'a pas eu l'impact significatif espéré sur la présence des pucerons. Cette menthe non broyée a favorisé la présence des campagnols, ce qui a affecté quelques arbres. Elle a donc été partiellement détruite par travail du sol en 2024.

La bâche tissée mise en place dès la plantation en 2011 sur le rang sur le site 1 a très bien tenu dans le temps avec un entretien de la bordure régulier. Son enlèvement en 2020 a néanmoins été très chronophage et complexe. De plus, les déchets, mélanges de fibre et de terre, ne sont pas recyclables.

Le pâturage est un levier intéressant pour limiter les passages de gestion de l'enherbement, mais nécessite un suivi régulier, en particulier lorsque les brebis sont présentes sur le même verger la majorité de l'année. En effet, des problèmes d'écorçages des troncs sont survenus. La diminution du nombre de brebis dans le troupeau (6 pour 0,6 ha en 2024) et l'élimination des individus problématiques en 2022 a permis de supprimer ce problème. Des passages de broyage ont néanmoins dû être effectués pour gérer l'enherbement à cause d'un léger sous-pâturage. Il y a donc un équilibre à trouver sur le nombre de brebis et la disponibilité du fourrage pour limiter l'écorçage tout en maximisant le pâturage.

4. Conclusion

Les objectifs de réduction de produits phytosanitaires ont été atteints avec une réduction de plus de 80 % des IFT hors biocontrôle sur les systèmes SYDRA par rapport à la référence 2013 de la filière cidricole. Les systèmes mis en place sont néanmoins des systèmes complexes, combinaison de divers leviers alternatifs à l'utilisation des produits de synthèse. La réussite de la maîtrise des bioagresseurs au sein de ses systèmes repose notamment sur la multitude des leviers mobilisés dans cet objectif. La conception de ces systèmes a nécessité des expertises diverses et un temps de réflexion important. Un suivi technique régulier et des observations fréquentes sont également nécessaires pour piloter au mieux ces systèmes.

Les vergers adultes qui ont bénéficié de suivis et d'un pilotage technique régulier depuis la plantation ont de bons résultats en termes de maîtrise des bioagresseurs et de rendement. Sur les jeunes vergers, les arbres et les infrastructures agroécologiques implantés doivent encore se développer. Sur les premières années de suivi, avec des pressions faibles, la gestion des maladies et ravageurs est satisfaisante. Les observations seront à poursuivre sur les prochaines années et sur la phase de pleine production pour avoir des résultats plus robustes. La gestion de l'enherbement en l'absence totale d'herbicide sur jeune verger a nécessité des interventions mécaniques (broyage ou travail du sol) fréquentes et des interventions manuelles complémentaires chronophages ne permettant pas de limiter complètement la concurrence adventice ce qui a influencé la croissance des arbres pour deux des trois jeunes vergers.

Une analyse technico-économique plus approfondie est nécessaire et sera effectuée dans la suite du projet pour évaluer la viabilité économique et sociale de ces systèmes dans la durée en particulier pour les trois nouveaux vergers entrant en phase de production. Le transfert de ces connaissances à un plus grand nombre d'acteurs du terrain est également un enjeu pour la suite.

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles



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

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

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

Contributions des auteurs

Gestion de projet, responsable de site, collecte et analyse des données, rédaction – Lisa Folton
Responsables de sites, collecte des données, relecture – Nathalie Corroyer, Bruno Corroyer
Coanimation de projet, relecture – Jean-Louis Benassi

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

Nos remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué à mener ce projet à bien, en particulier Anne Guerin, Alice Denis, Jean-Charles Cardon, Paul Masquin, Bertrand Cailly, Charles-Albert Houtart, Marie Lefort, Gilles Collombet-Gourdon, aux producteurs accueillants des parcelles d'expérimentations Gaëtan Decarsin, Alexis Chasles et Matthieu Vauquelin, et également aux stagiaires et experts qui ont apporté les appuis au projet. Merci également à l'équipe de la Cellule d'Animation Nationale Ecophyto pour leur appui méthodologique et l'animation du Réseau Dephy.

Déclaration de soutien financier

Action du plan Ecophyto piloté par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec l'appui technique et financier de l'Office français de la Biodiversité.

Le projet SYDRA a également bénéficié du soutien financier des différents organismes partenaires du projet.

Références bibliographiques

- Agreste, 2024. Statistique agricole annuelle 2023 - chiffres et données N°16 - Chiffres définitifs.
- Albert L, Franck P, Gilles Y, Plantegenest M, 2017. Impact of Agroecological Infrastructures on the Dynamics of *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae) and Its Natural Enemies in Apple Orchards in Northwestern France. *Environmental Entomology* 46, 528–537.
- Arnault I, Bardin M, Ondet S et al., 2015. Utilisation de micro-doses de sucres en protection des plantes. *Innovations Agronomiques*, 1–10.
- Ben-Issa R, Gomez L, Gautier H, 2017. Companion Plants for Aphid Pest Management. *Insects* 8, 112.
- Crisp P, Wicks TJ, Troup G, Scott ES, 2006. Mode of action of milk and whey in the control of grapevine powdery mildew. *Australasian Plant Pathology* 35, 487.
- Guerin A, Cardon J-C, Corroyer B, Corroyer N, Denis A, 2022. SYDRA: toward agroecological cider apple orchard systems. *Acta Horticulturae*, 203–208.
- Guerin A, Guillermin P, Bauduin R et al., 2020. Verger Cidricole de Demain : les enseignements après 6 ans d'expérimentation système pour réduire les intrants en jeunes vergers cidricoles. *Innovations Agronomiques* 79, 173–191.



Guerin A, Guillermin P, Biche D et al., 2017. Verger Cidricole de Demain : conception, évaluation et diffusion de systèmes de production à haute performance environnementale et économiquement viables. *Innovations Agronomiques* 55, 273–287.

Hill S, MacRae R, 1996. Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 7, 81–87.

IFPC, 2013a. AGRIBALYSE – FICHE DE SYNTHÈSE - Version 1 - Pomme à cidre, années de basse production, conventionnelle (phase), sortie verger.

IFPC, 2013b. AGRIBALYSE – FICHE DE SYNTHÈSE - Version 1 - Pomme à cidre, années de pleine production, conventionnelle (phase), sortie verger.

IFPC, 2024. Production récoltée et estimation de récolte 2024 pour le verger basse-tige, *Revue Pommes à Cidre* N°62, novembre 2024.

Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2024. Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT). Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire.

Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire - DGAL, Direction générale de l'alimentation, 2024. Liste des produits phytopharmaceutiques de biocontrôle, au titre des articles L.253-5 et L.253-7 du code rural et de la pêche maritime.

Regnault-Roger C, Vincent C, Arnason JT, 2012. Essential oils in insect control: low-risk products in a high-stakes world. *Annual Review of Entomology* 57, 405–424.

UNICID, 2024. Le cidre en France.

Pour citer cet article : Lisa Folton, Nathalie Corroyer, Bruno Corroyer, Jean-Louis Benassi. SYDRA : conception et évaluation de systèmes de culture cidricoles agroécologiques. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.30-43. [10.17180/ciag-2026-vol109-art03](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art03)



CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



2.ZERHO : Des combinaisons de leviers et un outil numérique en horticulture pour approcher le pilotage en zéro pesticide.

Bruno PARIS^{1,4}, Roxane CALVAIRE¹, Léo KERAUDREN¹, Emilie MAUGIN¹, Doïna NJIKE¹, Jacques FILLÂTRE³, Isabelle CABEU³, Sophie DESCAMPS⁴, Laurent CAMBOURNAC⁴, Solène HENRY⁴, Amandine RUBIN⁴, Bastien FASSI⁴, Elysa FILLALI-AICART⁴, Stephen AMBROGIO², Fabien ROBERT¹

¹ ASTREDHOR, 44 rue d'Alésia, 75682 Paris cedex 14, France

² INRAE UMR 1355 Institut Sophia Agrobiotech, 06903 Sophia Antipolis, France

³ ARMEFLHOR, 1 chemin de l'IRFA, 97410 Saint Pierre, La Réunion

⁴ Chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes, CREAM - MIN Fleurs 17- box85, 06296 Nice cedex 3, France

Correspondance : bruno.paris@astredhor.fr ; roxane.calvaire@astredhor.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art04>

Résumé

Dans le projet 2.ZERHO, des expérimentations « zéro pesticide » ont été conduites sur 3 systèmes horticoles : une succession de plantes en pot en région Sud-Ouest, du rosier fleurs coupées en région tropicale et du gerbera fleurs coupées en région méditerranéenne. Diverses combinaisons de leviers (macroorganismes, stimulateurs de défenses naturelles, produits de biocontrôle, brumisation aération...) ont été testées sur les trois sites de stations expérimentales pendant les six années d'expérimentation. Dans tous les systèmes étudiés, l'introduction et la conservation des auxiliaires pour réguler les populations de bioagresseurs sont des points centraux dans la protection des cultures. Les résultats montrent une réduction significative des IFT chimiques, Indices de Fréquence de Traitement. L'utilisation d'un outil numérique co-conçu (Baco) permet d'appréhender l'efficacité des interventions.

Mots-clés : Horticulture, aide à la décision, essais systèmes, protection des cultures, réduction intrants

Abstract: 2.ZERHO: Combinations of levers and a digital horticultural tool to approach zero pesticide management.

In the 2.ZERHO project, "zero pesticide" experiments were carried out on 3 horticultural systems: a succession of potted plants in the South-West region, cut-flower roses in the tropical region and cut-flower gerbera in the Mediterranean region. Various combinations of levers (macro-organisms, natural defense stimulators, biocontrol products, misting and aeration, etc.) were tested on the three experimental station sites over the six years of experimentation. In all the systems studied, the introduction and conservation of beneficial insects to regulate pest populations are central to crop protection. The results show a significant reduction in IFT (Indices de Fréquence de Traitement). The use of a co-designed digital tool (Baco) enables the effectiveness of interventions to be assessed.

Keywords: Horticulture, decision support, system trials, crop protection, reducing inputs

1. Introduction

Un des enjeux de la filière horticole est la mise au point de schémas de culture économes en pesticides pour répondre aux impasses auxquelles les producteurs doivent faire face (Paris et al., 2019) mais aussi aux attentes du plan Ecophyto II+.



L'institut technique ASTREDHOR et le pôle INRAE Santé des Plantes de Sophia-Antipolis ont constitué une Unité Mixte Technologique (UMT) FioriMed² pour traiter au travers de programmes de recherche la problématique de la réduction des pesticides des systèmes horticoles. Des avancées significatives à l'aide de macroorganismes ont été réalisées dans le cadre du projet OTELHO 2013-2018 pour réduire l'usage des pesticides en cultures horticoles. Toutefois, des impasses restent prégnantes sur certains bioagresseurs et la recherche du zéro pesticide nécessite d'identifier les éléments clés pour un pilotage des systèmes qui garantisse la viabilité économique. De fait, les partenaires du projet OTELHO ont décidé d'amplifier les travaux dans le cadre de ce nouveau projet 2.ZERHO.

L'aide à la décision par les outils numériques et les schémas de cultures développés précédemment constituent une première phase réussie vers la réduction drastique des pesticides (réductions obtenues dans OTELHO).

Pour certains conseillers et agriculteurs, l'adoption des technologies numériques est considérée comme une pratique incompatible avec leurs convictions fondamentales sur l'agriculture (Bronson, 2019 ; Rose and Chilvers, 2018). Le fait que certains nouveaux entrants dans l'agriculture (agriculteurs, conseillers, agro-distributeurs) utilisent des capteurs et d'autres systèmes numériques renforce encore cette perception (Lioutas and Charatsari, 2020).

De fait, la participation de l'ensemble de l'écosystème entourant l'agriculteur est essentielle. Cette « congruence des cadres » (Higgins and Bryant, 2020) crée un ensemble d'attentes similaires concernant le rôle de la technologie dans les processus d'appropriation même pour le numérique, où l'outil et les arguments pour le conseil deviennent centraux.

Ainsi, l'utilisation d'un outil numérique capable d'aider le conseiller et le producteur à gérer un agroécosystème de plus en plus complexe est proposé (Paris et al., 2019). Malgré la complexité induite par la transformation des systèmes avec plus de biodiversité, un pas supplémentaire doit être franchi via une prise de risque accrue dans le pilotage des agrosystèmes expérimentaux. L'implémentation de nouveaux leviers en combinaison et l'identification des règles de pilotage sont les choix retenus par les partenaires du projet pour des systèmes de production zéro pesticide. La stratégie mise en place par ASTREDHOR Sud-Ouest en station expérimentale et sur le site de l'horticulteur partenaire est centrée sur la gestion de deux ravageurs : les thrips et les pucerons. Ces bioagresseurs représentent en effet la menace principale sur le rendement et la qualité des plantes en pot produites. Pour le CREAM et l'ARMEFLHOR le cortège de bioagresseurs est diversifié, la protection des cultures est globale.

2. Matériel et méthodes

Le projet 2.ZERHO vise à réduire significativement le recours aux pesticides chimiques dans la continuité du projet OTELHO. Pour y parvenir, il propose de contribuer à l'amélioration et à l'acceptation des stratégies de protections dites alternatives via le développement d'un outil d'aide à la décision et le test de nouvelles combinaisons de leviers de biocontrôle. Les pesticides de synthèse ne peuvent être employés qu'en ultime recours. Dans les systèmes de production horticole ornementaux, la décision est par nature trop complexe pour être traduite en règles de décision simples et l'usage d'outils pour le diagnostic à fin d'anticipation est préconisé.

La re-conception des systèmes de production horticole passe à la fois par le test de situations de production dite « zéro pesticides » (prise de risque maximale) et par l'analyse holistique de ces systèmes expérimentés. La mise en place d'un processus d'appropriation des innovations incluant l'usage de l'outil d'aide à la décision est aussi proposée au sein des sites producteurs par l'intermédiaire de conseillers et expérimentateurs agricoles, composante essentielle de tout système d'innovation agricole.



2.1. Un réseau d'expérimentation « stations et producteurs »

S'appuyant sur l'expérience acquise lors du projet OTELHO (Paris et al., 2015) les partenaires poursuivent l'activité expérimentale en s'appuyant sur 3 sites de stations expérimentales pour tester des schémas de production « Zéro pesticides » (ASTREDHOR Sud-Ouest, CREAM de la Chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes et ARMEFLHOR) (Figure 1) et 3 sites de producteurs pour implémenter de nouveaux leviers dans une « Protection Intégrée des Cultures ». (Figure 12)



ASTREDHOR Sud-Ouest
(Potées fleuries de printemps)



CREAM de la Chambre d'agriculture
(Gerbera fleurs coupées)



Station ARMEFLHOR
(Rosiers fleurs coupées)

Figure 12 : Sites des stations expérimentales (©UMT FioriMed)

2.2. Des combinaisons de leviers en évaluation

Le **Tableau 1** expose les stratégies utilisées par les 3 partenaires du projet dans leurs systèmes respectifs.

Tableau 9 : Synthèse des leviers mis en place

ARMEFLHOR	ASTREDHOR Sud-Ouest	CREAM Chambre d'agriculture
Ecrans d'ombrage ;	Vide sanitaire entre les cultures ;	Introduction de macroorganismes en fonction des bioagresseurs cibles ;
Aération latérale, avec suppression du caractère insect-proof ;	Réseau de piégeage de lépidoptères et de ravageurs ailés ;	Application de biostimulants (Quicelum, BCP BO3, Biplantol) ;
Traitements de biocontrôle ;	Suivi hebdomadaire des cultures avec adaptation des interventions au niveau de pression observé ;	Application de produits de biocontrôle (Lepinox, Xentari, Eradicoat, Spruzit EC Pro) ;
Emploi de nouveaux auxiliaires spécifiques ;	Lâchers de macroorganismes ;	Brumisation et aération ;
Appât biocide à fourmis fait maison ;	Traitements de biocontrôle ;	Maintien des macroorganismes avec le nourrissage et plantes de services.
Maintien des macroorganismes avec le nourrissage et plantes de services.	Maintien des macroorganismes avec le nourrissage et plantes de services.	

Les combinaisons de leviers utilisées sont analysées au regard de l'enregistrement des données épidémiologiques avec un outil numérique dédié (S@M puis Baco), en mesurant l'évolution des dynamiques de population des bioagresseurs. L'enregistrement sous tableur des données liés aux interventions (IFT, temps passé et nombre d'intervention, coût des produits, des macroorganismes, du nourrissage) et les données de production (rendement et qualité commerciale) permet d'évaluer la viabilité technico économique des systèmes.

2.3. Un outil pour intégrer les résultats expérimentaux et pour l'aide au diagnostic

Dans le cadre du projet 2.ZERHO, l'usage du numérique avec l'outil d'aide à la décision Baco repose sur la mise en place d'une méthodologie et sa prise en main accompagnée dans le cadre de dispositifs

expérimentaux. Les systèmes préconisés dans le cadre de DEPHY montrent que ce genre de technologie numérique est compatible avec l'agriculture de précision lorsque la conception des outils et leur utilisation est centrée sur les utilisateurs et accompagnée par des professionnels du conseil voire de l'expérimentation. Ainsi, l'utilisation du numérique dans ce cadre est acceptable par les producteurs qui intègrent le numérique comme un outil utile à leur métier (Gardezi and Stock, 2021).

Le numérique offre la possibilité de capturer, de gérer et d'échanger des informations inaccessibles auparavant. Nous pensons que l'usage d'outils numériques coconçus avec les utilisateurs permettra d'amplifier la transition agroécologique via le pilotage des combinaisons de leviers. Cet usage a été développé par l'UMT FioriMed², dans un premier temps avec la plateforme S@M (Robert et al., 2017) conçue pour saisir, analyser et mettre en perspectives des données de suivis épidémiologiques selon des protocoles s'appuyant sur le quicksampling. Dans un deuxième temps, l'équipe projet s'est réorientée vers une application métier qui permet aux conseillers de réaliser des diagnostics éclairés pour la prise de décision d'intervention. La méthodologie de travail mise en œuvre dans le projet s'appuie sur des ateliers de coconception avec les expérimentateurs et les conseillers des territoires du projet et une phase de bêtestest en situation réelle sur les sites expérimentaux puis sur les sites producteurs.

3. Résultats et discussion

3.1. Trois systèmes de cultures horticoles pour expérimenter le zéro pesticide

3.1.1. La succession de plantes en pot dans le Sud-Ouest

Sur les sites station et producteur, la lutte combinée contre les thrips inclut les lâchers d'acariens *Amblyseius swirskii* et *Transeius montdorensis*, des prédateurs des thrips aux premiers stades larvaires (Maugin, 2021). Un travail important a été réalisé sur le nourrissage des auxiliaires prédateurs *Amblyseius*. L'intérêt du pollen, comme apport ou par le biais de plantes de services, a été montré au cours du projet OTELHO pour le cyclamen. Au cours du projet 2.ZERHO, les combinaisons de lâchers d'acariens prédateurs et de nourrissage avec des acariens proies ont été testées et comparées (**Figure 2 et Tableau 2**). L'acarien prédateur *A. montdorensis* a été sélectionné car aussi efficace que *A. swirskii* mais moins coûteux. Le produit de nourrissage employé dans un premier temps était composé de l'acarien proie *Carpoglyphus lactis*. Dans un deuxième temps cet apport est complété par des cystes d'*Artemia* (nourrissage mixte) pour réduire le nombre d'apports.

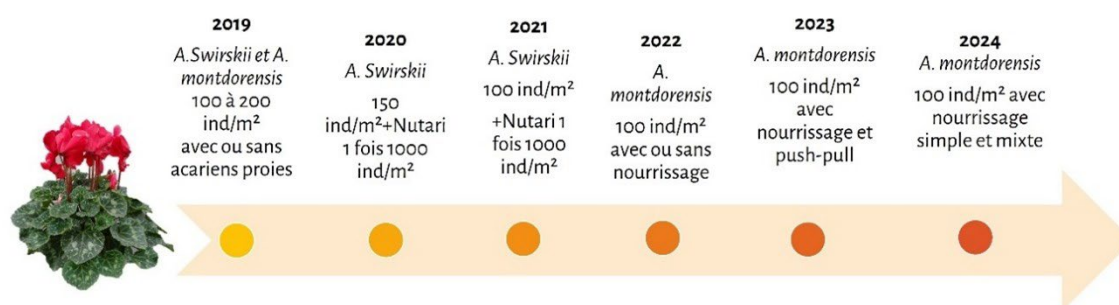


Figure 13 : Chronologie de l'exploration de la fréquence, de la quantité des apports (auxiliaires, nourrissages), de la source d'alimentation et de l'espèce d'auxiliaire employés

Une autre pratique mobilisée pour la lutte contre les sources de thrips dans 2.ZERHO est l'installation de bandes engluées, en pourtour de cultures couplées à des attractifs pour le piégeage (bandes bleues) et sur les chariots de stimulation mécanique (bandes jaunes). Ces bandes engluées ont permis de limiter les populations de thrips s'introduisant sur les parcelles de production et de piéger en culture



les thrips volants dérangés par la stimulation mécanique. Ces techniques permettent de réduire la population de thrips adultes.

Tableau 10 : Coûts de la lutte par introduction d'acariens et nourrissages en 2022 et 2023, pour la culture de cyclamen de la station expérimentale d'ASTREDHOR Sud-Ouest

Apports en vrac A. montdorensis	100 ind/m ²	200 ind/m ²	100 ind/m ² + acariens proies	200 ind/m ² + acariens proies	100 ind/m ² + acariens proies + <i>Artemia spp</i>
Coût produit	0,87 €/m ²	1,75 €/m ²	1,02 €/m ²	1,9€/m ²	0,78 €/m ²
Coût main d'œuvre Base 25€/h	0,27 €/m ² pour 7 apports		0,5 €/m ² pour 13 apports		0,23 €/m ² pour 6 apports
Coût stratégie	1,14 €/m ²	2,02 €/m ²	1,52 €/m	2,4 €/m ²	1,01 €/m ²

La gestion des ravageurs pour les cultures de printemps se base principalement sur le diagnostic et les lâchers de macroorganismes, l'objectif de supprimer l'IFT chimique est partiellement atteint (**Figure 14** : Evolution de l'IFT en plantes en pots, sur la station expérimentale d'ASTREDHOR Sud-Ouest, pour les annuelles fleuries de printemps (pétunia, gazania, tagètes, calibrachos...) et le cyclamen en été.). En effet, des traitements chimiques ont été nécessaires en fin de culture afin de réduire la pression des pucerons sur les plantes destinées à la vente. Les IFT sur la culture d'été sont quant à eux essentiellement dus aux traitements en biocontrôle à base de *Bacillus Turingiensis* (BT) destinés à lutter contre les chenilles terricoles. Les applications de BT ont augmenté en 2023, saison marquée par la présence des chenilles, en raison de la mise en place tardive de l'élevage d'*Atheta coriaria*, sans limiter complètement les dégâts.



Figure 14 : Evolution de l'IFT en plantes en pots, sur la station expérimentale d'ASTREDHOR Sud-Ouest, pour les annuelles fleuries de printemps (pétunia, gazania, tagètes, calibrachos...) et le cyclamen en été.

3.1.2. Le gerbera hors sol fleurs coupées en climat méditerranéen

La mise au point d'une stratégie de protection sanitaire pour un agrosystème économiquement et écologiquement performant est particulièrement ardue sur gerbera voire dans l'impasse (Paris et al. 2019). L'exigence du « zéro défaut » sur cette culture à cycle long rend la gestion du cortège de bioagresseurs délicate. La stratégie employée sur le site d'expérimentation du CREAM est de réaliser un essai système sans aucune utilisation de produits de synthèse.

Les lâchers combinés de prédateurs (Figure 4) et de parasitoïdes sont utilisés pour gérer un large panel de ravageurs (thrips, acariens, pucerons et aleurodes). Différentes stratégies de lâchers ont été

employées : de manière préventive en début de culture, puis à l'apparition de foyers d'infestation et aux pics de population. Les lâchers de la punaise prédatrice *Macrolophus pygmaeus* sont effectués sur la culture et sur les plantes de service (*Salvia dorisiana* et *Calendula officinalis*).



Figure 4 : *Macrolophus pygmaeus* (Source : ©Philippe Lebeaux)

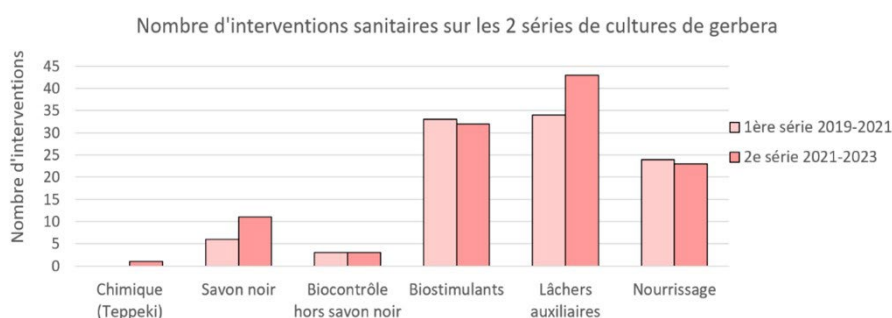


Figure 5 : IFT et nombre d'interventions sur la culture de gerbera de la station expérimentale du CREAM

L'introduction et la conservation des auxiliaires pour la régulation des populations de bioagresseurs est un point central des interventions de protection des cultures, avec en moyenne 38,5 lâchers d'auxiliaires et 23,5 nourrissages avec acariens proies par série (**Figure 5**). L'objectif zéro pesticides est atteint sauf sur une série, faute de résultats avec les solutions alternatives sur puceron. Les rendements (qualité et quantité) et le coût des macroorganismes pour la protection des plantes (**Tableau 3**) remettent en question la viabilité économique du système gerbera « fleurs coupées ».

Tableau 11 : Rendements et coûts de la protection

Série complète	Nombre moyen mensuel de tiges par plant	Part de déchets	Coût de la protection par tige (en €)	Part du coût des auxiliaires
2019-2021	3,8	22%	0,015	82%
2021-2023	3,3	40%	0,024	92%

3.1.3. Le rosier fleurs coupées en climat tropical

A la Réunion, la stratégie de protection englobe plusieurs leviers mis à l'épreuve pour une gestion proactive des bioagresseurs. Pour la plupart des ravageurs et maladies, l'objet n'est pas d'éradiquer la problématique mais de la contrôler pour maintenir la qualité des fleurs et ne jeter aucune tige.

Certains ravageurs, comme le *Thrips hawaiiensis*, nécessitent cependant une attention plus particulière car un seul individu dans la fleur entraîne des nécroses et son déclassement. Des effleurages et effeuillages sont ainsi effectués dès leur identification.



Les équilibres biologiques dans les parcelles sont favorisés par la gestion du climat de la serre. Les rosiers sont brumisés en période sèche, une aération latérale est mise en œuvre en saison chaude et humide. L'enherbement dans la culture et des bordures de parcelle, ainsi que la taille décalée dans le temps et l'espace des rangs de rosier régulent la température et l'hygrométrie. Cette stratégie prophylactique permet de contenir l'oïdium, la rouille et le mildiou à moindre coût. Les fêtes de fin d'années et la fête des mères sont deux périodes charnières pour la vente de roses coupées. Les résultats de qualité en Figure 5 chez le producteur partenaire montrent, en moyenne sur les 5 années, que les pertes sont très faibles à ces deux périodes charnières.

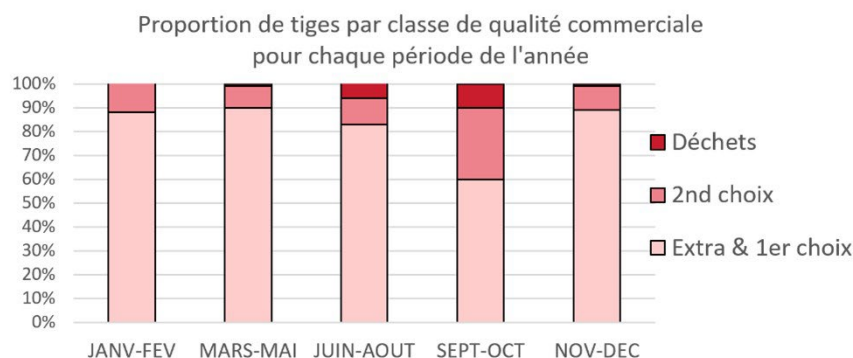


Figure 6 : Qualité commerciale de la production pour chaque période (en %) – moyenne sur 5 années de projet, de 2019 à 2023

L'objectif de réduction des IFT est atteint (**Figure 7**). La conduite de la PBI (Protection biologique intégrée de conservation) implique de favoriser les conditions d'implantation et de maintien des auxiliaires : hygrométrie, température, habitat, nourriture. La qualité des tiges obtenue est assez satisfaisante, à condition de tolérer des pertes raisonnables (20% de tiges déclassées). Des suivis épidémiologiques réguliers s'imposent pour piloter la culture et limiter les pertes économiques. La fourniture commerciale d'auxiliaire est récente sur l'île de La Réunion, nous restons donc en cours d'acquisition des références sur les coûts comparés de la PBI et de la protection conventionnelle avec la montée en puissance de la coopérative de fourniture d'auxiliaires « la Coccinelle ».

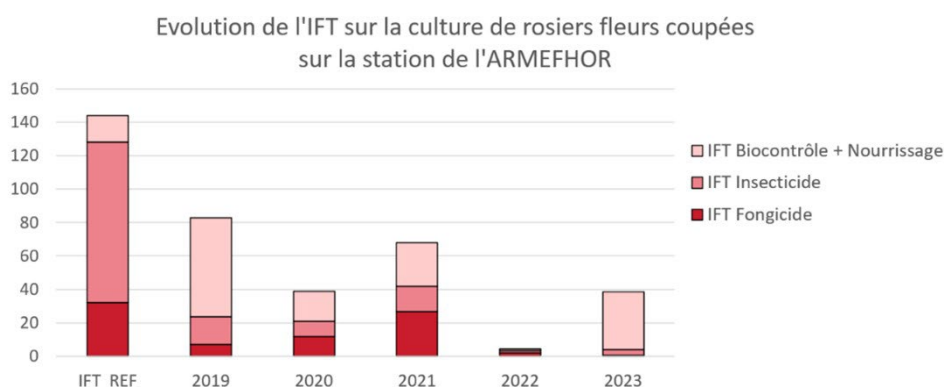


Figure 7 : Evolution de l'IFT en rosier fleurs coupées, sur le site du producteur partenaire de l'ARMEFLHOR, et comparaison avec l'IFT de référence (noté IFT REF2013)

3.2. Le transfert en entreprise

3.2.1. DEPHY FERME Sud-Ouest horticulture : un bon réseau pour le transfert ?

Les partenaires d'ASTREDHOR Sud-Ouest animent en parallèle des essais pilotés un groupe DEPHY Ferme engagé dans la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires. Les 10 exploitations agricoles, situées entre la Nouvelle-Aquitaine et l'Occitanie, produisent principalement des plantes en



pots. L'animatrice encadre ce groupe au moins trimestriellement, et un suivi individuel est réalisé, 2 à 8 fois par an, complété par un bilan annuel de la campagne (problèmes rencontrés, réussites, points d'amélioration, points diverses...).

Les producteurs sont ouverts à la PBI, « tant que celles-ci ne sont pas chronophages, et qu'elles optimisent leurs moyens de lutte contre les bioagresseurs » Doïna Njike, animatrice du groupe DEPHY Ferme horticulture Sud-Ouest. Confrontés à l'impasse des insecticides pour lutter contre les thrips et en quête d'alternatives, ils ont bénéficié des stratégies mises au point en parallèle dans le cadre du projet 2.ZERHO. Les résultats encourageants en station comme en conditions réelles chez le producteur partenaire, rassurent les horticulteurs face aux risques sanitaires et économiques encourus. Les différentes pratiques testées avec 2.ZERHO ont été mises en place au sein du groupe DEPHY FERME

L'intégration de chacun de ces leviers dans la stratégie concerne au moins 2 producteurs, et parfois plus de la moitié d'entre eux. Les conditions de cultures, les moyens disponibles et les conditions météorologiques varient entre les stations d'expérimentation et les entreprises. Certains leviers ne sont simplement pas applicables en entreprise, comme l'utilisation d'un chariot de thigmomorphogénèse dans la lutte combinée lorsque les serres ne sont pas adaptées à ce type d'équipement.

Le catalogue du fournisseur habituel de l'entreprise peut impacter les espèces d'auxiliaires disponibles, la source de nourrissage complémentaire, leur conditionnement ou encore leur prix. Ainsi, il est nécessaire que les résultats en termes d'efficacité et de coût réalisés pendant l'expérimentation 2.ZERHO soient adaptés et réévalués chez les producteurs. En parallèle, l'animatrice réalise des diagnostics et des préconisations de routine sur les entreprises DEPHY Ferme avec l'outil Baco. Cette application numérique assure des retours rapides des visites pour appliquer les mesures le plus rapidement possible.

Ce suivi a déjà permis d'abaisser les IFT insecticides chimiques pour les exploitations du groupe. Concrètement, les changements débutent par une substitution des produits phytosanitaires par des produits de biocontrôle. L'utilisation des autres leviers proposés nécessite une réorganisation des pratiques (répartition des temps de travail, des coûts des intrants). Le déploiement de la PBI se fait donc graduellement, mais impacte progressivement par son efficacité.

3.2.2. L'initiative réunionnaise : un modèle à reproduire ?

Le territoire réunionnais s'avère être un exemple de réussite du transfert de la PBI en horticulture. La Réunion est en proie à des contraintes et pressions de bioagresseurs singulières liées à son isolement géographique, son caractère insulaire, ses conditions bioclimatiques contraignantes. Ces conditions spécifiques rendent difficile l'appropriation et la mise en œuvre par les producteurs réunionnais des principes de la PBI mis au point dans le contexte de la France continentale.

L'institut technique a bénéficié de l'expertise du réseau national de partenaires pour l'amélioration de ses compétences techniques en PBI. Les techniques éprouvées en métropole ont ainsi d'abord été adaptées dans le contexte réunionnais à la production de rosiers fleurs coupées. Les résultats en culture de rosier s'avèrent concluants en termes de protection en station expérimentale. Ils présentent également une bonne viabilité économique pour le producteur partenaire de ces 6 années d'essais.

Grâce à ces résultats encourageants, le pôle horticulture de l'ARMEFLHOR, qui jouit d'un lien durable avec les horticulteurs de la Réunion, est intervenu dans la dissémination de ces stratégies et compétences à d'autres cas de figures horticoles (cultures, conduites, publics et microclimats diversifiés de l'île).

De plus en plus de producteurs sont concernés directement par le transfert. Trois producteurs de chrysanthèmes fleurs coupées et potées fleuries ont expérimenté la PBI en 2022, rejoints en 2023 par un exploitant de bégonia à Bassin Plat. Le transfert s'opère dans le réseau par le biais des animatrices



du Groupe d'intérêt économique et environnemental (GIEE) de l'Union des horticulteurs et pépiniéristes de la Réunion (UHPR) et du GIEE de Salazie, mais aussi directement entre producteurs.

La gestion du thrips en culture de chrysanthèmes avec les protocoles inspirés de 2.ZERHO, avec la punaise prédatrice endémique *Nesidiocoris volucer* (**Figure 8**) a permis d'arrêter l'utilisation des insecticides chimiques de synthèse depuis 2020 sur les exploitations professionnelles.



Figure 8 : Lâchers de *Nesidiocoris volucer* sur tabac dans une parcelle de producteur réunionnais (©ARMEFLHOR)

3.2.3. Des freins persistants dans les modèles de transition

Aujourd'hui, les producteurs sont largement conscients des effets des pesticides sur leur santé. Cela constitue une grande motivation pour amorcer le chemin du changement de pratiques. Toutefois, des verrous persistent pour la généralisation de pratiques plus douces.

Les verrous que nous avons rencontrés sont d'ordre socio-économique avec les coûts des intrants de la protection des cultures (macroorganismes, nourrissage...), le remodelage de l'exploitation avec un impact sur la main d'œuvre (formation, rotation des personnels), l'historique chargé des parcelles ou la rémanence met à mal les stratégies avec macroorganismes, enfin la réceptivité des marchés à des productions pas nécessairement zéro défauts doit être évaluée.

Des verrous d'ordre territoriaux (distances, accessibilité, aspects climatiques) rendent la mise en place de stratégies sur les exploitations plus complexe. Par exemple l'introduction d'auxiliaires de cultures peut s'avérer complexe suivant le contexte territorial et la fourniture d'auxiliaires, la viabilité des lâchers d'auxiliaire peut être impactée par le transport et le conditionnement, surtout en contexte de changement climatique.

En conséquence, l'accompagnement semble être le fil conducteur pour une bonne réussite des pratiques en rupture où un échec individuel peut bloquer l'appropriation par le groupe.

3.2. Les éléments clés du pilotage zéro pesticide

3.3.1. Les règles de décision

Des **règles de décision mono-bioagresseur** ont été coconstruites en ateliers. Elles s'avèrent insuffisantes pour le pilotage de systèmes complexes où la biodiversité recherchée, et où les interactions entre bioagresseurs, biodéfenseurs et conditions abiotiques sont difficiles à appréhender. Les exemples de gestion du thrips en **Figure 9** montrent cette complexité.

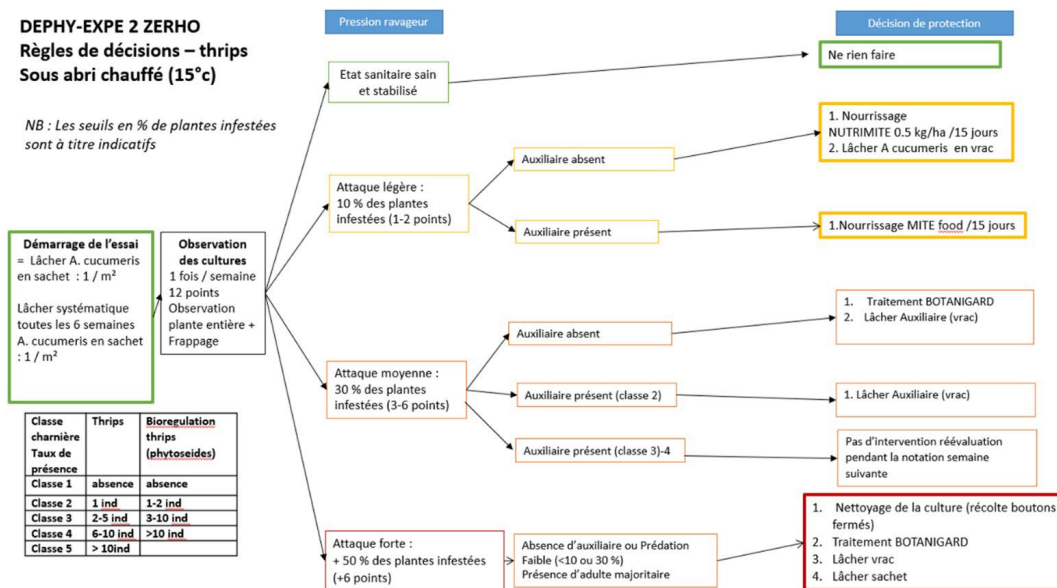


Figure 9 : Exemples de règles de décision coconstruites - Culture de gerbera

Les règles de décision mono-bio-agresseur constituent un vrai travail d'expertise mais elles n'en sont pas pour autant exploitables en l'état et en temps réel : elles ne prennent pas en compte les interactions entre bioagresseurs, entre biodéfenseurs et entre bioagresseurs et biodéfenseurs. De ce fait, des ajustements hebdomadaires sont souvent nécessaires en fonction de ce qui se passe dans la « vraie vie ».

Cette méthodologie qui décortique et formalise un fonctionnement pour un bioagresseur constitue un excellent outil d'animation de groupe producteurs et d'apprentissage et de formation pour la mise en place de la protection intégrée des cultures sur les exploitations. Elle ne prend pas en compte la complexité des interactions, augmentée du fait d'une gestion agroécologique qui réintroduit de plus en plus de biodiversité pour atteindre un équilibre biologique sensible à trouver et maintenir.

Les partenaires ASTREDHOR, ARMEFLHOR, INRAE et la Chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes ont organisé un séminaire de clôture du projet 2.ZERHO les 21, 22 et 23 octobre 2024. Celui-ci s'est tenu à la Réunion et a été accueilli par l'ARMEFLHOR. Les trois journées se sont organisées autour de sessions de partage des résultats et d'ateliers d'échanges. Trois thèmes ont été abordés au cours d'un atelier sur les règles de décisions, qui ont mené à trois pistes de réflexion pour l'avenir :

Thème 1. Identification des freins à l'adoption de stratégies de lutte biologique à l'échelle parcellaire et territoriale : Il est important d'échanger sur les expériences communes et les freins communs, sur le lien entre producteur et conseiller, sur l'importance de la confiance et de la régularité dans les relations professionnelles.

Thème 2. Formalisation d'une règle de décision - méthode, cheminement et règle utilisable pour le pilotage : Outre l'importance des règles de décision pour le pilotage, il est essentiel de disposer d'un outil méthodologique, cadre pour structurer la réflexion et se poser les bonnes questions. La méthodologie employée au cours de cet atelier est celle de GECO, créée au sein du projet DECIllég.

Thème 3. Intérêt d'un réseau de surveillance et de règles de décisions pour la gestion sanitaire à l'échelle du territoire : Lorsqu'on change d'échelle, pour un territoire ou une filière, il peut être indispensable de s'outiller pour maintenir la communication et l'échange entre acteurs.



3.3.2. Baco, des fonctionnalités pour le pilotage

Le projet 2.ZERHO a débuté en utilisant un outil conçu par la recherche et adapté à la faveur de différents projets pour une utilisation sur le terrain (S@M). Cet outil centré sur l'expérimentation a été arrêté à mi-parcours du projet 2.ZERHO. Toutefois, les partenaires, manifestant un fort intérêt pour le pilotage des systèmes de cultures à l'aide du numérique, ont proposé de réfléchir à un outil centré sur l'accompagnement des professionnels.

Baco est une application métier conseil développée en 2022 par l'UMT FioriMed², co-financée dans le cadre des projet SESAME 2021-2024 et 2.ZERHO 2019-2024 pour sécuriser le conseil agroécologique et accueillie sur les serveurs gérés par l'UMR Institut Sophia Agrobiotech. Cet outil d'accompagnement permet de tracer, de mettre en exergue et d'enregistrer les méthodes alternatives utilisées concourant à la réduction de l'usage des pesticides en horticulture. Il est maintenant le socle de l'aide à la décision pour différents publics professionnels.

Les acteurs du projet 2.ZERHO ont construit pour Baco des protocoles et interfaces de diagnostics de terrain harmonisés pour être robustes et fiables (**Figure 10**). Ils ont été adaptés aux besoins d'une observation rapide en exploitation et sont pertinents pour caractériser un état sanitaire à une date donnée selon une méthodologie inspirée des bulletins de santé du végétal.

Cette méthodologie a permis, en outre, la saisie de diagnostics parcellaires et culturels indispensables à l'élaboration d'une préconisation qui privilégie les méthodes de biocontrôle, tout en offrant la possibilité d'un ultime recours réglementaire. Cet outil, bêtesté par les partenaires sur les 2 dernières années du projet 2.ZERHO, a été créé pour faciliter le travail des interlocuteurs de terrain et accroître la mise en œuvre des pratiques agroécologiques en s'intéressant à un métier charnière dans l'appropriation des innovations numériques et en matière de biocontrôle : le conseiller.

Les fonctionnalités de Baco permettent l'**export** d'un ensemble de **documents** : tableaux qui permettent de **générer des indicateurs pour l'évaluation et le pilotage** des systèmes en zéro-pesticide, cartographies d'épidémiosurveillance de territoires couverts par les utilisateurs d'une même entreprise, bilans d'entreprise pour éclairer les choix à réaliser face à diverses situations épidémiques. Depuis le début de l'année 2024, le suivi des horticulteurs du groupe DEPHY Ferme Nouvelle-Aquitaine Occitanie se fait à l'aide de l'outil Baco pour l'évaluation de ce dernier.

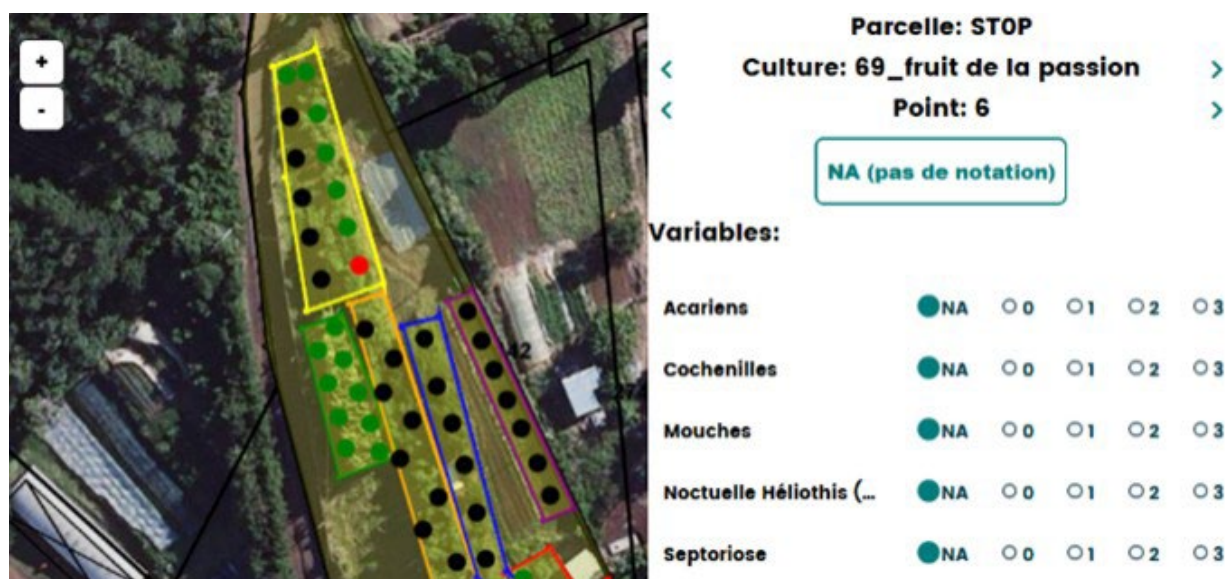


Figure 10 : Interface de diagnostic rapide adapté au conseil sur l'application Baco (à gauche), interface de notation avec plan d'échantillonnage sur l'application Baco (à droite)

4. Conclusion et perspectives

Du fait d'un important cortège de bioagresseurs, le suivi épidémiologique dans les différents systèmes de cultures spécialisés devient un élément crucial de la décision. Le projet 2.ZERHO l'a montré sur des systèmes horticoles. Les outils numériques de diagnostic permettent de gagner du temps, de l'efficacité et contribuent à la formation des utilisateurs professionnels (expérimentateurs, conseillers et producteurs) (Reboud et al., 2017).

Dans le cadre des technologies numériques, le rôle du conseiller doit passer d'une activité de front-office de collecte d'informations sur le terrain à une activité de back-office où les conseillers ajoutent leurs connaissances et compétences à des volumes croissants et variés d'informations (Eastwood et al., 2019). Les suivis avec Baco alimentent une base de données situationnelles et de préconisations d'interventions.

Le pilotage de systèmes économes en pesticides repose sur la sélection des auxiliaires adaptés au diagnostic, leur positionnement dans le temps et l'espace voire leur installation sur les parcelles ou à leurs abords.

Dans les études sur la transition agroécologique, la recherche académique et appliquée utilise la notion d'« espace protecteur » pour analyser comment de telles innovations émergent, se développent, survivent et déclinent au fil du temps (Smith and Raven, 2012). Les résultats techniques et économiques des travaux d'expérimentation conduits dans les espaces protégés du projet montrent des baisses significatives d'IFT sur toutes les cultures. Le biocontrôle et les biostimulants gagnent en importance en culture de cyclamen, de rosier et de gerbera.

La pérennisation de ces innovations sur le terrain constitue un enjeu à suivre. C'est pourquoi l'expertise des professionnels (producteurs-conseillers-expérimentateurs) est essentielle pour accompagner les mécanismes de l'adoption et de la pérennisation. Les innovations biotechniques doivent s'appuyer sur des données robustes et fiables, issues d'observations, de capteurs et de ressources collectées et sécurisées pour être exploitées par la communauté professionnelle. L'écueil de la marchandisation, évoquée par (Gardezi and Stock, 2021), et de ses conséquences sur l'adoption, pourra être évité en coconstruisant un bien accessible aux producteurs de données via un support favorisant la diffusion des innovations (Baco).



Ainsi, les instituts techniques ASTREDHOR et ARMEFLHOR proposent la création d'une structure de portage coopérative, conscients de la nécessité d'accompagner le changement en créant les conditions de la confiance. De nouveaux projets autour du numérique permettront d'enrichir Baco, outil conçu pour évoluer en intégrant de nouvelles fonctionnalités destinées à d'autres utilisateurs. La création d'un modèle économique innovant, de type coopératif, permettra de générer des fonds propres pour couvrir à minima les charges de maintenance et assurer la pérennité et la mise à disposition de l'outil au plus grand nombre : organismes de recherche appliquée, conseil et agriculteurs.

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont contribué à part égale à la conception et la rédaction. La relecture a été effectuée par RC et BP.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des équipes techniques et administratives des Instituts ASTREDHOR et stations, du CREAM de la Chambre d'Agriculture des Alpes-Maritimes, de l'institut ARMEFLHOR ainsi que de l'INRAE de Sophia-Antipolis pour leur participation.

Déclaration de soutien financier

Le projet 2.ZERHO est financé par l'Office Français de la Biodiversité via l'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture.

L'outil numérique Baco a été financé par les projets FranceAgriMer SESAME 2021-2024 et CasDAR SAMEDIT 2021-2024.

Références bibliographiques

- Bronson, K., 2019. Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming. NJAS - Wagening. J. Life Sci. 90–91, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.03.001>
- Eastwood, C., Ayre, M., Nettle, R., Dela Rue, B., 2019. Making sense in the cloud: Farm advisory services in a smart farming future. NJAS - Wagening. J. Life Sci. 90–91, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.04.004>



Gardezi, M., Stock, R., 2021. Growing algorithmic governmentality: Interrogating the social construction of trust in precision agriculture. *J. Rural Stud.* 84, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.03.004>

Higgins, V., Bryant, M., 2020. Framing Agri-Digital Governance: Industry Stakeholders, Technological Frames and Smart Farming Implementation. *Sociol. Rural.* - Wiley Online Libr. 60, 438–457. <https://doi.org/10.1111/soru.12297>

Lioutas, E.D., Charatsari, C., 2020. Smart farming and short food supply chains: Are they compatible? *Land Use Policy* 94, 104541. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104541>

Maugin E. 2021 Huiles essentielles : Quel potentiel répulsif pour lutter contre le thrips *Frankliniella occidentalis* en serre ? VEGEPHYL - La 12e Conférence Internationale sur les Ravageurs et Auxiliaires en Agriculture - 26 au 28 octobre 2021 - Montpellier SupAgro

Paris, B., Boll, R., Bout, A., Robert, F., Maugin, E., Drouineau, A., Denegri, T., Cabeu, I., Tragin, M., Poncet, C., 2015. Un réseau d'expérimentations et des outils télématiques innovants pour réduire l'usage des pesticides en horticulture.

Paris, B., Doise, S., Maugin, E., Fillâtre, 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. <https://doi.org/10.15454/JXIDXU>

Reboud, X., Carpentier, A., Aubertot, J.-N., Lemarié, S., Dubois Peyrard, N., Turenne, N., Roussey, C., Couture, S., Cellier, V., Gaba, S., Sabbadin, R., Cros, M.-J., Toquebeuf, P., Bonroy, O., Barbier, M., Charbonnier, E., 2017. Ce que l'épidémiosurveillance apporte ou n'apporte pas encore à la moindre dépendance aux produits phytopharmaceutiques. *Innov. Agron.* 59, 81–91. <https://doi.org/10.15454/1.5138439824957573E12>

Robert, F., Paris, B., Doise, S., Boll, R., Bout, A., Traguin, M., Maugin, E., Henry, S., Poncet, C., 2017. OAD Serre : Développement d'outils d'aide à la décision en cultures horticoles sous serres : vers une horticulture de précision. *Innov. Agron.* 55, 317–325. <https://doi.org/10.15454/1.5137793352797976E12>

Rose, D.C., Chilvers, J., 2018. Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming. *Front. Sustain. Food Syst.* 2. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087>

Smith, A., Raven, R., 2012. What is protective space? Reconsidering niches in transitions to sustainability. *Res. Policy* 41, 1025–1036.

Pour citer cet article : Bruno Paris, Roxane Calvaire, Léo Keraudren, Emilie Maugin, Doïna Njike, et al.. 2.ZERHO : Des combinaisons de leviers et un outil numérique en horticulture pour approcher le pilotage en zéro pesticide. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.44-57. [10.17180/ciag-2026-vol109-art04](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Réduire les herbicides en cultures de canne à sucre, à quel prix

Julien CHETTY¹, Marion SCHWARTZ^{2,3}, Mathias CHRISTINA^{2,4}, Alizé MANSUY¹

¹ eRcane, 29 rue d'Emmerez de Charmoy, BP60315, 97490 Sainte-Clotilde Cedex, La Réunion, France

² AIDA, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

³ CIRAD, UPR AIDA, 97743 Saint-Denis Cedex 9, La Réunion, France

⁴ CIRAD, UPR AIDA, F-34398 Montpellier, France

Correspondance : julien.chetty@ercane.re

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art05>

Résumé

La canne à sucre représente une culture essentielle à La Réunion, couvrant 54 % de la SAU en 2021, avec environ 2 700 exploitants. Cette culture semi-pérenne fait face à un problème majeur de gestion des adventices, qui peuvent entraîner des pertes de rendement significatives. Dans ce contexte, le projet CanécoH V2 avait pour objectif de réduire l'utilisation des herbicides tout en proposant des systèmes de culture viables. L'étude a évalué les performances de trois systèmes économes en herbicides pour la culture de la canne à sucre, dans 3 sites différents. Ces systèmes ont réduit l'Indice de Fréquence de Traitement Phytosanitaire (IFT) de 50 % par rapport au système conventionnel, tout en maintenant les adventices sous le seuil de nuisibilité (30 %). Les rendements en canne et la richesse en sucre sont restés globalement stables, bien qu'une légère baisse ait été observée. Cependant, l'adoption de ces systèmes complémentaires a entraîné une hausse significative des temps de travail (+127 à +174 %) et des charges (+53 à +139 %), principalement dues au désherbage manuel et à la gestion de la paille. Des ajustements sont donc nécessaires pour améliorer la viabilité économique de ces systèmes. Les résultats préliminaires montrent néanmoins qu'il est possible de réduire de moitié les quantités d'herbicides tout en maintenant une production optimale.

Mots-clés : Désherbage, réduction d'herbicide, Ecophyto, performance technico-économique, canne à sucre

Abstract: Reducing the use of herbicides on sugar cane, at what cost?

Sugarcane is a main crop in Réunion, covering 54 % of the UAA (Utilized Agricultural Area) in 2021, with around 2,700 growers. This semi-perennial crop faces a major challenge in managing weeds, which can lead to significant yield losses. In this context, the CanécoH V2 project aims to reduce herbicide use while proposing viable farming systems. The study evaluates the performance of three herbicide-efficient systems for sugarcane cultivation across three different sites. These systems reduced the Herbicide Frequency Treatment Index (HFTI) by 50 % compared to the conventional system, while keeping weed coverage below the damage threshold (30 %). Cane yields and sugar content remained generally stable, although a slight decrease was observed. However, adopting these alternative systems led to a significant increase in labor time (+127 to +174 %) and costs (+53 to +139 %), primarily due to manual weeding and straw management. Adjustments are therefore necessary to improve the economic viability of these systems. Preliminary results nonetheless show that it is possible to cut herbicide usage by half while maintaining optimal production.

Keywords: Weeding, herbicide reduction, Ecophyto, technico-economic, sugarcane



1. Introduction et contexte du projet

La canne à sucre, première filière agro-industrielle de l'île de La Réunion, joue un rôle essentiel sur les plans économique, sociétal et environnemental. En 2021, elle couvrait une superficie de 20 579 hectares, représentant 54 % de la Surface Agricole Utile (SAU) de l'île. Selon le dernier recensement agricole, le nombre d'agriculteurs exploitant la canne à sucre s'élevait à 2 700 sur 6 282 agriculteurs (Agreste, 2022). Malgré un contexte agricole de plus en plus contraint, la canne occupe une place centrale dans l'agriculteur et la vie socio-économique de La Réunion. Pourvoyeuse de nombreux emplois, la filière produit chaque année 185 000 tonnes de sucre et 115 000 hectolitres d'alcool pur de rhum. Ces produits figurent respectivement au premier et au troisième rang des exportations du territoire (Agreste, 2023).

La canne à sucre est une culture semi-pérenne récoltée tous les ans mais replantée tous les 15 ans en moyenne à La Réunion. Grâce à un programme d'amélioration variétale qui a débuté localement en 1929, les variétés cultivées aujourd'hui sont tolérantes ou résistantes aux principales maladies et ravageurs. Ainsi, l'une des principales contraintes de cette culture réside dans la maîtrise des adventices. En effet, des études ont montré que les pertes de rendement dues à la concurrence des adventices peuvent atteindre 200 à 500 kg de canne/ha/jour (Marnotte et al., 2008 ; Martin et al., 2013). Le climat tropical de l'île, caractérisé par des températures élevées et une forte pluviométrie, est particulièrement favorable au développement des adventices toute l'année (Schwartz et al., 2021). Leur maîtrise nécessite des interventions fréquentes et intensives pour assurer une production optimale.

La lutte chimique et le désherbage manuel restent aujourd'hui les principales pratiques utilisées pour gérer les adventices. Toutefois, la canne à sucre, en raison de l'importance de sa surface cultivée est la culture qui consomme la plus grande quantité de produits phytosanitaires sur l'île, en particulier des herbicides (Agreste, 2016). La réduction de l'usage des pesticides représente une attente forte des citoyens et une nécessité forte de préserver la santé et l'environnement. Ainsi, réduire les herbicides tout en maintenant les rendements constitue un enjeu majeur pour la filière canne à sucre à La Réunion (Antoir et al., 2016).

En réponse à ces attentes, eRcane (porteur du projet Dephy Expé) et ses partenaires (CIRAD, Chambre d'Agriculture) ont lancé, en 2019, une deuxième version du projet CanécoH inscrite dans le réseau Dephy Expé dans le cadre du plan Ecophyto. Ce projet, intitulé "CanécoH V2 : Canne à sucre Économe en Herbicides", visait à développer et tester des systèmes de culture économes en herbicides pour la canne à sucre à La Réunion, en s'appuyant sur les acquis de la première version du projet. Dans cette nouvelle version, divers leviers agronomiques ont été combinés pour maîtriser les adventices tout en réduisant l'Indice de Fréquence de Traitements Herbicides (IFT) : i) le choix variétal, ii) la gestion de la paille (fanage et épaillage), iii) les traitements chimiques localisés sur le rang, iv) l'utilisation de plantes de services en interrang, v) le désherbage mécanique en mécanisation classique et micro-mécanisation.

L'objectif principal de la V2 était d'atteindre une réduction de l'IFT de 75 à 100 %, tout en maintenant le recouvrement des adventices sous le seuil de nuisibilité, ainsi que les niveaux de rendement et de richesse en sucre comparables à une gestion conventionnelle. En outre, cette deuxième phase du projet évaluait également les temps de travail et les coûts associés aux systèmes étudiés, afin de proposer des solutions adaptées aux planteurs de l'île.

2. Matériels et méthodes

2.1. Dispositif expérimental

Trois essais pérennes ont été conduits entre 2017 et 2024 sur trois sites distincts : deux sur la station expérimentale de La Mare (sites P25 et P42) et un sur une exploitation agricole (FTN) (**Tableau 12**).



Les sites expérimentaux P25 et P42 sont situés à 50 m d'altitude, à La Mare dans la commune de Sainte-Marie, sur l'île de La Réunion. L'irrigation se fait par aspersion, garantissant une gestion homogène de l'eau sur l'ensemble des parcelles expérimentales. Le site FTN est implanté sur une exploitation agricole au lieu-dit Cratère, dans la commune de Saint-Benoît, à La Réunion. L'essai est mené en co-conception avec l'agriculteur, ce qui reflète les conditions de production réelles de l'agriculteur.

Tableau 12 : Caractéristiques des sites d'essai

Site	Lieu-dit (Commune)	Pluviométrie et température moyenne	Altitude	Système d'irrigation	Années d'étude
FTN	Cratère (Saint Benoît) : 21°02'51.00"S ; 55°40'56.66"E	2396 mm 22,7 °C	170 m	Pluviale	2017-2021
P25	La Mare (Sainte-Marie) : 20°54'7,40"S ; 55°31'52,65"E	1333 mm 24 °C	50 m	Aspersion	2018-2023
P42					2019-2024

Ces sites font partie du réseau d'essais du projet CanécoH V2 qui compte au total 7 sites. Sur chaque site, des systèmes de culture visant une réduction des herbicides ont été expérimentés et comparés à un système conventionnel (Conv). Ces systèmes ont testé diverses combinaisons de leviers pour la maîtrise des adventices. Dans cet article, seuls les résultats de trois systèmes de culture seront présentés. Les systèmes étudiés sont les suivants :

- Méca_IR : un système utilisant le désherbage mécanique en interrang de la canne (IR), réalisé au moyen d'un microtracteur équipé de divers outils de fauche et de travail du sol. Ce système a été testé sur les sites P25 et P42 ;
- PDS_IR : un système intégrant la plante de services (PDS) *Canavalia ensiformis* semée mécaniquement en interrang. Ce système a été mis en place sur les sites P25 et FTN ;
- Système 0_herb : un système excluant totalement l'usage d'herbicides, testé sur le site P42.

Les différents leviers mobilisés pour chaque système sont résumés dans le Tableau 13. Les essais étaient composés de dispositifs expérimentaux en blocs de Fisher avec deux parcelles élémentaires (répétitions) pour chaque système (Tableau 14). Le choix des variétés a été fait selon les recommandations du service Création variétale d'eRcane. Tous les essais ont été fertilisés et irrigués par aspersion au potentiel sauf pour le site FTN où la parcelle était en pluvial.

Tableau 13 : Leviers d'action mobilisés sur chaque système

Levier d'action mobilisé	Date ou seuil d'intervention	PDS_IR	Méca_IR	0_herb	Conv
Fanage de paille	Juste après récolte de la canne	oui (excepté FTN)	oui	oui	oui
Traitement chimique localisé sur le rang de canne	Prélevée après plantation ou récolte Postlevée appliqué lorsque recouvrement du sol par les adventices ≥ 30 %	rang de canne (pas de postlevée sur P25)	rang de canne	-	rang et interrang
PDS en interrang	Semis à 1,5 mois après récolte de la canne	Oui	-	-	-



Désherbage mécanique	Seuil : ≥ 30 % de recouvrement du sol par des adventices	Interrang (si nécessaire, avant le semis de la PDS)	interrang	interrang	-
Epaillage*	Entre 6 et 8 mois après récolte de la canne	Oui	oui	oui	-
Désherbage manuel	En rattrapage et/ou pour certaines espèces difficiles à gérer	Oui	oui	oui	oui

* Epaillage : consiste à arracher les feuilles sèches des tiges de canne et en même temps, d'éliminer manuellement les mauvaises herbes résiduelles.

Tableau 14 : Descriptif des essais

Sites étudiés	Variété de canne	Nombre d'années d'étude	Nombre de répétition			
			Conv	Méca_IR	PDS_IR	0_herb
FTN	R579	4	3	-	2	-
P25	R579	6	2	2	2	-
P42	R587	5	2	2	-	2

2.2. Performances des systèmes

2.2.1. Performance environnementale

La performance environnementale des systèmes a été évaluée à l'aide de l'IFT et comparée à celle du témoin conventionnel (Conv) sur chaque site. Pour cela, les quantités d'herbicides utilisées ont été enregistrées, permettant le calcul de l'IFT pour chaque système. L'objectif du projet était ambitieux : atteindre une réduction de 75 % à 100 % de l'IFT par rapport au système conventionnel (Conv).

2.2.2. Performances agronomiques

- Maîtrise des adventices

Pour évaluer la maîtrise de l'enherbement des systèmes, le recouvrement du sol par les adventices a été mesuré tous les mois sur le rang et l'interrang de la canne selon une échelle de notation visuelle linéaire allant de 0 à 100 % (Mansuy et al., 2019 ; Christina et al., 2021). Après le 7^e mois, la canne étant fermée, les notations ont été faites tous les 2 mois. L'objectif était de maintenir le recouvrement des adventices sous les 30 %, qui correspond au seuil de nuisibilité choisis dans le cadre de ces études (Mansuy et al., 2019).

- Le rendement en canne et la richesse en sucre

Une semaine avant la récolte des cannes, 9 cannes usinables (tiges de cannes où la partie végétative, non sucrée, a été supprimée) ont été prélevées par parcelle élémentaire. Un échantillon de 3 cannes reconstituées a été réalisé comme suit : le premier tiers de la partie supérieure de 3 cannes, le tiers du milieu de 3 autres cannes, et le dernier tiers des 3 dernières cannes, ont été prélevés. Cet échantillon a été ensuite envoyé au laboratoire d'eRcane, afin de prédire la quantité de sucre extractible des tiges (méthode du NIRS) (Rouselle, 2015). A la récolte (12 mois), les cannes des deux lignes centrales des parcelles élémentaires ont été coupées manuellement ou avec la coupeuse péi et pesées à l'aide d'un peson hydraulique.

2.2.3. Performances technico-économiques

La performance technico-économique des systèmes a été évaluée à travers l'analyse des temps de travail et des charges associés aux différents leviers mis en place pour la maîtrise des adventices. Pour cela, l'itinéraire technique de chaque système a été rigoureusement enregistré, incluant le nombre d'interventions mécaniques, manuelles ou chimiques.

Les temps de travail et les coûts de chaque opération ont été déterminés à l'aide de l'outil OTECAS, développé par le réseau RITA Canne (disponible en ligne : <https://coatis.rita->



dom.fr/wakka.php?wiki=RechercheFacette&q=otecas&facette=) et déjà utilisé dans le cadre d'études précédentes (Soulé et al., 2024). Dans la présente étude, le choix a été fait de présenter uniquement les charges des systèmes, afin d'évaluer l'impact du changement de pratiques.

2.3. Analyses statistiques

Les données des 4 systèmes ont été regroupées pour chaque indicateur de performance afin d'être analysées globalement. Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée à l'aide du logiciel Xstat pour évaluer l'effet du site, du système et de leur interaction (site × système). Toutes les ANOVA incluaient ces trois facteurs afin de prendre en compte les éventuelles influences spécifiques liées au site et à l'interaction entre le site et le système.

3. Résultats et discussion

3.1. Une réduction de l'IFT de 50 %

La performance environnementale des systèmes étudiés a été évaluée à l'aide des résultats d'IFT. La Figure 15 présente les valeurs d'IFT des systèmes sur l'ensemble des sites et des années d'étude. À noter que le système 0_herb (IFT = 0) n'est pas inclus dans cette figure. L'analyse de variance a montré un effet significatif des systèmes ($p < 0,0001$), mais aucun effet significatif des sites ($p = 0,531$) ni de l'interaction site × système.

Parmi les systèmes étudiés, le système conventionnel a enregistré les valeurs d'IFT les plus élevées, allant de 2,3 à 6,7 avec une moyenne de 4,8 pour l'ensemble des sites. En revanche, les systèmes économes en herbicides ont montré des valeurs d'IFT inférieures à 3.

- Système Méca_IR : L'IFT moyen a été de 3 pour le site P25 et de 2,1 pour le site P42, soit une moyenne de 2,5 pour une réduction de l'IFT de 50 % par rapport au conventionnel ;
- Système PDS_IR : L'IFT moyen a également été de 3 pour le site FTN et de 2,1 pour le site P25, soit une moyenne de 2,6 pour une réduction de l'IFT de 50 % par rapport au conventionnel. Les valeurs d'IFT pour ces systèmes ont varié entre 0,4 et 3,7. La variabilité observée peut s'expliquer par deux principaux facteurs :
 1. La variabilité entre sites : par exemple, le site FTN présentait une dynamique d'enherbement différente par rapport aux autres sites liée aux conditions pédoclimatiques ;
 2. Les changements de pratiques : sur le site P25, une modification des pratiques a été introduite en cours d'étude pour le système PDS_IR. À partir de la 3^{ème} repousse de la canne (3^{ème} année), les traitements de post-levée ont été remplacés par un arrachage manuel ciblé principalement sur le rang de cannes. Cette modification a entraîné une réduction de l'IFT de cette modalité, qui est passée sous la barre de 2 dès cette repousse.

Globalement, les réductions de l'IFT ont atteint -50 % pour les systèmes Méca_IR et le système PDS_IR. Bien que ces réductions ne remplissent pas l'objectif ambitieux du projet de -75 %, elles restent significatives et s'inscrivent pleinement dans les objectifs du plan Ecophyto II+, qui vise une diminution de -50 % des traitements phytosanitaires d'ici 2025 (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018).

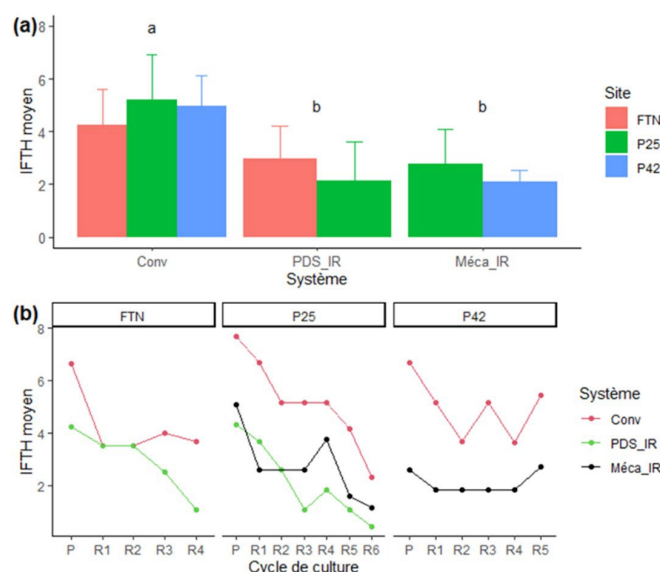


Figure 15 : Indice de fréquence de traitement en herbicide moyen (IFT) en fonction des systèmes étudiés et des sites expérimentaux (a) et en fonction du cycle de culture (P= année de plantation, RX = Xème année de repousse). Les lettres indiquent des différences significatives entre modalités.

3.2. Une maîtrise des adventices comparable au conventionnel

La maîtrise des adventices a été réalisée à l'aide des leviers décrits dans le chapitre "Matériel et Méthodes". Le niveau de maîtrise a été évalué en fonction de la capacité de ces leviers à maintenir le recouvrement des adventices sous le seuil de nuisibilité sur un cycle de canne, fixé à 30 %. La Figure 16 présente le recouvrement moyen des adventices pour les différents systèmes étudiés par cycle de canne sur l'ensemble des années d'étude, respectivement sur l'interrang (a) et sur le rang (b).

Sur l'interrang, l'analyse a montré des effets significatifs des sites ($p < 0,0001$), des systèmes ($p\text{-value} = 0,019$), ainsi que leur interaction ($p = 0,014$). Globalement, les systèmes conventionnels sur tous les sites avaient une meilleure maîtrise de l'enherbement, avec des recouvrements des adventices inférieurs à 20 %, à l'exception du PDS_IR sur le site de FTN, qui enregistrait un recouvrement moyen de 10 %. Les recouvrements des systèmes économes en herbicides ont varié entre 22 % et 27 %, restant cependant en dessous du seuil de nuisibilité. Les recouvrements étaient plus faibles sur le site de FTN que sur les autres sites, ce qui pourrait être dû à une pression des adventices plus faible sur ce site.

Sur le rang, l'analyse a montré un effet significatif du site ($p < 0,0001$), mais pas du système ($p\text{-value} = 0,246$), et une interaction site $\times$ système significative ($p = 0,015$). Ces résultats pourraient s'expliquer par une pression d'enherbement différentes entre les sites. Concernant l'effet du système, ces résultats peuvent être partiellement attribués à une maîtrise des adventices sur le rang très similaire entre les systèmes et les conventionnels. En effet, pour les systèmes Méca_IR et PDS_IR, les rangs de cannes sont désherbés chimiquement. Pour le système 0_herb, le désherbage du rang a été effectué manuellement et déclenché lorsque le seuil de nuisibilité avait été atteint (30 %). Quoi qu'il en soit, les différents leviers mobilisés sur les systèmes ont maîtrisé l'enherbement sous le seuil de nuisibilité sur l'interrang et le rang de canne.

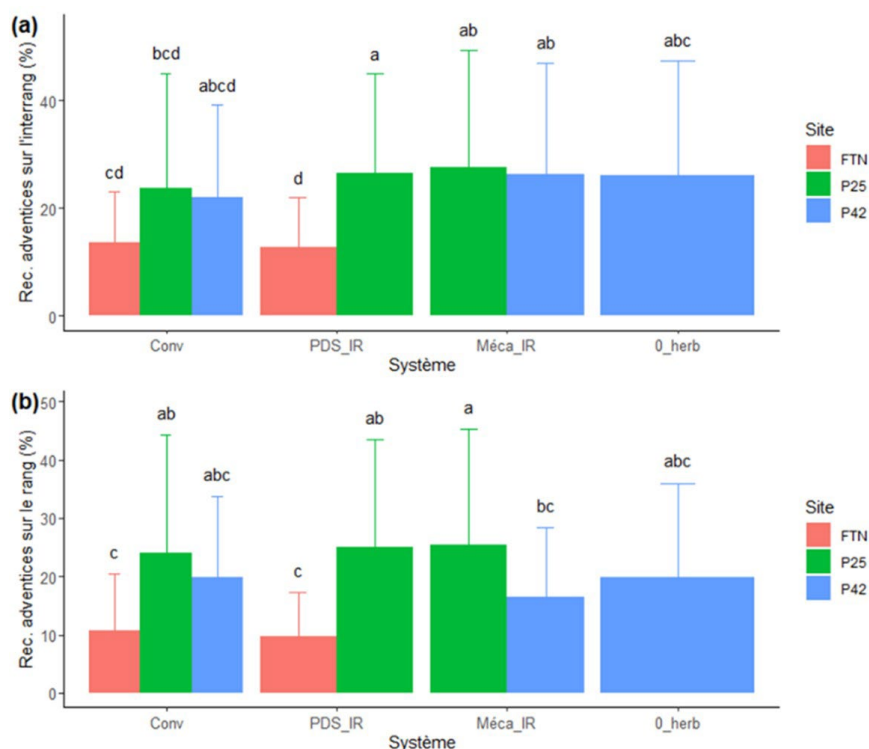


Figure 16 : Recouvrement moyen des adventices (%) dans l'interrang (a) et dans le rang (b) de canne en fonction des systèmes étudiés et des sites expérimentaux. Les lettres indiquent des différences significatives entre modalités.

3.3. Un rendement en canne peu impacté et une richesse en sucre stable

La Figure 17 présente les résultats des rendements en canne par système pour l'ensemble des sites et des années d'étude. L'analyse a révélé un effet significatif des sites ($p = 0,006$), mais aucun effet significatif des systèmes ($p = 0,883$) ou de l'interaction site $\times$ système ($p\text{-value} = 0,102$).

Bien que l'analyse de l'interaction système $\times$ site n'ait pas été significative au seuil de 0,05, des tendances à la baisse des rendements ont été observées pour les systèmes économes en herbicides. Sur l'ensemble des sites, le conventionnel a généralement présenté les rendements les plus élevés sauf pour le site FTN où le système PDS_IR a surpassé le conventionnel. La baisse de rendement des systèmes pourrait s'expliquer par le taux de recouvrement des adventices sur ces systèmes qui sont plus élevés que sur le conventionnel, ce qui traduit des méthodes de désherbage qui sont moins efficaces.

La Figure 17 b présente les résultats de richesse en sucre extractible (SE) par système pour l'ensemble des sites et des années d'étude. Les richesses moyennes estimées pour chaque site et système n'ont montré aucune différence significative entre elles. Toutefois, une tendance à la baisse a été observée sur le site P25, ce qui peut être expliqué par la période de coupe. En effet, la parcelle P25 a été récoltée en début de campagne, une période moins favorable à une forte richesse en sucre pour la variété R579 (eRcane, 2023).

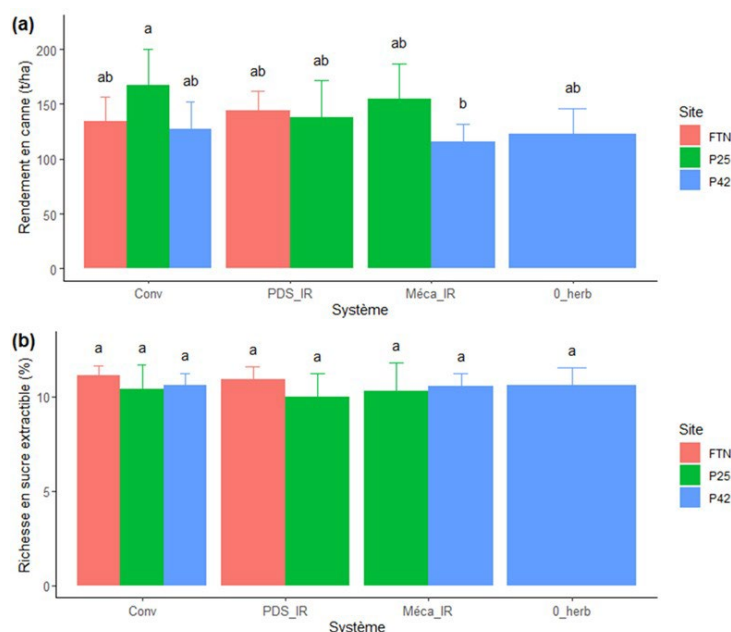


Figure 17 : Rendement (tige usinable, a) et richesse en sucre extractible (b) de la canne à sucre en fonction des systèmes étudiés et des sites expérimentaux. Les lettres indiquent des différences significatives entre modalités.

3.4. Performances technico-économiques

3.4.1. Une augmentation de la charge de travail

La Figure 4a présente les temps de travail moyens (h/ha) pour l'ensemble des leviers d'action par système et par site sur l'ensemble des années d'étude. L'analyse de variance a indiqué un effet significatif entre les sites ($p = 0,001$), les systèmes ($p < 0,0001$), ainsi que de leur interaction ($p = 0,006$). Les résultats montrent que les systèmes conventionnels des trois sites ont les temps de travail les plus faibles, inférieurs à 100 h/ha, avec une moyenne de 70 h/ha pour l'ensemble des sites.

Pour le système Méca_IR, les temps de travail moyens étaient de 184 h/ha pour le site P42 et de 164 h/ha pour le site P25, soit une moyenne de 174 h/ha, représentant un surplus de 104 h/ha par rapport au système conventionnel.

Les systèmes PDS_IR du site P25 et 0_herb du site P42 affichaient les temps de travail les plus élevés, supérieurs à 200 h/ha. Le système PDS_IR a présenté des résultats très contrastés entre les sites : 249 h/ha pour le site P25, soit (+157 h/ha que Conv du site P25) contre seulement 105 h/ha sur FTN (soit + 49 h/ha que le Conv du site correspondant). Cette différence peut s'expliquer en partie par les différences d'itinéraires culturaux. Chez FTN, un traitement de prélevée a été appliqué sur toute la surface. Alors que sur le site P25, le traitement de prélevée a été concentré sur le rang, et les traitements de postlevée sur le rang ont été supprimés tant que la plante de services (*Canavalia ensiformis*) était encore présente.

Concernant le système 0_herb, avec 209 h/ha, la maîtrise des adventices sur le système a demandé 145 h/ha supplémentaires comparé au conventionnel du site P42.

La Figure 4b présente la répartition des temps de travail moyens par système selon les différents leviers mobilisés. Les résultats ont montré que les temps de travail liés à la gestion de la paille (fanage et épaillage) étaient les plus chronophages, dépassant 60 h/ha pour tous les systèmes. Le désherbage manuel constituait le deuxième poste le plus chronophage, avec des temps dépassant 80 h/ha pour les systèmes 0_herb et PDS_IR.

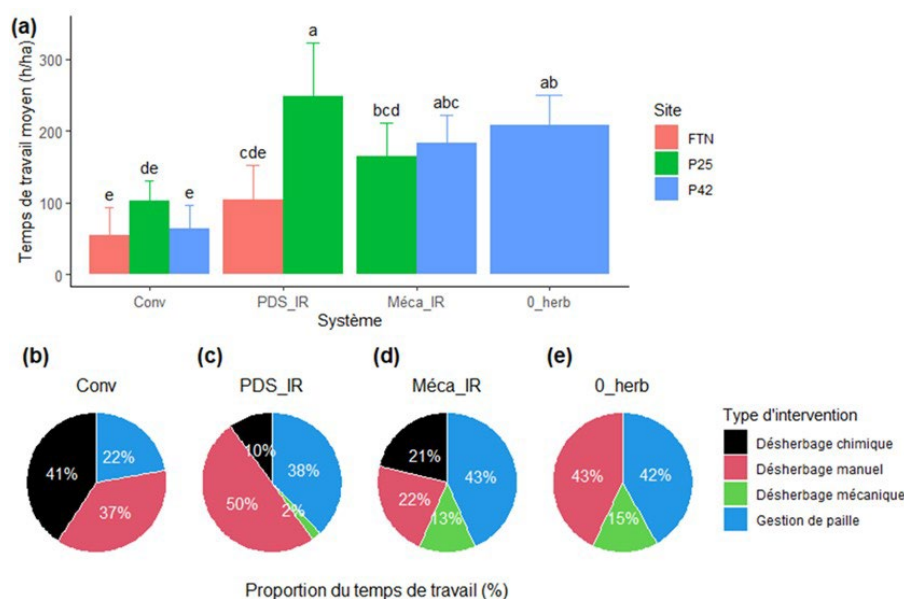
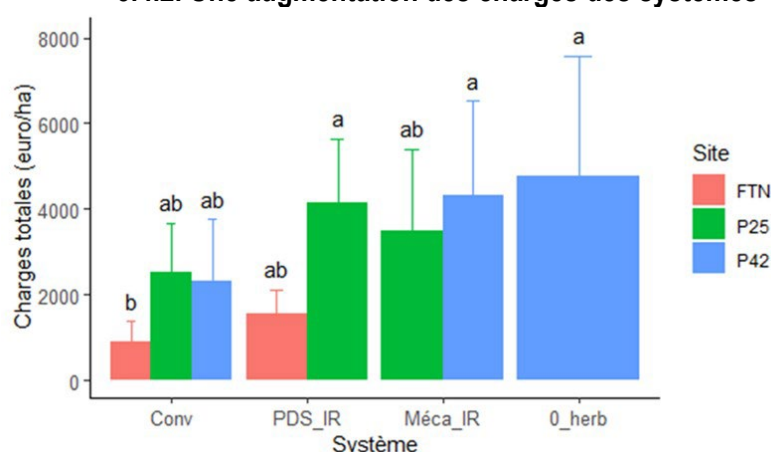


Figure 4 : Temps de travail moyen en fonction des systèmes étudiés et des sites expérimentaux (a) et proportion en termes de type d'intervention (b) à (e). Les lettres indiquent des différences significatives entre modalités.

3.4.2. Une augmentation des charges des systèmes



La

Figure présente les charges totales moyennes (€/ha) par site et par système. Les charges analysées incluaient uniquement celles liées aux leviers d'action présentés dans le tableau 2, mesurées à l'aide de l'outil OTECAS. L'analyse de variance a montré un effet significatif des sites (p -value=0,017) et des systèmes (p -value=0,027) mais aucun effet de l'interaction site x système (p -value=0,624). Concernant les sites, les charges ont été les moins élevées sur le site de FTN, et ce, quel que soit le système.

Concernant les systèmes de culture, le conventionnel a enregistré les charges les plus faibles, avec une moyenne de 1 996 €/ha. A l'exception du système PDS_IR sur le site FTN, tous les systèmes économes en intrants présentaient des charges supérieures à 3 000 €/ha.

Les systèmes économes en herbicides testés sur P42 affichaient les charges les plus élevées. Cela pourrait s'expliquer en partie par l'utilisation d'outils de désherbage en micro-mécanisation spécifiques mobilisés sur cet essai. Ces outils, récemment acquis, ont été expérimentés sur ces systèmes et ont montré une efficacité de désherbage limitée (à cause d'une mauvaise connaissance des conditions d'intervention des outils, entre autres), ce qui a conduit à une augmentation des charges, notamment celles de mécanisation.



En comparant les systèmes entre eux, c'est le système 0_herb qui présentait les charges les plus élevées, atteignant 4 784 €/ha, soit une différence de +107 % (+2 471 €/ha par rapport au Conv du même site). Pour les systèmes Méca_IR, les charges moyennes sur les deux sites s'élevaient à 4 072 €/ha, soit +69 % (+1 659 €/ha) comparé aux conventionnels (avec une moyenne de 2 413 €/ha pour les sites P25 et P42).

Concernant le système PDS_IR, les résultats montraient des différences marquées entre les sites ; sur le site P25, les charges atteignaient 4 145 €/ha, soit +65 % (+1 632 €/ha) par rapport au conventionnel (2 513 €/ha). Sur le site FTN, les charges étaient moins élevées, 1 549 €/ha, soit +69 % (+635 €/ha) par rapport au conventionnel (914 €/ha).

Ces différences entre sites, pour le système PDS_IR, peuvent s'expliquer par les itinéraires techniques spécifiques mis en œuvre. Sur la parcelle P25, le traitement de prélevée a été réalisé manuellement au pulvérisateur à dos et ciblé uniquement le rang de canne, avec en complément le choix de supprimer les traitements de postlevée sur le rang de canne en présence de la plante de service *C. ensiformis*. En revanche, sur le site de FTN, le traitement de prélevée a été appliqué mécaniquement en plein à l'aide d'une rampe, ce qui a permis de limiter le temps et donc les charges, mais n'a pas permis une réduction optimale de l'IFT.

Tableau 15 : Charges totales moyennes (€/ha) par site et par modalité

Site	P25	FTN	P42
Conv	2 513 €/ha	914 €/ha	2 313 €/ha
0_herb	-	-	4 784 €/ha
Méca_IR	3 831 €/ha	-	4 313 €/ha
PDS_IR	4 145 €/ha	1549 €/ha	-

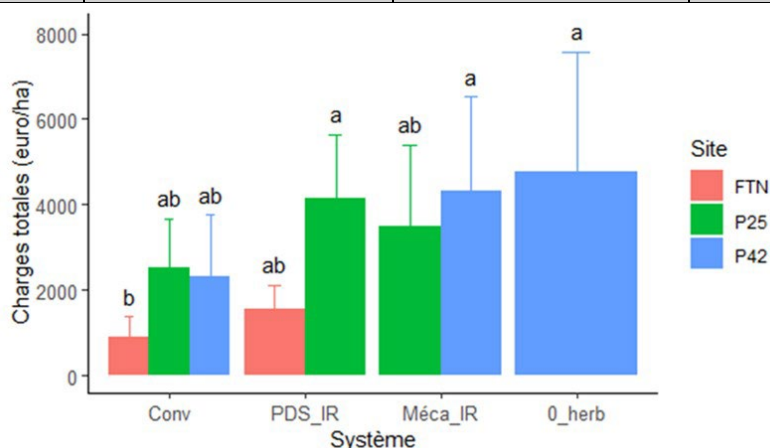


Figure 5 : Charges totales en fonction des systèmes étudiés et des sites expérimentaux. Les lettres indiquent des différences significatives entre modalités.

3.5. Synthèse des systèmes et perspectives

Les systèmes économes en herbicides ont été analysés à travers plusieurs critères de performances, permettant d'évaluer leurs impacts environnementaux, agronomiques et socio-économiques. Le tableau 4 regroupe les moyennes de ces performances sur tous les sites confondus de ces 3 systèmes.

Tableau 16 : Ecart (%) entre le conventionnel (Conv) et les systèmes pour chaque critère de performance, avec en rouge des performances défavorables et en vert favorables.

Critère de performance	Conv	PDS_IR (%)	Méca_IR (%)	0_herb (%)
------------------------	------	-------------	--------------	-------------



IFT	4,4	2,1 (-52 %)	2,2 (-50 %)	0 (-100 %)
Rendement (t/ha)	148	141 (- 4 %)	142 (-4 %)	129 (-13 %)
Richesse (%)	10,6	10,4 (-2 %)	10,4 (-2 %)	10,6 (-0,3 %)
Temps de travail (h/ha)	76	189 (+147 %)	173 (+127 %)	209 (+174 %)
Charges totales (€/ha)	2000	3063 (+53 %)	3864 (+93 %)	4784 (+139 %)

Sur le plan environnemental, les systèmes PDS_IR et Méca_IR ont réduit l'IFT de 50 % par rapport au conventionnel. Ces résultats sont encourageants compte-tenu de l'IFT de la canne sucre 4,53 (moyenne triennale en 2021) (Martin et al., 2023) et s'alignent avec les objectifs du plan Ecophyto II+, bien qu'ils n'atteignent pas l'objectif ambitieux de réduction de 75 %. En termes de maîtrise des adventices, les recouvrements moyens sur l'interrang sont restés en dessous du seuil de nuisibilité de 30 % pour tous les 3 systèmes étudiés. Sur le plan agronomique, bien qu'aucune différence significative entre systèmes n'ait été observée statistiquement, des tendances à la baisse des rendements en canne ont été notées ; aucune différence notable pour la richesse en sucre. Sur le plan socio-économique, les charges totales (€/ha) et les temps de travail (h/ha) ont fortement augmenté pour les 3 systèmes étudiés. Par rapport au conventionnel, les temps de travail ont augmenté de +147 % pour PDS_IR, +127 % pour Méca_IR, et +174 % pour le système 0_herb. Les charges totales ont également suivi une tendance similaire : +53 % pour le PDS_IR, +93 % pour le Méca_IR, et +139 % pour le système 0_herb. Ces augmentations étaient principalement liées aux charges de main d'œuvre. Le coût de la main d'œuvre a été considérable dans les 3 systèmes étudiés dû à l'introduction de leviers tels que le désherbage manuel ; la gestion de la paille (fanage et épaillage), plus chronophages et coûteux qu'un traitement chimique.

L'optimisation des charges de travail représente un levier crucial pour proposer des systèmes agricoles respectueux de l'environnement tout en étant économiquement viables. Ainsi certaines pistes d'amélioration pourraient être envisagées :

- affiner les règles de décision pour la maîtrise des adventices. Le seuil actuel de 30 % de recouvrement des adventices, utilisé pour déclencher les interventions de désherbage, pourrait être ajusté grâce à une meilleure connaissance de la nuisibilité réelle des différentes espèces d'adventices. Une telle approche permettrait de réduire la fréquence des interventions sans compromettre le rendement en canne, tout en optimisant les temps de travail et les coûts ;
- réduire le temps de travail lié à la gestion de la paille. La gestion de la paille constitue l'un des postes les plus chronophages. La mise en œuvre de techniques, telles que la méthode de paillis partiel, pourrait significativement diminuer le temps de travail. Cette méthode permettrait de concentrer la paille sur une zone plus réduite pour freiner le développement des adventices et concentrer le désherbage sur les zones non paillées (Caro Canne, 2023). L'épillage systématiquement réalisé entre 6 et 8 mois après la récolte, pourrait être optimisé en fonction des adventices présentes. Par exemple, cette intervention pourrait être déclenchée uniquement en cas de présence de lianes à ce stade de la culture. Une telle adaptation permettrait de réduire le temps de travail, tout en maintenant une maîtrise efficace des adventices.

Ces ajustements contribueraient à réduire les charges liées aux leviers d'action et à rendre ces systèmes plus accessibles aux agriculteurs, en combinant durabilité environnementale et rentabilité économique.

4. Conclusion

Les systèmes étudiés ont démontré une performance environnementale encourageante, marquée par une réduction significative de l'utilisation d'herbicides de -50 % de l'IFT, tout en préservant globalement les résultats en termes de rendement et de richesse en sucre. Cependant, ces avancées se heurtent à



des limites économiques et organisationnelles importantes, notamment une augmentation significative des temps de travail et des charges, particulièrement marquées dans le système sans herbicide. Parmi les trois systèmes étudiés, deux continuent de s'appuyer sur l'utilisation d'herbicides pour le désherbage des rangs, tandis que le système O_herb, bien qu'ambitieux, s'est révélé extrêmement chronophage et confronté à l'absence de solutions viables pour le désherbage des rangs de canne.

Cette étude s'est concentrée sur l'évaluation technico-économique des systèmes à l'échelle d'un cycle de canne, mais des travaux complémentaires devront être menés pour évaluer l'impact à long terme de ces pratiques sur l'évolution de l'enherbement. En effet, les leviers d'actions n'offrant pas un désherbage total, cela pourrait entraîner un réensemencement progressif des parcelles, augmentant ainsi la pression des adventices au fil des années et un envahissement par les espèces les plus nuisibles.

Ces résultats soulignent que, dans le contexte actuel, les méthodes de désherbage économes en herbicides en culture de la canne à sucre s'accompagnent systématiquement d'un coût de production plus élevé. Alors que la transition vers des systèmes agricoles plus respectueux de l'environnement est une priorité, marquée notamment par le retrait progressif de certaines substances actives, il est essentiel de continuer à développer et à accélérer le déploiement de solutions viables pour ne pas laisser les agriculteurs démunis.

La recherche doit donc se poursuivre, notamment grâce au projet IDECAS financé par le PARSADA, afin d'identifier et de mettre en œuvre des pratiques innovantes permettant de conjuguer durabilité environnementale, efficacité technique et viabilité économique.

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

Julien CHETTY : <https://orcid.org/0009-0008-1597-6918>

Mathias CHRISTINA : <https://orcid.org/0000-0003-3618-756X>

Contributions des auteurs

Julien Chetty: Conceptualization, Data curation, Writing - original draft. Marion Schwartz: Writing - review & editing. Mathias Christina: Formal analysis, Visualization, Writing - review & editing. Alizé Mansuy: Methodology, project administration, Writing - review & editing.

Déclaration d'intérêt

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



Remerciements

Je tiens à remercier les équipes de terrain pour leur implication, leur professionnalisme et leur rigueur tout au long de ce projet. Leur travail indispensable a permis de mener à bien ces expérimentations et de produire des résultats de qualité.

Déclaration de soutien financier

Le projet Canécoh V2 a reçu le soutien financier du programme DEPHY EXPE 2, une action du plan Ecophyto piloté par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec l'appui technique et financier de l'Office français de la Biodiversité.

Références bibliographiques

- AGRESTE La Réunion, 2016. Réunion : enquête pratiques culturales - Le désherbage de la canne à sucre, n°101, septembre 2016. Disponible sur : https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Desherbage_Canne_Sucre_cle0e411c.pdf
- AGRESTE La Réunion, 2019. Filière Canne - Sucre - Rhum – Énergie, juin 2019. Disponible sur : <http://sq-proxy02.maaf.ate.info/IMG/pdf/R97419A05.pdf>
- AGRESTE La Réunion, 2022. Les visages de l'agriculture dans les départements d'Outre-mer, février 2022. Disponible sur : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Pri2204/Primeur%202022-4_RA2020-DOM.pdf
- Agreste, 2023. Filière Canne-Sucre-Rhum – Bilan de la campagne sucrière 2022, février 2023. Disponible en ligne : https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/20230222_filiere_canne.pdf (consulté le 30 janvier 2025)
- Antoir J., Goebel F.R., Le Bellec F., Esther J.J., Maillary L., Mansuy A., Marion D., Marnotte P., Martin J., Rossolin G., Vincenot D., 2016. Les bonnes pratiques de désherbage de la canne à sucre – Île de la Réunion 2016. Chambre d'Agriculture de La Réunion, 86 pages. Disponible sur : https://geco.ecophytopic.fr/documents/20182/21720/upload_00000754_pdf.pdf
- Caro Canne, 2023. Caro Canne Magazine, numéro 44. Disponible sur : <https://www.carocanne.re/wp-content/uploads/2023/06/CaroCanneMagazine44.pdf>
- Christina M., Negrier A., Marnotte P., Viaud P., Mansuy A., Auzoux S., Techer P., Hoarau E., Chabanne A., 2021. A trait-based analysis to assess the ability of cover crops to control weeds in a tropical island. *European Journal of Agronomy*, Volume 128, August 2021. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030121000885>
- eRcane, 2023. R579. Disponible sur : <https://www.ercane.re/nos-varietes/r-579/> (consulté le 27 janvier 2025).
- Schwartz M., Marnotte P., Baiffif S., Esther J.J., 2021. Suivi des levées et de la phénologie des adventices-analyse pluriannuelle-station eRcane de l'Etang Salé (La Réunion). Cirad. 59 page. Disponible sur : [Suivi des levées et de la phénologie des adventices - analyse pluriannuelle - station eRcane de l'Etang Salé \(La Réunion\) - Agritrop](#).
- Marnotte P., Esther J.J., Martiné J.F., Jeanette M., 2008. Nuisibilité de l'enherbement en culture de canne à sucre. Cirad, 65 pages. Disponible sur : https://agritrop.cirad.fr/545410/1/document_545410.pdf
- Mansuy A., Marnotte P., Martin J., Roux E., Chouteaux R., Wilt M., Soubadou G., 2019. Canécoh : mise au point de leviers pour une canne à sucre économe en herbicide à La Réunion. *Innovation Agronomiques*, 18 pages. Disponible sur Agritrop : <https://agritrop.cirad.fr/596495/>
- Martin J., Chaballier M., Letourmy P., Chopart J.-L., Arhiman E., Marion D., 2013. Competition and facilitation effects of differential intra- and inter-row weed management in sugarcane. *22ème Conférence du Columa*. Disponible sur : <https://agritrop.cirad.fr/570808/>
- Martin J., Maillary L., Antoir J., 2023 : l'ITF herbicides canne à sucre à la réunion : la fièvre remonte avec la peur de manquer de munitions de remplacement.



Végéphyll – 25ème conférence du columbia journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes
Orléans, France – 5, 6 et 7 décembre 2023

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Ministère de la Transition écologique et solidaire, Ministère des Solidarités et de la Santé, Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, 2018. Plan Écophyto II+. Disponible sur : [https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2020-10/Plan %20ecophyto %20II %2B.pdf](https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2020-10/Plan%20ecophyto%20II%2B.pdf)

Réseaux d'Innovation et de Transfert Agricole (RITA), 2024. OTECAS : Outil Technico-Économique en Canne à Sucre (version 2024). Disponible sur : <https://coatis.rita-dom.fr/reunion/?DashBoard=> (consulté le 30 janvier 2025).

Roussel C., Warembourg A., Davrieux F., Bernard J., Poser C., 2015. Development of NIRS method for routine assessment of sugarcane quality in Reunion island. 11th Germplasm and breeding & 8th molecular biology workshops – 1-5 June 2015, La Réunion.

Soulé M., Mansuy A., Chetty J., Auzoux S., Viaud P., Schwartz M., Ripoche A., Heuclin B., Christina M., 2024. Effect of crop management and climatic factors on weed control in sugarcane intercropping systems. *Field Crops Research*, volume 136, Février 2024.

Pour citer cet article : Julien Chetty, Marion Schwartz, Mathias Christina, Alizé Mansuy. Réduire les herbicides en cultures de canne à sucre, à quel prix. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.58-71. [10.17180/ciag-2026-vol109-art05](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



MIRAD - Maîtrise des Intrants et des Résidus phytosanitaires pour des vergers d'Abricotiers Durables

Laurent BRUN¹, Christophe CHAMET², Freddy COMBE¹, Myriam CODINI³, Florence FEVRIER⁴,
Amandine FLEURY¹, Valérie GALLIA⁵, Maëlle GUIRAUD⁵, Eric HOLSTALNOU³,
Capucine JORANT¹, Marion MICHAUD⁴, Alexandre PERRIN², Claude-Eric PARVEAUD⁶, Julie
POISSY²

¹ INRAE-UERI Gotheron, 460 chemin de Gotheron, 26320 Saint-Marcel-lès-Valence, France

² SEFRA, 2485 route des Pécolets, 26800 Etoile-sur-Rhône, France

³ CENTREX, Chemin du Mas Faivre, 66440 Torreilles, France

⁴ CTIFL, 751 chemin de Balandran, 30127 Bellegarde, France

⁵ SUDEXPE, 517 chemin du Mas d'Asport, 30800 Saint-Gilles, France

⁶ GRAB, 460 chemin de Gotheron, 26320 Saint-Marcel-lès-Valence, France

Correspondance : laurent.brun@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art06>

Résumé

Le projet DEPHY EXPE 2 MIRAD a pour objectif d'évaluer les performances de vergers d'abricotiers innovants associant de nombreux leviers (matériel végétal peu sensible, produits de biocontrôle, protections physiques, ...) permettant de réduire l'usage des produits phytosanitaires. En 2019 et 2020, 26 systèmes de culture ont été implantés sur 5 sites. Des réductions de l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) hors produits de biocontrôle de 75 à 100 % ont été possibles. Cependant, ces réductions d'IFT s'accompagnent d'une baisse du rendement commercialisable lorsque les systèmes ne font appel qu'à la substitution et/ou à l'efficacité ou bien d'un coût de production au kg des abricots plus élevé lorsque les systèmes sont basés sur de la reconception (vergers sous protection physique).

Mots-clés : Abricotiers, réduction des produits phytosanitaires, agriculture biologique sans cuivre, essais systèmes, analyses multicritères.

Abstract: MIRAD - Control of Phytosanitary Inputs and Residues for Sustainable Apricot Orchards

The MIRAD project aims to evaluate the performance of innovative apricot orchards combining numerous levers (low-susceptible plant, biocontrol products, physical protection, etc.) to reduce the use of phytosanitary products. In 2019 and 2020, 26 cropping systems were implemented across 5 sites. Treatment Frequency Indicator (TFI) reductions excluding biocontrol products of 75 to 100 % were possible. However, these reductions in TFI are accompanied by a drop in marketable yield when the systems only rely on substitution and/or efficiency or by a higher production cost per kg of apricots when the systems are based on redesign (orchards under physical protection).

Keywords: Apricot trees, reduction of phytosanitary products, organic farming without copper, system trials, multi-criteria analyses.



1. Les objectifs du projet MIRAD

L'abricotier est une espèce fruitière dont les surfaces cultivées en France en production en 2023 représentaient 11 300 ha pour une production de 124 000 tonnes (en augmentation de 20 % par rapport à la moyenne de production 2018-2022). Cette production d'abricots est principalement située dans 5 départements : la Drôme, le Gard, les Bouches-du-Rhône, les Pyrénées-Orientales et l'Ardèche. L'abricotier est sensible à de nombreux bioagresseurs pouvant affecter le potentiel de production ou la qualité de la récolte, certains de ces bio-agresseurs sont également responsables de dépérissements d'arbres. Ainsi, pour protéger les vergers d'abricotiers de ces bioagresseurs, des applications de produits phytosanitaires sont réalisées par les producteurs tout au long de la période végétative, du débourrement jusqu'à la chute des feuilles. En 2018, le nombre moyen de traitements phytosanitaires des vergers d'abricots en France était de 11.4 et l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) de 9.3 (Desprat *et al.*, 2021).

Les enjeux du projet MIRAD ont été de concevoir et d'expérimenter des systèmes de culture de vergers d'abricotiers innovants n'utilisant des pesticides qu'en ultime recours tout en maintenant les volumes de production, la qualité des fruits et la viabilité économique du verger. Les autres intrants et rejets (fertilisation, irrigation, énergie) ont également été pris en compte dans un objectif agro-écologique global pour ne pas compenser la diminution des pesticides par une augmentation de ces autres intrants.

Le projet MIRAD s'est fixé comme objectifs une réduction des IFT hors produits de biocontrôle de :

- -75 % dans les systèmes en agriculture conventionnelle avec également l'objectif de zéro résidu de pesticides détectable dans les fruits dans les limites de quantification. Systèmes dénommés **ECO** ;
- -100 % dans les systèmes en agriculture biologique (AB), c'est-à-dire utilisation exclusive des produits phytosanitaires autorisés en AB et inscrits sur la liste des produits de biocontrôle. Systèmes dénommés **BIO**.

Pour atteindre ces objectifs, l'ensemble des leviers et outils de pilotage permettant de réduire les pressions des bioagresseurs et de limiter le recours aux produits phytosanitaires ont été mobilisés, en particulier ceux pouvant s'avérer efficaces contre les verrous techniques pour la baisse des IFT, et la conduite en Agriculture Biologique, que représentent les monilioses sur fleurs et l'Enroulement Chlorotique de l'Abricotier (ECA).

Cinq dispositifs expérimentaux permettant d'évaluer 26 systèmes de cultures différents ont été implantés en 2019 et 2020 sur les 5 sites des partenaires du projet : INRAE UERI Gotheron dans la Drôme, la SEFRA dans la Drôme, SUDEXPE dans le Gard, le CTIFL Balandran dans le Gard et la CENTREX dans les Pyrénées-Orientales.

2. Cinq sites avec des pressions de bioagresseurs différentes

2.1. Un ensemble de maladies pouvant impacter la culture de l'abricotier

Les abricotiers sont sensibles à de nombreuses maladies pouvant impacter directement la production de fruits ou entraîner la mortalité des arbres (Lichou & Jay, 2012).

La **bactériose** de l'abricotier, due au complexe d'espèces *Pseudomonas syringae*, entraîne des mortalités de branches et d'arbres (Parisi *et al.*, 2019). Cette maladie est surtout observée dans la partie septentrionale de la zone de production d'abricots en France, soit dans la région AURA.

Un ensemble de maladies affecte la production de fruits. La **moniliose** peut contaminer les fleurs, et entraîner le dessèchement des rameaux à fleurs, mais également les fruits et provoquer leur pourriture



(Tresson *et al.*, 2020 ; Brun *et al.*, 2021). L'**oïdium** provoque des tâches sur fruits qui dans certains cas peuvent déclasser ces fruits à la récolte. La **rouille** contamine les feuilles lors des printemps pluvieux pouvant entraîner une chute des feuilles précoce dès la fin de l'été.

Le phytoplasme responsable de l'Enroulement Chlorotique de l'Abricotier (**ECA**) est transmis par un insecte vecteur, le psylle *Cacopsylla pruni* (Sauvion *et al.*, 2020). Les arbres contaminés dépérissent l'année suivante (Labeyrie *et al.*, 2020).

La pression de ces 4 maladies, en l'absence de protection phytosanitaire, sur les 5 sites des partenaires du projet MIRAD a pu être évaluée de 2020 à 2024. En effet, un réseau de parcelles multi-site d'une collection variétales destiné à évaluer les sensibilités variétales aux bioagresseurs a été mis en place en 2018/2019. Ces collections variétales ne reçoivent aucune protection phytosanitaire pour permettre aux maladies et ravageurs de s'exprimer. Les observations réalisées sur ce dispositif permettent donc de caractériser les pressions de bioagresseurs en l'absence de protection phytosanitaire. Sur la période 2020 à 2024, la pression des monilioses sur fleurs est plus importante dans la Drôme sur les sites de la SEFRA et d'INRAE, elle est assez faible dans les Pyrénées-Orientales sur le site de la CENTREX (tableau 1). L'oïdium fait plus de dégâts sur fruits dans les régions méridionales. La rouille est présente avec la même importance dans tous les sites. La pression de l'ECA est très différente d'un site à l'autre, l'impact de cette maladie est très fort sur le site de la CENTREX avec jusqu'à 15 % de mortalité annuelle des arbres (Tableau 1). Ainsi, en fonction des pressions des maladies, les combinaisons de leviers mises en œuvre pour concevoir les systèmes de culture pourront être assez différentes selon les sites.

Tableau 1 : Maximum de dégâts observés de 2020 à 2024 sur les collections variétales sans protection phytosanitaire du réseau « bioagresseurs » - Moyenne annuelle de l'ensemble des variétés.

POURCENTAGE D'ORGANES OU D'ARBRE TOUCHES (ANNÉE OU CE POURCENTAGE EST MAXIMUM)	INRAE	SEFRA	CTIFL	CENTREX	SUDEXPE
MONILIOSES SUR RAMEAUX (RAMEAUX DESSECHES)	82 % (2024)	69 % (2024)	52 % (2023)	4.3 % (2021)	9.8 % (2023)
OÏDIUM SUR FRUITS	9.9 % (2020)	2.0 % (2022)	-	42 % (2024)	15 % (2022)
ROUILLE SUR FEUILLES (EN SEPTEMBRE)	59 % (2024)	42 % (2022)	-	60 % (2022)	75 % (2022)
ARBRES CONTAMINÉS PAR L'ECA	8.3 % (2023)	2.5 % (2022)	7.9 % (2023)	15 % (2024)	2.0 % (2021)

2.2. Différents ravageurs dont une nouvelle espèce invasive

Les **forficules** (*Forficula sp.*) et les **chenilles** de la Tordeuse orientale et de l'Anarsia peuvent être responsables de morsures et d'infestation des fruits par les larves, les rendant impropres à la commercialisation.

Les développements de **pucerons** sur abricotiers étaient considérés comme secondaires. Cependant, dès 2020 sur le site de la SEFRA et à partir de 2021 sur le site d'INRAE, des développements printaniers importants de pucerons « verts » sont apparus dans les vergers d'abricotiers n'utilisant pas d'insecticides. Ces attaques de pucerons ont entraîné des mortalités d'arbres alors que l'abricotier était considéré, jusque-là, comme une espèce peu sensible aux pucerons. Les partenaires du projet ont sollicité l'appui de spécialistes des pucerons d'INRAE pour venir en aide dans l'identification de ces



pucerons. Les prélèvements réalisés en 2023 ont permis de mettre en évidence une nouvelle espèce invasive de pucerons, *Phorodon humulifoliae*, originaire d'Asie et spécifique de l'abricotier (Buchard *et al.*, 2023). Cette espèce invasive a été signalée à partir de 2016 dans des abricotiers en Italie, Hongrie et Serbie. Elle colonise maintenant les vergers français.

Ces dernières années, les dégâts sur abricots dus à la **mouche méditerranéenne** des fruits (*Ceratitis capitata*) et les attaques racinaires par les larves de **capnodes** (*Capnodis tenebrionis*) sont en recrudescence sur les sites les plus méridionaux. Le développement récent de ces 2 ravageurs est supposé être lié à l'augmentation des températures et des périodes de sécheresse observée ces dernières années en lien avec le changement climatique.

3. Un ensemble de leviers à disposition pour limiter le recours aux produits phytosanitaires

3.1. La boîte à outil des leviers mobilisables

Les moyens qui sont mis en œuvre pour atteindre les objectifs de réduction d'IFT du projet MIRAD reposent sur une combinaison de différentes catégories de leviers d'action. Ces leviers peuvent faire appel à l'**efficience** lors de l'utilisation des produits phytosanitaires ou à la **substitution** des produits phytosanitaires « chimiques » par d'autres méthodes ou par des produits de biocontrôle. Certains leviers doivent être réfléchis dès l'implantation du verger et impliquent une **reconception** du verger : variétés, distances de plantation, formes fruitières, protections physiques (Fevrier *et al.*, 2024). Les principes d'action des leviers mobilisés dans le projet MIRAD sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Principes d'action et typologie efficience/substitution/reconception (esr) des principaux leviers mobilisés dans MIRAD

LEVIERS TYPOLOGIE ESR	PRINCIPES D'ACTION
PROPHYLAXIE EFFICIENCE	Suppression des fruits momifiés (<i>Monilia</i>), coupe des branches atteintes de chancres, arrachage des arbres dépérissants (ECA, Chancres bactérien, Sharka) pour diminuer l'inoculum endogène.
SUPPRESSION DE FLEURS EFFICIENCE	Lors de fortes floraisons, l'éclaircissage à la fleur permet de diminuer le nombre de portes d'entrée du monilia et de diminuer les dégâts sur rameaux (Moncorger <i>et al.</i> , 2022).
OUTIL D'AIDE A LA DECISION EFFICIENCE	Suivi du vol de retour des psylles vecteurs du phytoplasme de l'ECA dans les différentes régions de production. Informations centralisées sur BlogoPsylles (http://cpruni.blogspot.com)
MAITRISE DE LA VIGUEUR EFFICIENCE	Pilotage de l'irrigation et de la fertilisation à l'aide d'outils (Tensiomètres, Nitrachek) pour favoriser une croissance régulière des fruits et éviter les microfissures de l'épiderme portes d'entrée des maladies de conservation.
REDUCTION DE DOSES EFFICIENCE (RECONCEPTION)	Réduction de la dose de matière active appliquée avec un pulvérisateur à flux tangentiel sur vergers en mur fruitier ou en adaptant la dose au volume de végétation sur vergers conduits en gobelet.
IMPASSE SUBSTITUTION	Supprimer des traitements en fonction du risque de contamination (monilia sur fruits) et/ou de l'impact cosmétique de certaines maladies (oïdium).
BIOCONTROLE SUBSTITUTION	Substituer certains traitements chimiques par des produits de biocontrôle.
CONFUSION SEXUELLE SUBSTITUTION	Libération massive de phéromones sexuelles dans le verger, perturbe les papillons mâles pour la recherche des femelles (<i>Anarsia</i> et Tordeuse orientale).
BARRIERE SUR LE TRONC SUBSTITUTION	Un anneau de glu autour du tronc, empêche les forficules de monter dans les arbres et d'occasionner des dégâts sur les fruits.
PIEGEAGE MASSIF SUBSTITUTION	Piéger les insectes dans des boîtes pièges qui sont ensuite sortis du verger ou qui contiennent un insecticide. Les forficules se réfugient dans un pot de paille à l'ombre du soleil (insecte nocturne). Les cératites sont attirées dans le piège Decis Trap (couvercle imprégné d'insecticide) par des kairomones.
BACHE TISSEE	Couverture du rang de plantation par une bâche tissée qui empêche la germination des adventices



SUBSTITUTION DESHERBAGE MECANIQUE SUBSTITUTION	Destruction mécanique des adventices avec outil intercep à disques ou à fraise, de la fin de l'hiver à la fin de saison de pousse des adventices.
GREFFAGE HAUT RECONCEPTION	Le greffage haut (>1m) sur porte-greffe pêcher est connu pour diminuer fortement la mortalité des charpentières et des arbres due au chancre bactérien.
VARIETES PEU SENSIBLES AUX MALADIES RECONCEPTION	Sur les variétés peu sensibles aux monilioses sur fleurs, tous les rameaux ne sont pas desséchés par la moniliose ce qui permet de conserver une production de fruits significative sur l'arbre. Certaines variétés n'ont pas besoin d'être protégées contre la rouille.
BACHES ANTI-PLUIE RECONCEPTION	Placées au-dessus des arbres, ces bâches protègent le végétal de la pluie et diminuent ainsi le risque de contamination par certains phytopathogènes (Monilioses, rouille).
FILET ANTI-INSECTE RECONCEPTION	Barrière physique contre les insectes, permettant de réduire les dégâts liés aux tordeuses, psylles (ECA), Drosophila suzukii.
POULES DANS LE VERGER RECONCEPTION	Présence de poules pondeuses permettant de réduire les dégâts liés aux forficules et tordeuses.

3.2. Les leviers mobilisés par site et par système

Les associations de leviers mobilisées pour concevoir les systèmes de culture ont donc été réfléchies en fonction de la pression régionale des bioagresseurs (Tableau 3).

Tableau 3 : Les leviers utilisés pour limiter les intrants phytosanitaires par site et par système du projet MIRAD

Sites	Année plantation	Systèmes	Nombre de variétés	Produits phyto-sanitaires		Gestion des adventices sur le rang		Matériel végétal		Protections physiques		Leviers vis-à-vis des insectes		
				Substitution par un produit de biocontrôle	Impasses	Réduction de la dose appliquée	Bâches tissées au sol	Entretien mécanique du rang	Greffage haut / bactériose	Variétés peu sensibles aux maladies	Conduite des arbres en mur fruitier	Bâche anti-pluie	Filet anti-insectes	Confusion sexuelle vis-à-vis des lépidoptères
INRAE	2020	BIOréf	2	x		x		x	x	x				x
Saint-Marcel-lès-Valence, Drôme	2020	BIOfilets	2	x	x			x	x	x	x	x		x
SEFRA	2019	PFIréf	1					x	x	x				
Etoile-sur-Rhône	2019	ECO	1	x	x	x		x	x					x
Drôme	2019	BIO	1	x				x	x		x	x		x
CTIFL	2019	ECO	2	x	x		x			x	x	x		x
Bellegarde, Gard	2019	BIO	1	x				x		x				x
	2019	PFIréf	1											x
CENTREX	2019	PFI0rés	1	x	x			x						x
Torreilles	2019	BIOréf	1	x		x		x						x
Pyrénées-Orientales	2019	BIO	1	x	x	x		x						x
SUDEXP	2019	PFIréf	2											x
St Gilles	2019	ECO	4	x	x	x	x		x	x				x



Gard	2019	BIO	4	x	x	x	x	x	x
------	------	-----	---	---	---	---	---	---	---

Certains systèmes reposent sur des vergers semblables à des vergers de producteurs et ont donc essentiellement mobilisé des leviers d'efficience et de substitution, alors que d'autres systèmes font appel à des leviers de reconception qui ont dû être mis en œuvre dès la plantation. La prophylaxie et la présence de haies composites en bordure des vergers sont utilisées dans l'ensemble des systèmes. Pour permettre des comparaisons, des systèmes de références conventionnelles (**PFIréf**) représentant les pratiques moyennes régionales en termes d'utilisation des produits phytosanitaires ont été implantées sur certains sites, ainsi que des références en agriculture biologique (**BIOréf**) utilisant des produits autorisés en AB pouvant être non-inscrits sur la liste des produits de biocontrôle. Sur le site de la Centrex, une référence PFI visant l'objectif de zéro résidu de pesticides détectable dans les fruits (**PFI0rés**) a également été évaluée.

La conception des différents systèmes testés dans MIRAD est détaillée dans les pages systèmes présentées sur le site Ecophytopic (<https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/projet-mirad>).

4. Des baisses d'IFT possibles

Pour présenter les résultats dans cet article très synthétique, le choix a été fait de ne prendre en compte que les années pour lesquelles les vergers sont entrés en pleine production, soit à partir de la 4^{ème} feuille. Cela correspond donc aux années 2022, 2023 et 2024, sauf pour le site d'INRAE (années 2023 et 2024) pour lequel le greffage haut a nécessité une année de pépinière en plus et les arbres ont donc été plantés en verger un an après les autres sites.

4.1. Les objectifs de baisse des IFT hors biocontrôle atteints

Dans les systèmes PFI, les IFT hors biocontrôle sont compris entre 9,7 et 13,8. Ces valeurs sont au-dessus de la valeur (9,3) de l'enquête des pratiques phytosanitaires pour l'année 2018 (Desprat *et al.*, 2021). Il peut s'agir d'un effet année, le nombre de fongicides appliqués sur abricotiers dépend de la fréquence des pluies sur certaines périodes.

Dans les systèmes ECO, les IFT hors biocontrôle sont compris entre 1,1 et 3,5. L'objectif de réduction de 75 % dans les systèmes ECO est donc globalement atteint (Figure 1).

Avec un IFT hors biocontrôle à zéro dans les systèmes BIO, l'objectif de réduction de 100 % de cet IFT a été respecté. Dans les systèmes de référence BIO, cet IFT hors biocontrôle est compris entre 0,9 et 1,3 (Figure 1).

Cette baisse de l'IFT hors biocontrôle est compensée par une augmentation de l'usage des produits de biocontrôle dans les systèmes ECO et BIO qui ne sont pas sous protection physique (bâche anti-pluie et filets anti-insectes), alors que l'IFT total reste faible et compris entre 1,8 et 5 dans les systèmes sous protections physiques (Figure 1).

Dans la plupart des systèmes, ces baisses d'IFT hors biocontrôle ont permis un bon niveau de contrôle du développement des bioagresseurs (Février *et al.*, 2024).

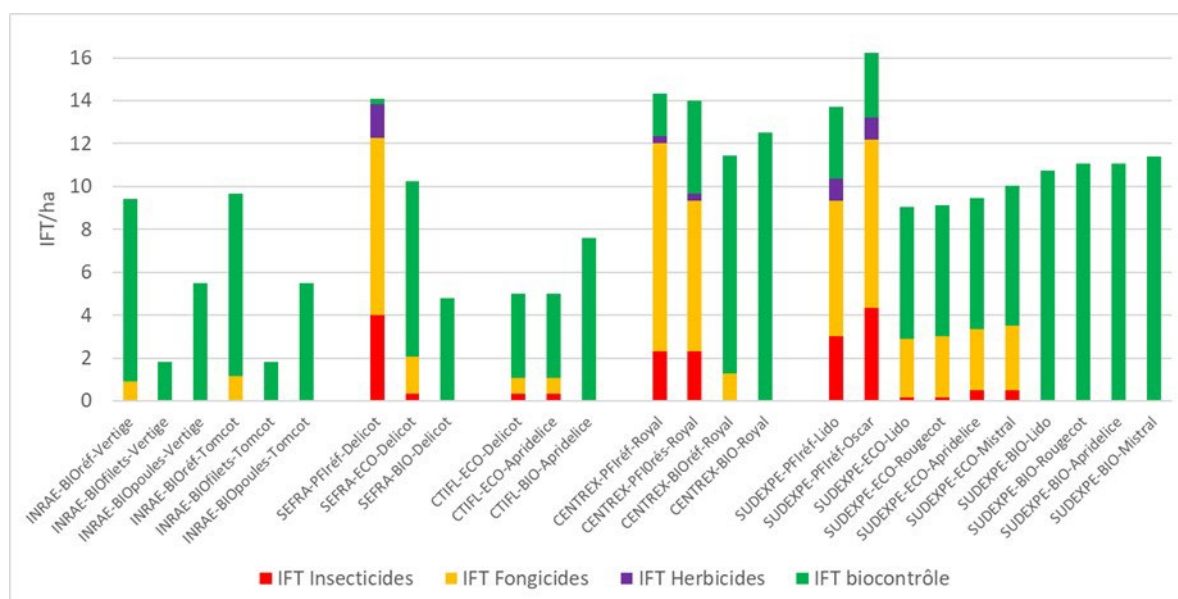


Figure 1 : Les IFT moyens annuels par systèmes à partir de la 4^e feuille

4.2. Les indicateurs de biodiversité araignées

L'effet des systèmes de culture sur la biodiversité a été évalué durant 4 années sur les 5 sites d'étude grâce à deux indicateurs : (1) les populations d'araignées *Salticidae*, *Thomasidae* et *Philodromidae* dans la couronne des arbres et (2) les populations d'araignées *Lycosidae* au sol. Ces indicateurs ont été retenus car ils sont susceptibles de répondre à l'effet des pratiques à court (une saison) et moyen terme (2-3 ans) et à l'échelle de la parcelle (e.g. Simon *et al.*, 2024). Ces familles d'araignées sont des prédateurs généralistes, elles peuvent réguler certains ravageurs comme les pucerons, les thrips et les psylles (e.g. Arvidsson *et al.* 2020). Un protocole expérimental commun aux 5 sites a été établi.

Concernant les araignées observées dans la couronne des arbres, leur abondance moyenne varie entre 0.0 et 9.5 araignées par bande piège selon les sites et les modalités (Tableau 4). Des différences significatives entre les systèmes d'un même site ont été observées à 4 dates parmi un total de 30 dates d'observation. Il a été observé, par exemple, que les effectifs d'araignées sont significativement plus abondants dans la modalité CTIFL-BIO que CTIFL-ECO le 10/10/2022 et le 14/04/2023 (ANOVA, $p < 0,05$). Concernant les araignées *Lycosidae* observées au sol, leur abondance moyenne varie entre 0.0 et 5.1 araignées par pot barber selon les sites et les modalités (Tableau 3). Un effet significatif des systèmes a été également observé à 4 dates parmi un total de 32 dates d'observation. Le 04/05/2023 et le 07/06/2024, les effectifs d'araignées *Lycosidae* sont significativement plus abondants dans la modalité INRAE-BIOref que dans INRAE-BIOfilets et INRAE-BIOpoules (ANOVA, $p < 0,05$). Dans nos conditions expérimentales, les araignées de la couronne et du sol réagissent à un effet des modalités dans seulement 13 % des cas et aucune tendance évidente se dégage. Malgré une augmentation de la durée des périodes de capture et une optimisation de la méthode de piégeage, les effectifs piégés sont faibles. Notons que les araignées peuvent réagir fortement à un élément du système (e.g. hauteur de l'enherbement sur l'inter-rang).

Tableau 4 : Nombre moyen d'araignées capturées de 2021 à 2024 par bande cartonnée dans la couronne des arbres et par pot barber au sol. Les valeurs Min et Max correspondent aux valeurs minimales et maximales observées à une date donnée.

	Nombre d'araignées par bandes pièges			Nombre de <i>Lycosidae</i> par pot barber		
	Moyenne	Min	Max	Moyenne	Min	Max



INRAE-BIOréf	1,10	0,43	1,58	0,99	0,00	2,00
INRAE-BIOfilets	0,90	0,53	1,78	0,58	0,00	1,94
INRAE-BIOpoules	1,16	0,20	2,85	0,57	0,00	1,44
SEFRA-PFIréf	0,68	0,00	1,70	0,11	0,00	0,25
SEFRA-ECO	1,04	0,00	3,80	0,22	0,00	0,75
SEFRA-BIO	2,58	0,30	9,50	0,14	0,00	0,38
CTIFL-ECO	0,96	0,10	2,50	0,22	0,00	0,50
CTIFL-BIO	1,39	0,40	3,20	1,67	0,00	5,13
CENTREX-PFIréf	NA	NA	NA	1,46	0,75	2,17
CENTREX-PFI0rés	NA	NA	NA	1,17	1,17	1,17
CENTREX-BIOréf	NA	NA	NA	2,71	1,25	4,17
CENTREX-BIO	NA	NA	NA	1,79	0,25	3,33
SUDEXPE-PFIréf	3,37	0,00	8,00	0,36	0,00	1,13
SUDEXPE-ECO	3,10	0,00	7,60	0,63	0,00	3,00
SUDEXPE-BIO	2,74	0,00	6,00	0,77	0,00	2,63

4.3. Des rendements systèmes dépendant

Les rendements moyens commercialisés sont très dépendants de la variété et il existe une forte interaction variété x système. Par exemple, la variété Apridélise apparaît très peu adaptée à nos systèmes BIO, du fait de sa forte sensibilité aux monilioses sur fleurs, avec des rendements moyens commercialisés de 3 à 5 t/ha, alors que cette même variété est productive dans les systèmes ECO. La variété Rougecot apparaît très productive dans le système ECO de SUDEXPE, alors que sa production est diminuée de plus de la moitié en BIO (Figure 2).

Lorsqu'une même variété est présente sur un même site dans différents systèmes de culture (hors protections physiques), on constate une baisse de rendement régulière entre les systèmes PFI, ECO puis BIO. C'est le cas pour la variété Royal Roussillon sur le site de la Centrex, Lido sur le site de SUDEXPE et Délicot sur le site de la SEFRA (Figure 2).

Les systèmes ECO et BIO sous protections physiques, conduits en mur fruitier avec des densités d'arbres par ha élevées, permettent de maintenir des rendements commercialisables du même niveau que les systèmes PFI (Figure 2).

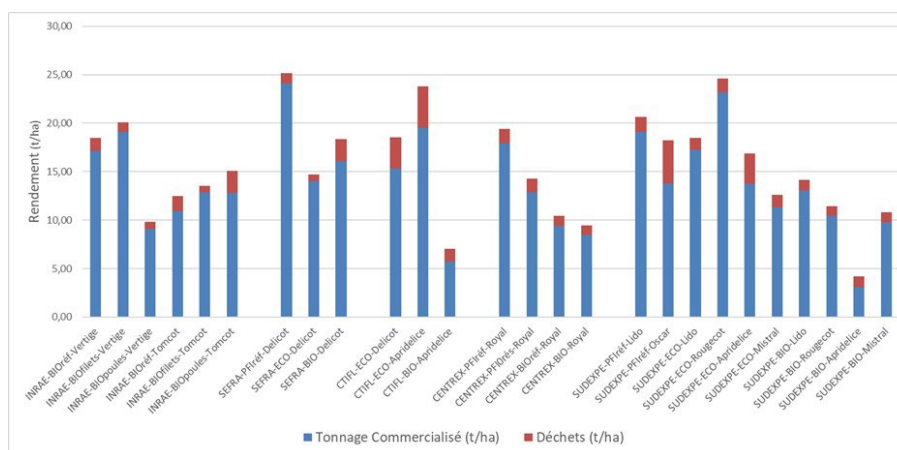


Figure 2 : Les rendements moyens annuels par systèmes à partir de la 4^e feuille



4.4. Les performances économiques des systèmes évalués dans MIRAD

Pour évaluer les performances économiques des différents systèmes, des références communes de prix de vente, de coût, de durée d'amortissement et de calcul des marges ont été prises :

- pour le prix de vente des abricots, c'est le référentiel du Réseau des Nouvelles du Marché (RNM) qui a été choisi (<https://www.rnm.franceagrimer.fr>). Ce référentiel permet de disposer de prix de vente en fonction de la variété (ou du type) d'abricots, de la région, du calibre et de la période de production. Comme il s'agit du prix de vente au kg mis en plateau, ce prix a été diminué de 0.50 à 0.60 €/kg pour avoir le prix hors frais de conditionnement en station ;
- pour l'amortissement des investissements, un travail collectif des participants au projet MIRAD a permis de définir la durée des amortissements. Elle est de 10 ans pour les travaux d'implantation du verger, d'installation de l'irrigation, du palissage, des protections climatiques et des bâches anti-herbes. Pour les bâches anti-pluie, cette durée est de 6 ans. L'amortissement est calculé selon la méthode de l'amortissement linéaire. Cette méthode consiste à répartir de manière égale la perte de valeur des immobilisations de manière constante sur la durée de vie de ce dernier (il s'agit de la durée réelle d'utilisation telle qu'elle a été définie par l'entreprise ou des experts) ;
- pour les marges directes, la formule suivante a été utilisée : Marge directe (€/ha) = Chiffre d'affaire bord verger (€/ha) - [coût main d'œuvre (€/ha) + coût mécanisation (carburant, entretien matériel) (€/ha) + coût approvisionnement (ferti, phyto, irrigation...) (€/ha) + charges d'amortissement (plantation, palissage, irrigation, filet...) (€/ha)].

En termes de coût par ha, pour tous les systèmes, le poste principal est la main d'œuvre. Pour les systèmes sous protection physique, les charges d'amortissement annuelles sont supérieures à 10 000 euros/ha ce qui impose à ces systèmes d'avoir une production suffisante et régulière de fruits, avec un prix de vente rémunérateur (Figure 3).

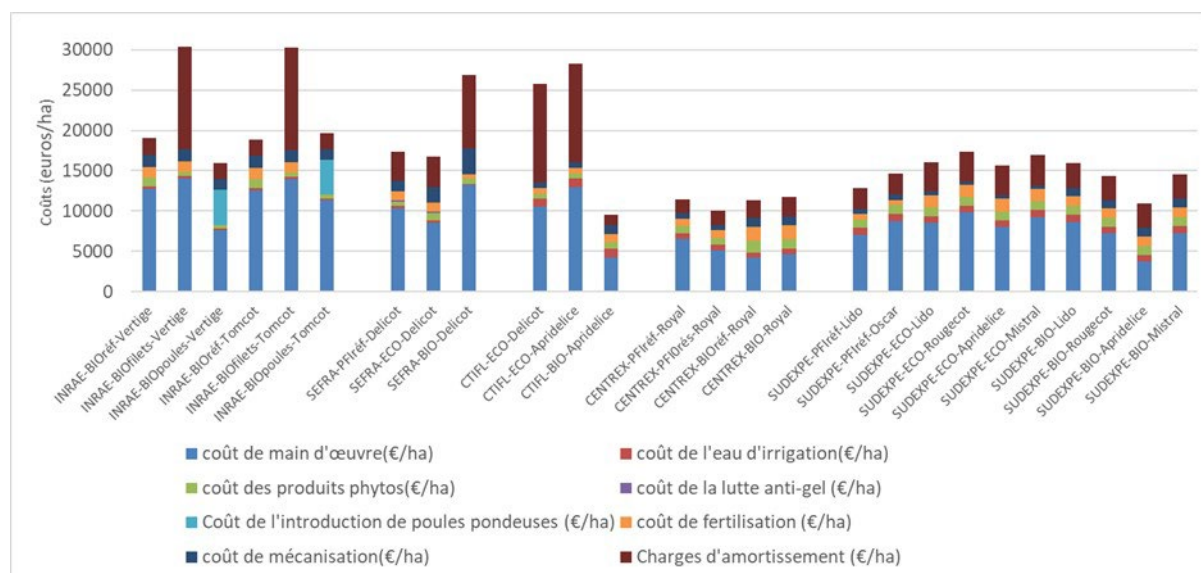


Figure 3 : Coûts moyens annuels des systèmes à partir de la 4^e feuille

Les systèmes PFI présentent les coûts de production par kg de fruit commercialisé les plus faibles avec des valeurs comprises entre 0,64 et 1,06 euros/kg. En l'absence de protection physique, les coûts de production par kg sont en moyenne de 1,10 euros/kg pour les systèmes ECO, 1,34 euros/kg pour les systèmes référence BIO et 1,75 euros/kg pour les systèmes BIO. Avec une structure de protection



physique, les coûts de production par kg sont en moyenne de 1,57 euros/kg pour les systèmes ECO et de 1,87 euros/kg pour les systèmes BIO (Figure 4 ; Tableau 5).

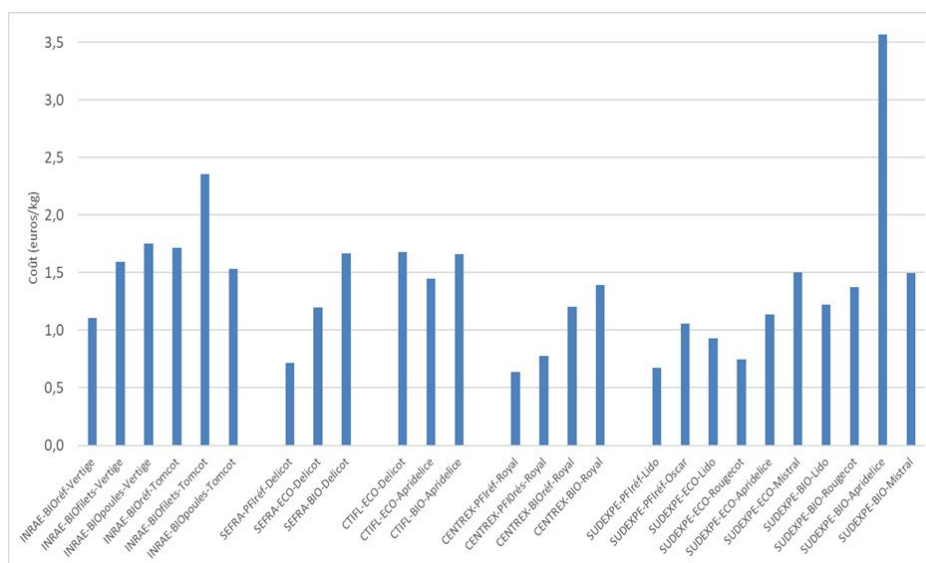


Figure 4 : Coûts de production moyens annuels par kg de fruit commercialisé des systèmes à partir de la 4^e feuille

Tableau 5 : IFT, production commercialisée, coût de production, marge directe par grand type de systèmes. Moyenne annuelle à partir de la 4^e feuille.

	Effectif	Moyenne Min Max	IFT Total	IFT biocontrôle	hors	Récolte commer- cialisée (t/ha)	Coût production (€/kg commer- cialisé)	de	Marge directe (€/ha)
Systèmes Référence PFI	5	Moyenne	14,5	11,9		17,5	0,77		14484
		Min	13,7	9,7		12,9	0,64		5488
		Max	16,2	13,8		24,1	1,06		23275
Systèmes ECO hors protections physiques	5	Moyenne	9,6	3,0		15,9	1,10		7354
		Min	9,0	2,1		11,3	0,75		-2068
		Max	10,2	3,5		23,2	1,50		15359
Systèmes ECO sous protections physiques	2	Moyenne	5,0	1,1		17,4	1,57		6105
		Min	5,0	1,1		15,4	1,45		3612
		Max	5,0	1,1		19,5	1,68		8598
Systèmes Référence BIO	3	Moyenne	10,2	1,1		12,5	1,34		9166
		Min	9,4	0,9		9,4	1,11		4980
		Max	11,5	1,3		17,1	1,72		16083
Systèmes BIO hors protections physiques	8	Moyenne	9,4	0,0		9,0	1,75		8297
		Min	5,5	0,0		3,1	1,22		-2206
		Max	12,5	0,0		13,0	3,57		21847
Systèmes BIO sous protections physiques	3	Moyenne	2,8	0,0		16,0	1,87		11401
		Min	1,8	0,0		12,9	1,59		5193
		Max	4,8	0,0		19,1	2,35		14651



5. Conclusion

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet montrent que les objectifs ambitieux de réduction des IFT ont pu être atteints. Les résultats agronomiques et économiques des systèmes BIO et ECO testés sont très dépendants de la variété choisie. Si on considère la moyenne de l'ensemble des variétés, on peut mettre en évidence que par rapport aux systèmes de référence PFI :

- dans les systèmes ECO, les rendements ne diminuent pas trop par rapport à la référence PFI, mais avec une augmentation des coûts de production au kg et donc avec une baisse de la marge directe puisque les fruits ne sont pas valorisés à un prix plus élevé. Cependant, sur le site de la SEFRA, les impasses ou arrivées de nouveaux ravageurs peuvent entraîner des pertes de production ou d'arbres qui se répercutent également sur les années suivantes ;
- dans les systèmes BIO en l'absence de protection physique, les rendements diminuent, les coûts de production au kg augmentent et la marge directe diminue malgré un prix de vente supérieur des fruits en AB ;
- dans les systèmes BIO avec protections physiques, les rendements se maintiennent, mais avec un coût de production au kg assez élevé. Ce sont les systèmes avec baisse d'IFT qui dégagent les meilleures marges directes après les références PFI. Cependant, les fortes charges d'amortissement annuelles récurrentes de ces systèmes nécessitent une production de fruits régulière chaque année valorisée à un prix suffisamment élevé (Tableau 5) ;

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

Contributions des auteurs

Laurent BRUN : responsable du projet, responsable site expérimental, collecte et analyse des données sur site expérimental, participation aux réunions techniques et comité de pilotage du projet

Christophe CHAMET, Freddy COMBE, Myriam CODINI, Florence FEVRIER, Amandine FLEURY, Valérie GALLIA, Maëlle GUIRAUD, Eric HOLSTALNOU, Capucine JORANT, Marion MICHAUD, Alexandre PERRIN, Julie POISSY : responsable site expérimental et/ou collecte et analyse des données sur site expérimental, participation aux réunions techniques et comité de pilotage du projet

Claude-Eric PARVEAUD : responsable analyses des indicateurs de biodiversité à l'échelle du projet, collecte et analyse des données sur site expérimental, participation aux réunions techniques et comité de pilotage du projet



Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient Nathalie Courthieu, Nicolas Barbault et Guillaume Martin pour avoir transmis les données du réseau bioagresseurs qui ont permis d'établir le tableau 1 sur les pressions des maladies selon les sites.

Déclaration de soutien financier

Le projet MIRAD (2019-2024) a été financé dans le cadre de l'action du plan Ecophyto piloté par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec l'appui technique et financier de l'Office français de la Biodiversité.

Références bibliographiques

- Arvidsson F., Addison P., Addison M., Haddad, C.R. et Birkhofer K. 2020. Weed species, not mulching, affect web-building spiders and their prey in organic fruit orchards in South Africa. *Ecosphere* 11 : 1-14.
- Brun L., Tresson P., Dubois J., Dam D., Combe F., Mercier V., Chenevotot H., Guillermin A., Launay M., 2021. Suivre la contamination des fleurs par *Monilinia laxa* - Le développement d'un modèle phéno-climatique de contamination des fleurs d'abricotier par la moniliose va permettre d'optimiser le pilotage de la protection contre la maladie. *Phytoma* 740 : 38-42.
- Buchard C., Duval F., Vericel T., Nio Y., Fleury A., Morel K., Brun L., Simon J-C, 2023. Découverte en France d'une nouvelle espèce de pucerons sur abricotiers. 13ème Réunion annuelle du Réseau INRAE/SPE « Biologie Adaptative des Pucerons et Organismes Associés » (BAPOA), 09 et 10 novembre 2023, Villeurbanne (Poster).
- Desprat M.J., Cretin L., Espinosa M., 2021. Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018 - IFT et nombre de traitements. *Agriste - Chiffres et données*, mai 2021 N° 8.
- Février F., Brun L., Fleury A., Chamet Ch., Codini M., Guiraud M., Michaud M., 2024. Des leviers innovants pour des systèmes de culture à faible niveau d'intrants. MIRAD, des vergers d'abricotiers durables. *INFOSCTIFL* 399 : 48-55.
- Labeyrie B., Decugis F., Goral C., Courthieu N., Peyre J., Couanon T., Guillet A., Combe F., Sauvion N., Brun L., 2020. Enroulement chlorotique de l'abricotier : quelles perspectives de lutte ? De nouvelles études de terrain précisent les leviers à développer pour protéger les vergers de l'ECA. *Phytoma* 736 : 11-16.
- Lichou J., Jay M., 2012. Monographie abricot. Ctifl, Paris, 567 p.
- Moncorger L., Combe F., Merlin F., Gaslain M., Oboussier F., Mouiren C., Brun L., 2022. Réduire les dégâts provoqués par les monilioses sur abricotiers. Dans la lutte contre les monilioses des fleurs et rameaux d'abricotiers, l'efficacité de l'éclaircissage à la fleur et de la chute provoquée des pétales a été mise en évidence. *Phytoma* 759 : 10-14.
- Parisi L., Morgaint B., Blanco-Garcia J., Guilbault C., Chandeysson C., Bourgeay J.F., Moronvalle A., Brun L., Brachet M.L., Morris C.E., 2019. Bacteria from four phylogroups of the *Pseudomonas syringae* complex can cause bacterial canker of apricot. *Plant Pathology* 68: 1249-1258.
- Sauvion N., Labeyrie B., Brun L., 2020. Enroulement chlorotique de l'abricotier : situation en France - L'ECA demeure une maladie préoccupante pour les vergers d'abricotiers et de pruniers en France. *Phytoma* 735 : 9-10.
- Simon, S., Riotord, D., Morel, K., Fleury, A. and Capowiez, Y., 2024. A shift towards softer pest management differently benefits earwig and spider communities in a multiyear experiment in apple orchards. *Pest Manag Sci* 80: 5088-5098. <https://doi.org/10.1002/ps.8232>



Tresson P., Brun L., Garcia de Cortazar-Atauri I., Audergon J.-M., Buléon S., Chenevotot H., Combe F., Dam D., Jacquot M., Labeyrie B., Mercier V., Parveaud C.-E., Launay M., 2020. Future development of apricot blossom blight under climate change in Southern France. *European Journal of Agronomy* 112 (<https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125960>)

Pour citer cet article : Laurent Brun, Christophe Chamet, Freddy Combe, Myriam Codini, Florence Fevrier, et al.. Innovations agronomiques 109 (2025) 72-84 MIRAD -Maîtrise des Intrants et des Résidus phytosanitaires pour des vergers d'Abricotiers Durables. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.72-84. [10.17180/ciaq-2026-vol109-art06](https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol109-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.



Favoriser une régulation naturelle des bio-agresseurs par la diversification et multiplication des habitats en vergers de prunier

Marie-Laure GREIL¹, Marie-Hélène RAMES², Rémi SEGARD³, Vincent VALLEJO⁴, Malick SOW⁴,
Elisa D'ALIBERT², Olivier BEGUE¹, Quentin HOFFMANN³, Dominique MONTY¹

¹ UEA. Unité Expérimentale Arboricole INRAE, France. <https://doi.org/10.17180/9ST1-4J21>

² BIP, 2 rue des Magnolias 47300 Villeneuve sur Lot, France

³ AREFE, 38 Rte d'Étain, 55210 Vigneulles-lès-Hattonchâtel, France

⁴ CEFEL, 49 Chemin des Rives, 82000 Montauban, France

Correspondance : marie-laure.greil@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art07>

Résumé

La production fruitière est encore, malgré des progrès déjà considérables, une des cultures les plus consommatrices de produits phytosanitaires, avec des IFT (Indice de Fréquence de Traitement) de synthèse en prune proches de 8. Le projet PRUMEL a testé, dans le cadre d'un réseau, trois dispositifs innovants implantés dans trois grands bassins de production de la prune en France. Avec pour objectif de maintenir un bon niveau de rentabilité, les systèmes testés ont combiné différents leviers et limité au strict minimum les applications de produits de synthèse. L'originalité de ces systèmes repose sur la co-plantation de différentes variétés ou espèces au sein de vergers diversifiés, associée à une multiplication des habitats et des sources de nourriture pour favoriser la faune auxiliaire. La régulation naturelle des bio-agresseurs, telle qu'attendue, n'a été que partielle. Les premiers résultats obtenus au bout de 4 années de vie des vergers laissent apparaître des différences notoires, aussi bien en termes techniques qu'économiques, entre vergers témoins conduits en PFI (Production Fruitière Intégrée) et vergers innovants, mais sans que les effets sur les ravageurs et parasites aient pu encore être observés à ce jour, soulevant des interrogations auxquelles les futures observations devraient permettre de répondre.

Mots clés : Prunier, verger diversifié, Infrastructures Agro-Ecologiques, régulation naturelle, essais systèmes, réduction des produits phytosanitaires de synthèse.

Abstract: PRUMEL- Diversification and multiplication of habitats in plum orchards to promote natural regulation of pests and diseases

Despite considerable progress, fruit production is still one of the crops that consumes the most phytosanitary products, with the synthetic IFT (Indicator of Frequency of Treatment) for plums close to 8. As part of a network, the Prumel PRUMEL project tested three innovative systems set up in three major plum production areas in France. With the aim of maintaining a good level of profitability, the systems tested combined different levers and limited the use of synthetic products to a strict minimum. The originality of these systems lies in the co-planting of different varieties or species within diversified orchards, combined with a multiplication of habitats and food sources to encourage auxiliary fauna. The natural regulation of bio-aggressors, as expected, was only partial. The initial results obtained after 4 years of orchard life show significant differences between IPM orchards and innovative orchards, but it has not yet been possible to observe the effects on pests and parasites, raising questions that future observations should help to answer.



Keywords: Plum tree, diversified orchard, Agro-Ecological Infrastructures, natural regulation, system trials, reduction in phytosanitary products.

1. Introduction

Couvrant plus de 15 000 ha en 2022, le verger de prunes est le troisième verger de France. La production d'environ 185 000 tonnes annuelles (65 000 tonnes de prunes de bouche et d'industrie et 120 000 de prunes destinées au séchage) est réalisée essentiellement dans trois bassins de production : le Sud-Ouest produit 50 % des volumes avec essentiellement la production du pruneau mais aussi de nombreuses variétés de prunes de bouche dont les prunes américano-japonaises, l'Est de la France qui produit mirabelles et quetsches, le Sud-Est qui assure 15 % de la production française. Les productions sont associées pour la plupart à des labels de qualité ; les IGP (Indication Géographique Protégée) pruneau d'Agen et mirabelle de Lorraine, ainsi que le label rouge Reine – Claude dorée représentent $\frac{3}{4}$ de la production nationale de prunes.

Les IFT se situent aux alentours de 8 (Agreste). Les principaux ravageurs sont pour la prune domestique les chenilles foreuses du fruit dont le carpocapse, les pucerons ainsi que les cochenilles, alors que le prunier japonais est également et avant tout sensible au phytoplasme *Candidatus phytoplasma prunorum* responsable de l'ECA (enroulement chlorotique de l'abricotier), véhiculé par un psylle *Cacopsylla pruni*. 4 à 5 IFT sont liés à une protection contre les maladies fongiques, la rouille du prunier et les monilioses. Enfin, dans les vergers conventionnels, 1 IFT est généré par l'utilisation de désherbants chimiques. En 2018, dernière année d'enquête sur les pratiques agricoles en verger, la part des spécialités de biocontrôle dans le verger de prunier reste très modeste, proche de 1 (Agreste). Même si la gamme de produits s'est élargie et les pratiques ont évolué, le recours aux produits de synthèse reste majoritaire et significatif car leur emploi nécessite moins de passages pour un coût inférieur et garantit un certain niveau d'efficacité.

Le projet PRUMEL conduit de 2019 à 2024, a pour ambition de concevoir et évaluer des systèmes de vergers innovants, faisant appel à plusieurs leviers agro-écologiques dont en particulier le mélange d'espèces ou de variétés et en réduisant drastiquement le recours aux produits phytosanitaires de synthèse pour produire des fruits exempts de résidus détectables. Il regroupe 4 structures situées sur 3 bassins de production : l'Unité Expérimentale Arboricole INRAE (UEA), le Bureau national Interprofessionnel du Pruneau (BIP), l'Association Régionale d'Expérimentation Fruitière de l'Est (AREFE) et le Centre d'Expérimentation Fruits et Légumes (CEFEL).

2. Matériels et méthodes

2.1. Les dispositifs expérimentaux

2.1.1. Site de l'AREFE (commune de Vigneulles-lès-Hattonchâtel, département de la Meuse).

Situé au cœur de la région de production de l'IGP mirabelle de Lorraine. Le climat est de type semi-continental, avec environ 850 mm de précipitations annuelles et des températures moyennes mensuelles comprises entre 2,5 et 18°C. Les risques de gel au moment de la floraison sont importants. Le sol de la parcelle expérimentale est de type argilo-limono-calcaire, la présence d'argile entraîne un fort risque d'asphyxie racinaire au printemps et peut être à l'origine de fentes en période estivale.

Cochenilles et pucerons sont les principaux ravageurs du site, mais les carpocapses et hoplocampes peuvent également générer des dégâts notables. La pression en maladie est surtout marquée pour la tavelure et le monilia sur fruit et ponctuellement par la maladie des pochettes.

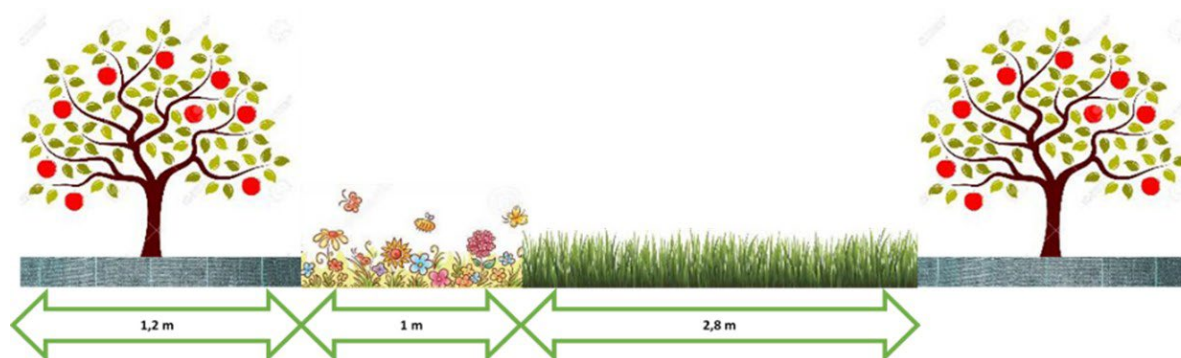


Figure 1 : Schéma du dispositif PRUMEL innovant à l'AREFE

La parcelle expérimentale de mirabelliers a été plantée en janvier 2020 sur une surface totale de 0,4 ha, un mirabellier sur dix a été remplacé par un arbuste de haie non productif (noisetiers, saules, sureaux, charmes et cytises) ; la parcelle est entourée d'une haie composée d'arbustes produisant des baies (bourdaine, viornes, sorbier, nerprun, cornouiller,...). Elle a été couverte d'une bâche anti-pluie lorsque les arbres sont entrés en production ; une bande fleurie d'un mètre de large est semée le long d'un côté du rang et une toile tissée a été installée sur le rang afin de ne pas avoir recours au désherbage chimique. Les arbres sont plantés à la densité de 5 x 3 m et sont conduits en axe.

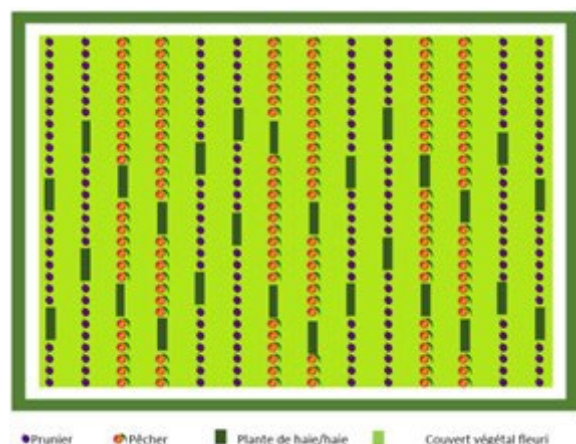
Une parcelle témoin de mirabelliers plantée au même moment et conduite en production fruitière intégrée permet de comparer les performances du système innovant à un système de type « producteur ».

2.1.2. Site INRAE-BIP (commune de Bourran, département du Lot et Garonne).

Le site INRAE est situé au cœur de la région de production de l'IGP pruneau d'Agen. Le climat est de type océanique altéré ; les températures moyennes mensuelles se situent entre 6,5 et 22 °C et les précipitations sont de l'ordre de 670 mm/an. Le sol est limono-argileux, battant, avec un risque accru d'asphyxie racinaire au printemps et la présence de fentes de retrait en été.

Les chenilles foreuses des fruits (carpocapses et petites tordeuses des fruits) provoquent habituellement des dégâts dans les vergers de pruniers de la région. Les pucerons sont bien gérés dans les systèmes conventionnels mais en absence de protection chimique les populations peuvent être plus importantes. La rouille, le monilia sur fruits ainsi que la tavelure sont par ailleurs les principales maladies rencontrées dans la région de production.

Le dispositif implanté en 2020 est entouré de haies composites et des séquences de 5 m de haies sont rappelées sur chaque rang de manière à favoriser la circulation des auxiliaires au sein de la zone de production. Deux rangs de pruniers d'Ente (prune de séchage traditionnellement utilisée pour la production du pruneau d'Agen) alternent avec deux rangs de pêchers (variété Bénédicte ®). Un couvert végétal est semé dans l'inter-rang. La parcelle occupe une surface totale d'environ 0,5 ha. Les arbres sont conduits en axe.



Une parcelle témoin de pruniers et une parcelle témoin de pêchers, conduites en production fruitière intégrée sont implantées en même temps sur le site.

Figure 2 : Plan du dispositif PRUMEL du site BIP-INRAE



2.1.3. Site du CEFEL (commune de Moissac, département du Tarn et Garonne)

Le site se situe en pleine zone de production fruitière et au sein du bassin de production de la prune de table americano-japonaise. Le climat est de type océanique altéré avec un total de précipitations de l'ordre de 750mm/an. Les températures moyennes mensuelles s'échelonnent de 5,9 à 22,5 °C. La parcelle expérimentale est implantée en 2020, sur un sol de type argilo-calcaire et occupe une surface d'environ 0,3 ha.

Les principaux bio-agresseurs sont les cicadelles et la rouille, mais le risque majeur demeure la contamination par le phytoplasme responsable de l'ECA véhiculé par le psylle *Cacopsylla pruni*.

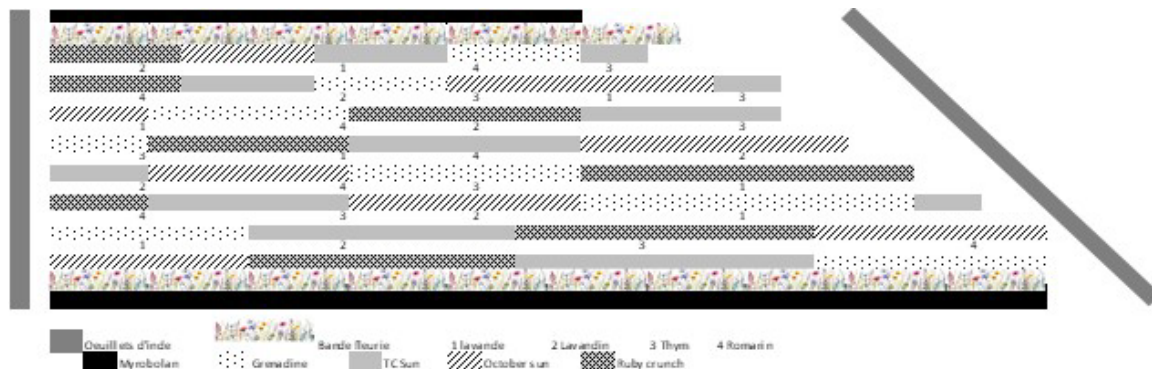


Figure 3 : Plan du dispositif PRUMEL du site du CEFEL

La parcelle est entourée de deux rangs de myrobolan ; il s'agit d'une co-plantation de 4 variétés différentes de pruniers (*Prunus salicina*) disposées en séquences de 10, 14 ou 20 arbres : TC Sun, Ruby Crunch, October Sun et Grenadine. Des plantes aromatiques (lavande, lavandin, thym et romarin) sont implantées au milieu du rang et des bandes fleuries entourent les rangs de pruniers.

Des parcelles voisines du dispositif et les résultats régionaux servent de référence pour évaluer les performances du système.

3. Leviers mobilisés

Outre la prophylaxie, le choix du mode de conduite, les leviers d'efficience, ou de substitution, le recours à la protection anti-pluie sur le site de l'AREFE ou de toiles sur le rang, des leviers relevant de l'agroécologie sont également mobilisés.

3.1. Multiplier les habitats et les sources de nourriture pour favoriser les auxiliaires

Les 3 systèmes sont conçus de manière à multiplier les habitats (haies, arbustes, bandes fleuries, couverts végétaux) et les sources de nourriture pour attirer les auxiliaires. Pour maintenir et permettre la multiplication des auxiliaires dont on espère une action de régulation, il est nécessaire que ces derniers trouvent des proies et des sources de nourriture très tôt en saison avant l'arrivée des ravageurs mais aussi durant toute la période végétative. Afin de favoriser l'action de régulation des populations de ravageurs, des arbustes de haies, des séquences de haies, des bandes fleuries ou des couverts végétaux sont installés au plus près des arbres au sein même des zones productives.

Le choix des essences implantées dans les haies est raisonné dans ce sens (figure 4).

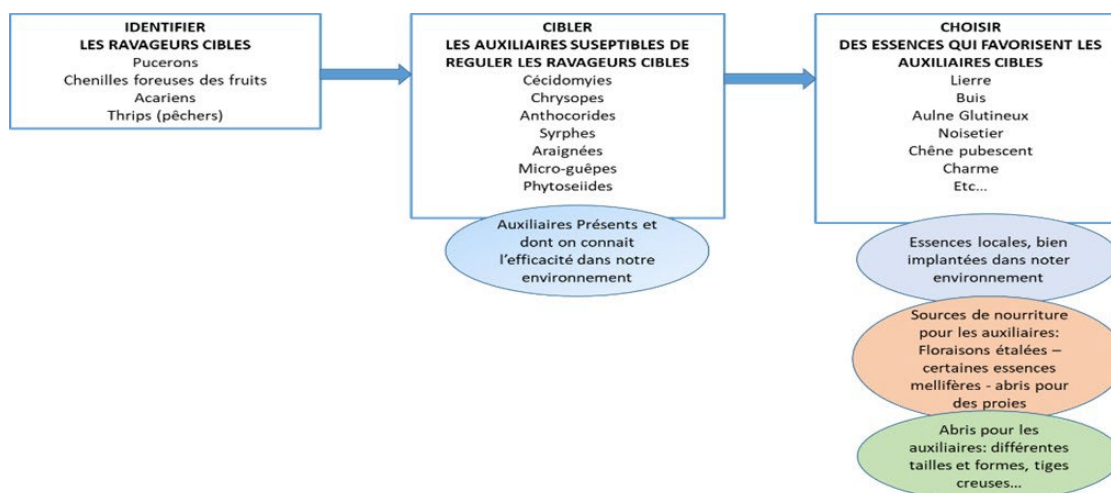


Figure 4 : Méthodologie de choix des plantes et services. Exemple des haies du site INRAE - BAP

De la même manière, le choix des plantes semées dans la bande fleurie du site de l'AREFE est raisonné en cohérence avec le choix des essences de la haie, pour favoriser l'implantation précoce, le maintien en saison mais aussi en période hivernale des auxiliaires. C'est ainsi que certaines plantes ont été choisies pour la précocité de leur floraison fournissant du pollen dès la sortie de l'hiver, comme par exemple le noisetier et le saule des haies ou le lamier pourpre de la bande fleurie. D'autres, comme entre autres le sureau, la carotte, la féverole, la bourrache, le chrysanthème des moissons ou la mauve ont été implantées car elles sont réputées attirer des proies. Certaines ont été choisies car, ayant une tige creuse, elles offrent un abri pour l'hiver comme par exemple les chicorées, les achillées, les bleuets, les géraniums ou le réséda.

Attirer les auxiliaires c'est aussi attirer les ravageurs de la culture ou des plantes de service, que l'on peut tolérer dans une certaine limite puisqu'ils constituent des sources de nourriture et maintiennent donc les populations d'auxiliaires. Il est cependant nécessaire de limiter leur propagation. C'est ainsi que des plantes répulsives ont pu être mises en place (Dardouri, 2018), comme des plantes aromatiques dans le dispositif du CEFEL ou des plantes fleuries réputées pour leur capacité à repousser certains bio-agresseurs ; exemple de la tanaisie connue pour repousser les pucerons lors de leur vol de retour dans la bande fleurie sur le site de l'AREFE. Le choix des plantes de service permet également d'attirer des proies permettant de nourrir les auxiliaires et n'étant pas préjudiciables à la culture

3.1.1. Mélanger les espèces ou les variétés pour perturber les bio-agresseurs

De nombreuses études montrent l'intérêt en culture annuelles ou à cycle pluriannuel court de l'association au sein du même système de production de plusieurs variétés ou espèces cultivées ou sauvages. (Tahvanainen 1972, Trenbath 1993, Villich-Meller 1992, Boudreau 2013). Il existait au moment du début du projet PRUMEL, toutefois peu de références de vergers plurispécifiques. Un verger mixte pêcher/pommier avait été implanté en 1997, à Kearneysville en Virginie Occidentale qui a permis d'abaisser de manière significative les dégâts dus aux insectes phytophages sur pomme (Brown et al, 2008 ; Brown et al, 2010). En revanche, des vergers mixtes d'agrumes et de goyaves aussi bien au Vietnam (Ichinose et al, 2010) qu'en Floride (Gottwald et al, 2014) montrent des résultats plus contrastés sur la gestion du « greening » ; les résultats sont également partiels dans un verger de pommiers co-planté de variétés résistantes et/ou sensibles à la tavelure (Parisi et al 2013). De même, l'effet positif de l'association intraspécifique du couvert végétal et d'une culture a été démontré sur la résistance aux maladies (Finckh 2008), la stabilité de la production et sa valeur économique (Meng et al, 2016) ou encore la biodiversité associée (Chateil et al. 2013). Il existe également quelques approches systémiques pour tester l'influence associée de la biodiversité intra- et inter-spécifique sur la gestion des pathogènes et bioagresseurs en vergers (par ex. Simon et al, 2010).



Au niveau de la zone de production, le système INRAE-BIP associe deux espèces de *Prunus* (*Prunus domestica* et *Prunus persicae*) et des espèces non productives, le système de l'AREFE associe l'espèce *Prunus domestica* à des espèces non productives et le système du CEFEL associe 4 variétés de *Prunus salicina*. De plus, la strate herbacée est diversifiée dans chacun de ces systèmes.

3.1.2. Utiliser des plantes pièges

Le principal enjeu concernant la culture de pruniers américano-japonais (site du CEFEL) est la gestion de l'ECA, pathogène qui peut induire une mortalité allant jusqu'à 10 % par an sur cette espèce. L'ECA est transmis par multiplication végétative ou véhiculé par un psylle, *Cacopsylla pruni*, dont le cycle rend la lutte difficile. (Sauvion et al 2020). Les expérimentateurs du CEFEL ont constaté que *Cacopsylla pruni* est particulièrement attiré par les pruniers myrobolans ; c'est pourquoi deux rangs de ce *Prunus cerisifera* ont été implantés autour du verger de pruniers. L'objectif de cette plantation est d'attirer et de concentrer le psylle vecteur du phytoplasme sur ces deux rangs en le détournant de la zone productive et d'appliquer seulement sur ces deux rangs de myrobolans un insecticide de type pyrèthriné.

3.2. Stratégie phytosanitaire

Dans les trois dispositifs innovants mis en place, aucun désherbage chimique n'a été utilisé pour assurer l'entretien du rang. Sur le site de l'AREFE, une toile tissée a été mise en place, au CEFEL, diverses bâches plastiques ou naturelles à base de chanvre ont été testées ainsi que l'entretien mécanique ; sur le site INRAE-BIP l'entretien du rang a également été assuré par un binage mécanique régulier.

Concernant la protection parasitaire, le choix a été fait à l'AREFE de n'appliquer aucun traitement. Sur les sites CEFEL et INRAE-BIP, des applications de produits phytosanitaires ont été réalisées en très grande majorité à base de spécialités nodu-vert. L'application de produits de synthèse n'est possible sur les trois sites qu'en dernier recours, si la viabilité du verger est menacée.

3.3. Indicateurs de performance

Afin d'évaluer les performances de chaque système, un certain nombre d'indicateurs ont été choisis :

- des indicateurs agronomiques : diamètre du tronc, âge d'entrée en production, présence et intensité des attaques par les bio-agresseurs significatifs pour chaque site (ECA, hoplocampe, maladie des pochettes, monilioses fleurs et fruits, pucerons, tordeuses, carpocapses, insectes du bois, tavelure, rouille), quantité et qualité de la récolte ;
- des indicateurs environnementaux : inventaires faunistiques, nématofaune, IFT totaux, IFT nodu vert, par ha et par tonne produite, quantité d'intrants ;
- des indicateurs économiques : temps de travaux, charges directes, marges brutes (avec et sans amortissements)

4. Résultats et discussions

Les résultats présentés pour chaque dispositif sont ramenés à un hectare de zone productive – (la surface couverte par les haies composites représente 10% à l'AREFE, 20% au BIP/INRAE et au CEFEL).

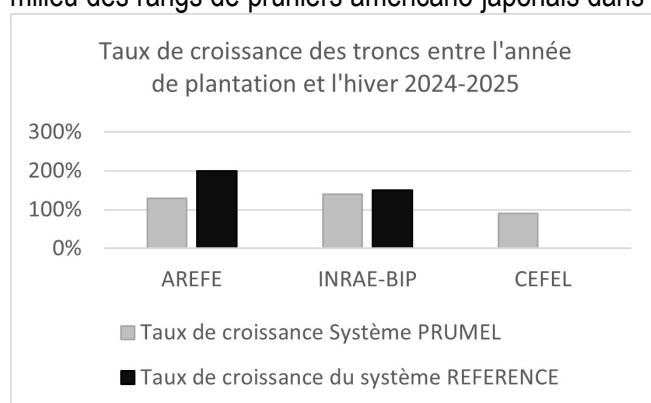


4.1. Performances agronomiques

4.1.1. Implantation et évolution des systèmes

Le système AREFE a été implanté selon le plan initial envisagé, les arbres et arbustes se sont développés correctement mais un déficit de vigueur, comparé au système producteur a été noté dès 2021. L'écart de vigueur se creuse depuis, ce qui se remarque visuellement. De même sur le site INRAE-BIP, même si les diamètres de troncs ne montrent pas de différence notable entre le système innovant et le témoin, visuellement il est évident que le développement de la canopée est moindre dans le système innovant. Même en absence de témoin vrai, la vigueur observée sur les 4 variétés de prune du système CEFEL est considérée comme relativement faible par l'expérimentateur (Figure 5).

Par ailleurs, dans le système CEFEL comme dans le système INRAE-BIP, l'implantation du couvert végétal ou des bandes fleuries a été un échec. Dans les deux cas, les semis n'ont levé que partiellement et le re-semi naturel ne s'est pas produit. De plus les plantes aromatiques plantées au milieu des rangs de pruniers américano-japonais dans le système CEFEL en 2020 n'ont pas survécu et



malgré une replantation en 2021 seuls 15 plants se sont maintenus sur les 400 plantés (et replantés) initialement. Il est probable qu'une forte pression en adventices (essentiellement sétaires et chardons) ainsi que l'absence d'irrigation et un entretien très limité soient à l'origine de cette mortalité.

Figure 5 : Taux de croissance des plantes depuis l'année de plantation jusqu'à l'hiver 2024-2025

4.1.2. Gestion des bio-agresseurs

Tableau 1 : Evaluation par l'expérimentateur (à dire d'expert) du niveau d'impact des bio-agresseurs sur le rendement et la durabilité des vergers entre 2020 et 2024.

Impact sur le rendement ou sur la durabilité des vergers	Prunes américano-japonaises		Prune d'Ente		Mirabelle	
	Prumel	Référence	Prumel	Référence	Prumel	Référence
Carpocapse du prunier						
Cicadelles						
Chenilles défoliatrices						
ECA						
Puceron vert du prunier						
Hoplocampe du prunier						
Maladie des pochettes						



Moniliose des fleurs et rameaux						
Rouille						

Aucun (blanc) ; Faible (gris clair - *) ; Impotant (gris foncé - x) ; Elevé (noir - +)

Le tableau 1 met en évidence que certains bio-agresseurs présents dans les systèmes innovants peuvent avoir un impact sur la production et la longévité du verger : l'ECA a entraîné une forte mortalité dans le verger du CEFEL (30% des arbres en 2024) ; la rouille est à l'origine de retard de croissance au CEFEL et à INRAE-BIP ; les pucerons ont également eu un effet sur le développement végétatif et la croissance des arbres à l'AREFE. Ces problèmes de développement végétatif engendrent des pertes de production et affectent la longévité du verger. Monilia, maladie des pochettes et carpocapse sont également responsables de baisses de rendement.

4.1.3. Récoltes

Les premières récoltes ont eu lieu en 2022 sur le site de l'AREFE et en 2023 sur les sites de INRAE-BIP et du CEFEL. En 2022, sur les sites de INRAE-BIP et du CEFEL le gel a détruit l'intégralité de la récolte. En 2023, la récolte n'a pas été possible sur le site de l'AREFE en raison des conditions météorologiques défavorables ayant impacté la qualité des fruits sur le système PRUMEL et le système de référence.

Le manque d'années de recul et les données disponibles ne permettent pas de conclure quant à l'effet des modes de conduite sur la qualité des fruits. En revanche les rendements sont à ce jour significativement plus faibles dans les systèmes innovants testés (figure 6). Les rendements affichés sont ramenés à un ha de surface productive. Le manque de développement des arbres observé sur les trois dispositifs explique en partie ce déficit. La mortalité due à l'ECA sur le site du Cefel, les attaques de rouille non maîtrisées sur le site INRAE-BIP ainsi que la présence de pucerons, carpocapses, maladie des pochettes et monilia sur fleurs sur le site de l'AREFE sont également responsables des faibles rendements constatés.

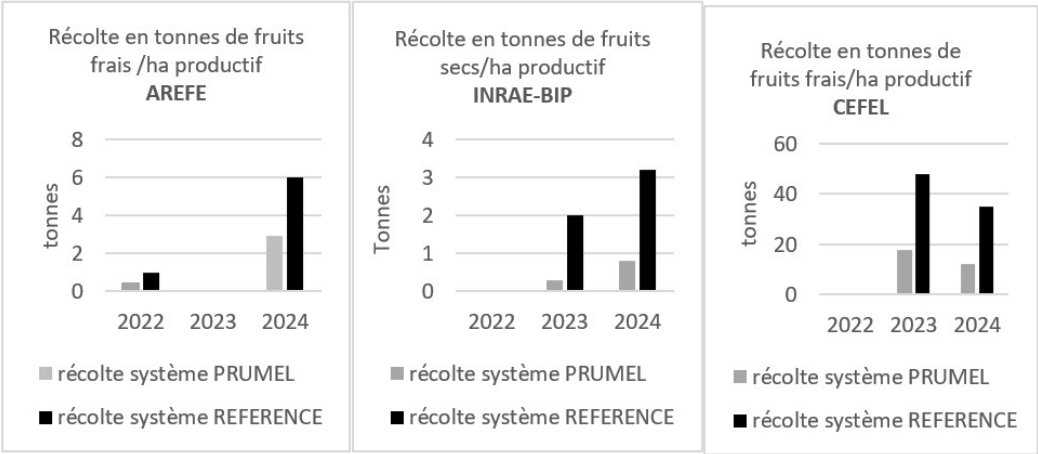


Figure 6 : Rendements bruts à la récolte (tonne par hectare de surface productive)

4.2. Performance environnementale

4.2.1. Entomofaune

Afin d'évaluer si le mélange d'essences et l'intégration d'IAE dans une parcelle de production permet d'améliorer le cortège entomologique présent et sa circulation dans le verger, plusieurs techniques ont été utilisées. Du fait des difficultés rencontrées pour installer les plantes aromatiques et les bandes fleuries sur le site du CEFEL, l'observation de l'entomofaune n'y a pas été possible.



Sur le site expérimental de l'AREFE, le filet fauchoir a été utilisé chaque année entre 2021 et 2024 sur 4 répétitions de 6m² des bandes fleuries, deux passages ont été réalisés (mai et juin). Les données du tableau 2 montrent que les bandes fleuries ont donc bien joué leur rôle de réservoir à auxiliaires, grâce entre autres aux proies présentes. Ces données montrent aussi que la parcelle Innovante est donc diversifiée, les insectes y sont plus nombreux ; cependant le ratio auxiliaire/ravageur est plus favorable dans le système Référence. Il est difficile de savoir si le transfert d'auxiliaires de la bande fleurie vers le verger se fait ou non. Cependant, même si le transfert depuis la bande fleurie vers la strate arborée était avéré, cela ne permettrait pas à ce stade de réguler les populations de pucerons qui restent importantes et préjudiciables à la production.

Tableau 2 : Comparaison de l'entomofaune des systèmes PRUMEL-INNOVANT et TEMOIN-REFERENCE sur le site de l'AREFE – nombre moyen d'insectes observés entre 2020 et 2024.

	Filet Fauchoir (bande fleurie)	Battages rapportés à 100 coups (arbres)	
	Système PRUMEL INNOVANT	Système PRUMEL INNOVANT	Système TEMOIN- REFERENCE
Nombre d'auxiliaires	38,3	60,7	20,0
Principaux auxiliaires	Punaises prédatrices (33,1) ; araignées (2,6)	Coccinelles (28) ; coccinelles prédatrices (16) ; araignées (10,7)	Coccinelles (6,7) ; araignées (5,7) ; punaises prédatrices (3,3)
Nombre de ravageurs du prunier	12,1	79,4	11,0
Nombre total d'insectes	Pucerons (7,3) ; charançons (2,1)	Pucerons (67,7) ; charançons (3,7)	Charançons (6) ; pucerons (2,3)
Ratio Auxiliaires/Ravageurs	3,2	0,8	1,8

Sur le site du INRAE-BIP, une comparaison approfondie a été réalisée en 2024 entre les deux systèmes de culture en particulier pour évaluer au bout de 5 années de vie du verger, l'impact des haies extérieures et intérieures sur l'entomofaune. Six zones ont été observées : 3 dans la parcelle PRUMEL Innovant (1 placette dans la haie extérieure ; 1 placette dans la haie intérieure, 1 placette dans les pruniers) ; 3 dans la parcelle TEMOIN-Référence (1 placette dans la haie extérieure, 2 placettes dans les pruniers). Des battages ont été réalisés à trois reprises (avril, mai, juin). Des pots barber et pièges chromatiques ont été installés pendant une semaine en avril, mai et juin dans chacune des zones.

Dans le dispositif PRUMEL-Innovant 330 auxiliaires répartis dans 77 taxons ont été inventoriés contre 239 insectes pour 69 taxons dans la parcelle de référence.

Une comparaison des taxons a été réalisée pour essayer d'estimer la circulation des insectes entre les différentes zones des deux systèmes. Dans le système TEMOIN- référence, il n'y a que 28 % de taxons communs entre la haie extérieure et le verger, ce qui laisse supposer une faible connexion entre ces deux zones. Dans le système PRUMEL-Innovant on retrouve 32 % de taxons en commun entre la haie extérieure et les pruniers et 46,1 % de taxons communs entre la haie extérieure et les haies internes. Ce résultat reste à ce jour difficile à interpréter. Il peut s'agir d'un indice laissant supposer que la circulation entre la haie extérieure et les haies intérieures se met en place, ou bien que des essences proches attirent et abritent une entomofaune assez semblable.

Par ailleurs, cette étude a permis de mettre en évidence la diversité d'espèces de fourmis présentes dans la parcelle Innovante, contrairement à la parcelle de référence où une seule espèce est prédominante. Or, A. Wielgoss et al (2014) concluent que ce sont les communautés les plus riches qui



favorisent les meilleurs rendements, même si les mécanismes trophiques qui conduisent à cet effet sont extrêmement complexes.

4.3. IFT totaux et IFT de bio-contrôle

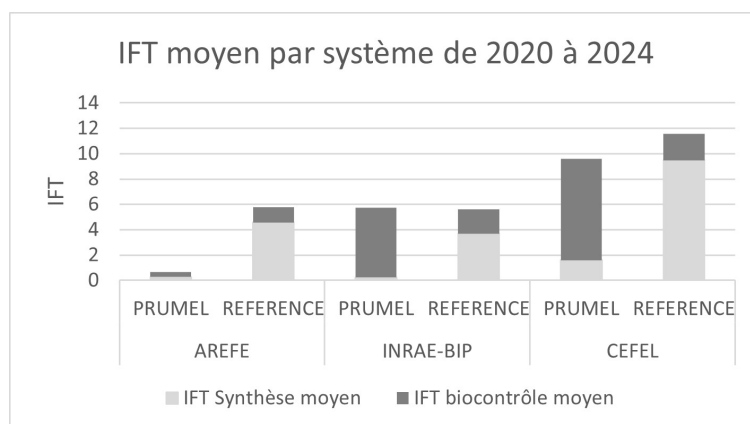


Figure 7 : Moyenne des IFT de synthèse et de biocontrôle calculée entre 2020 et 2024

Sur chaque site, la part d'IFT de biocontrôle est beaucoup plus importante dans le système PRUMEL que dans le système de référence (figure 7). Elle est en moyenne de 80 % dans les systèmes innovants et de 24 % dans les systèmes de référence. Nous avons donc respecté notre cahier des charges en limitant au maximum les IFT de synthèse sans que cela ne mette en péril les dispositifs.

4.4. Performances socio-économiques

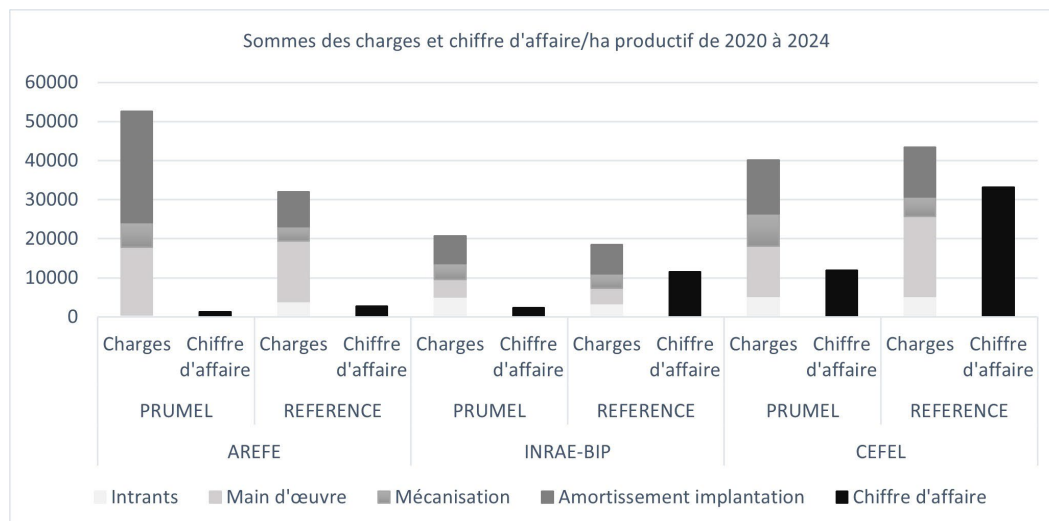


Figure 8 : Charges et chiffre d'affaires cumulés sur la période du projet ramenées à 1 ha de surface en production

Le graphique ci-dessus permet de visualiser, sur la vie du projet, la distribution de chaque type de charges au sein des différents sites et systèmes partenaires et de la comparer au chiffre d'affaires global. Nous constatons qu'au bout de 5 ans, aucun site n'est à l'équilibre dans chacun des deux systèmes (innovant ou référence) en partie à cause des charges d'implantation des vergers qui ne sont pas amorties. Cependant, les systèmes Témoin-référence au CEFEL et à INRAE-BIP deviennent bénéficiaires dès qu'ils entrent en production (figure 9).

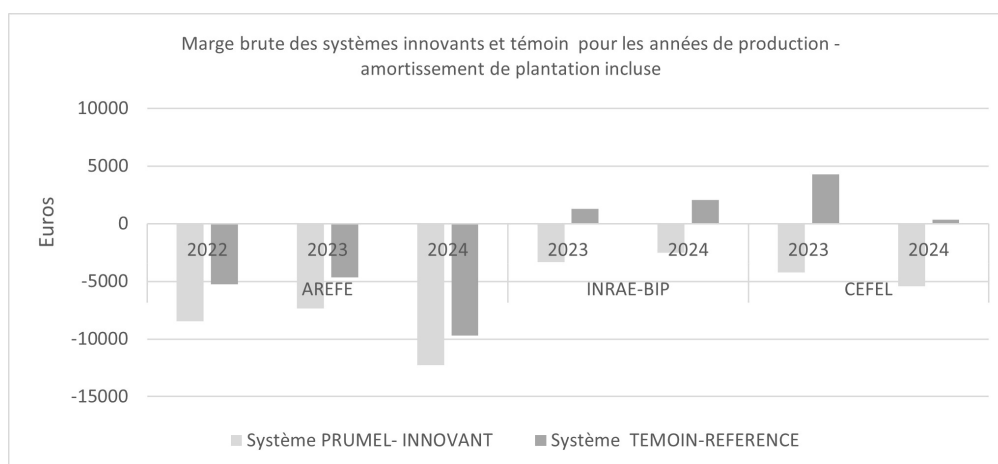


Figure 9 : Marge brute des systèmes en production, amortissement de plantation inclus

Afin de couvrir les charges, deux leviers sont mobilisables : augmenter le rendement et/ou valoriser la récolte à un prix de vente supérieur au prix du marché, par exemple à travers un circuit court.

5. Conclusion

Le projet Prumel PRUMEL a permis de tester trois systèmes de culture en forte rupture et de confronter des conceptions idéo-typées de vergers innovants à la réalité et à la complexité du terrain. Si les vergers sont encore jeunes, un certain nombre d'enseignements peuvent d'ores et déjà émerger : i) la potentielle gestion du risque ECA en verger de pruniers américo-japonais par la plantation de myrobolans supposés attirer et concentrer les psylles vecteurs limitant ainsi leur visite contaminante dans la zone de production n'a clairement pas été efficace et a conduit à l'arrachage complet du verger, ii) l'implantation et le maintien de plantes de services telles que les couverts végétaux, les bandes fleuries, ou les plantes aromatiques semblent difficile en cas de forte concurrence par un couvert déjà présent ou en situation de manque d'eau, iii) très rapidement après l'implantation du couvert fleuri du système AREFE et plus progressivement au sein des haies périphériques ou des haies ou arbustes plantés au sein de la zone de production, des auxiliaires se sont installés, ont trouvé un habitat diversifié et de la nourriture sous forme de proies et/ou de pollen iiiii) à ce jour les auxiliaires abondamment présents dans la bande fleurie ne semblent pas migrer vers la strate arborée et ne régulent pas ou pas suffisamment les populations de pucerons. De nouvelles observations dans les années à venir sont nécessaires pour conclure sur le rôle et l'intérêt de cette bande fleurie, iiiiii) les observations réalisées en 2024 peuvent laisser supposer une connexion entre les haies périphériques et les séquences de haies internes à la zone de production dans le système INRAE-BIP. Si la tendance se confirme et s'accroît rapidement, il faudra vérifier l'impact sur la gestion des ravageurs du verger.

Enfin, dans chaque système testé, même lorsque la pression parasitaire est globalement contenue, la baisse drastique de rendement est un frein majeur à la performance économique. A la suite de l'entrée en production des vergers innovants, les rendements doivent maintenant augmenter afin d'améliorer la rentabilité économique. La poursuite de l'étude dans les vergers INRAE-BIP et AREFE permettra d'évaluer le développement et le maintien dans les vergers des différents auxiliaires afin d'atteindre un équilibre et la régulation des bio-agresseurs. Elle permettra également d'évaluer la durabilité et la rentabilité des systèmes étudiés.

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

Marie-Laure GREIL : <https://orcid.org/0000-0001-6142-3961>

Contributions des auteurs

Les auteurs ont tous contribué à la conception des systèmes, la mise en place et le suivi des systèmes, l'acquisition des données et leur traitement plus spécifiquement pour le site de l'AREFE : Rémi Segard et Quentin Hoffmann ; pour le site du CEFEL : Vincent Vallejo, Malik Sow et Emile Koké; pour le site INRAE-BIP : Marie-Laure Greil, Marie-Hélène Rames, Elisa d'Allibert, Olivier Bègue et Dominique Monty. Animation du projet : Marie-Laure Greil.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des personnes ayant participé à ce travail, en particulier les personnels en charge de l'entretien des parcelles Sébastien Ballion, Visar Nishefci, Benoît Mast, Théo Quartier, Dimitri Wenger, Aline Mangin, Fabrice Bernard, Pascal Jean, les intervenants extérieurs qui ont apporté une expertise ou participé à l'animation ainsi que Maud Delavaud du BIP présente au départ du projet. Les auteurs remercient enfin l'équipe DEPHY pour son appui et sa bienveillance.

Déclaration de soutien financier

Ce document a été produit dans le cadre d'une action du plan Ecophyto, piloté par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec l'appui technique et financier de l'Office français de la Biodiversité.

Références bibliographiques

- Boudreau MA, 2013. Diseases in intercropping systems. Annual Review of Phytopathology, 51 :499-519. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102246>
- Brown M.W., MATHEWS C.R., 2008. Conservation biological control of spirea aphid, Aphis spiraecola (Hemiptera: Aphididae) on apple by providing natural alternative food resources. European journal of entomology 105, 537-540
- Brown M.W., Mathews C.R., Krawczyk G., 2010. Extrafloral nectar in an apple ecosystem to enhance biological control. Journal on economic entomology 103, No 5
- Chateil C, Goldringer I, Tarallo L, Kerbiriou C, Le Viol I, Ponge J.F., Salmon S, Gachet S, Porcher E. 2013. Crop genetic diversity benefits farmland biodiversity in cultivated fields. Agriculture, Ecosystems & Environment. 171:25-32. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.03.004>



Dardouri T., 2018. Implication des composés organiques volatils dans la capacité des plantes de service à perturber le comportement et les performances de *Myzus persicae* (sulzer) le puceron vert du verger. Autre [q-bio.OT]. Université d'Avignon. [\(NNT : 2018AVIG0702\)](#). [\(tel-02178970\)](#)

Finckh M, 2008. Integration of breeding and technology into diversification strategies for disease control in modern agriculture. *Eur J Plant Pathol* 21:399–409, <https://doi.org/10.1007/s10658-008-9273-6>

Gottwald T.R., Hall D.G., Kriss A.B., Salinas E.J., Parker P.E., Beatie, G.A.C., Nguyen M.C., 2014. Orchard and nursery dynamics of the effect of interplanting citrus with guava for huanglongbing, vector, and disease management. *Crop Protection* 64, 93-103

Ichinose K., Hoa N.V., Bang D.V., Tuan D.H., Dien L.Q, 2012. Limited efficacy of guava interplanting on citrus greening disease: effectiveness of protection against disease invasion breaks down after one year. *Crop protection* 34, 119-126

Meng J, Li L, Liu H, Li Y, Li C, Wu G, Yu X, Guo L, Cheng D, Muminov MA, Liang X, Jiang G. 2016. Biodiversity management of organic orchard enhances both ecological and economic profitability. *PeerJ* 4:e2137 <https://doi.org/10.7717/peerj.2137>

Parisi L, Gros C, Combe F, Parveaud CE, Gomez C, Brun L, 2013. Impact of a cultivar mixture on scab, powdery mildew and rosy aphid in an organic apple orchard, *Crop Protection*, 43: 207-212, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.09.014>

Tahvanainen, J.O., Root, R.B. 1972. The influence of vegetational diversity on the population ecology of a specialized herbivore, *Phyllotreta cruciferae* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Oecologia* 10, 321–346 . <https://doi.org/10.1007/BF00345736>

Trenbath BR, 1993. Intercropping for the management of pests and diseases. *Field Crops Research*, 34 : 381-405, [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90123-5](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90123-5)

Sauvion N., Labeyrie B., Brun L., 2020. Enroulement chlorotique de l'abricotier : situation en France - L'ECA demeure une maladie préoccupante pour les vergers d'abricotiers et de pruniers en France. *Phytoma* 735 : 9-10. Simon, S., Bouvier, J.C., Debras, J.F. et al. 2010. Biodiversity and pest management in orchard systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 139–152. <https://doi.org/10.1051/agro/2009013>

Vilich-Meller V, 1992. *Pseudocercospora herpotrichoides*, *Fusarium* spp. and *Rhizoctonia cerealis* stem rot in pure stands and interspecific mixtures of cereals. *Crop Protection*, 11 : 45-50. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(92\)90078-J](https://doi.org/10.1016/0261-2194(92)90078-J)

Wielgoss A, Tschamtk T, Rumede A, Fiala B, Seidel H, Shahabuddin S, Clough Y. 2014. Interaction complexity matters: disentangling services and disservices of ant communities driving yield in tropical agroecosystems, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 281, no. 1775. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.2144>

Pour citer cet article : Marie-Laure Greil, Marie-Hélène Rames, Rémi Segard, Vincent Vallejo, Malick Sow, et al.. Favoriser une régulation naturelle des bio-agresseurs par la diversification et multiplication des habitats en vergers de prunier. *Innovations agronomiques*, 2025, 109, pp.85-87. [10.17180/ciaq-2026-vol109-art07](https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol109-art07)



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.



Made in AB – Maîtrise des ADvEntices en AB

Enguerrand BUREL¹, Ambrogio COSTANZO¹, Alexandre TRICHEUR², Anne-Laure DE CORDOUE³, Loïc VIGUIER³, Florence LETAILLEUR⁴, Aloïs ARTAUX⁵, Jean CHAMPION⁶, Clément BARDON⁶, Aurélien DUPONT⁷, Eve-Anna SANNER⁸, Delphine BARBERIS⁹, Clémence ISAC⁹, Florian CELETTE¹⁰

¹ ITAB 149 rue de Bercy, 75595 Paris cedex 12 - France

² Bio Nouvelle-Aquitaine 347 Avenue Thiers 33100 Bordeaux, France

³ ARVALIS, 3 Rue Joseph et Marie Hackin, 75016 Paris, France

⁴ Chambre 'agriculture de la Sarthe, 15 rue Jean-Grémillon - CS 21312 72013 Le Mans Cedex 2, France

⁵ Chambre d'agriculture des Pays de Loire, 9 rue André Brouard CS 70510 49105 Angers cedex 02, France

⁶ Chambre d'agriculture de la Drôme, 145 Av. G.Brassens - CS30418 | 26504 Bourg Les Valence, France

⁷ Chambre d'agriculture de Bretagne, ZAC Atalante-Champeaux Rond-point Maurice Le Lannou 35042 Rennes Cedex, France

⁸ CREABio, LEGTA Auch-Beaulieu, Route de Tarbes, 32000 Auch, France

⁹ EPLEFPA Chartres-La-Saussaye, EPLEFPA de Chartres La Saussaye 28630 Sours, France

¹⁰ AGRIVIA (ISARA-ISEMA) AGRAPOLE - ISARA LYON, 23 rue Jean Baldassini 69364 Lyon cedex 07, France

Correspondance : enguerrand.burel@itab.asso.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art08>

Résumé

Le projet Made in AB visait à concevoir, évaluer et transférer des stratégies de maîtrise des adventices sans herbicides en grandes cultures sans élevage, conciliant performances agronomiques, environnementales et socio-économiques. Pour cela, il s'appuyait sur un réseau multipartenarial et multisite de 10 expérimentations de systèmes de culture innovants de longue durée conduits en agriculture biologique (RotAB). Les analyses multicritères ont permis de mettre en évidence des stratégies multiperformantes de gestion des adventices sans herbicide dans les systèmes même dans des contextes sans labour et en réduction de travail du sol. Le travail sur les leviers de gestion a également permis de mettre en évidence leur intérêt dans la gestion des adventices. Un des résultats de ce travail aura été de montrer que les couverts peuvent se substituer au travail du sol en interculture sans que la culture suivante soit pénalisée.

Mots-clés : adventices, systèmes, agriculture biologique, évaluation multicritère

Abstract: Made in AB project - controlling adventices in AB

The aim of the Made in AB project was to design, evaluate and transfer herbicide-free weed control strategies for field crops without livestock, reconciling agronomic, environmental and socio-economic performance. To achieve this, it relied on a multi-partner, multi-site network of 10 experiments on innovative long-term cropping systems under organic farming (RotAB). Multi-criteria analyses enabled to highlight multi-performing weed management strategies without herbicides in the systems, even in no-till

and reduced-till contexts. Work on management levers has also highlighted their value in weed management. One of the results of this work was to show that cover crops can replace intercropping tillage without penalizing the following crop.

Keywords: weeds, systems, organic farming, multi-criteria evaluation

1. Introduction

En agriculture conventionnelle, les statistiques montrent qu'avec les aléas climatiques récemment observés les ventes d'herbicide ont augmenté (Ministère de la Transition Ecologique, 2023). Les données des cartes Adonis (Chayre et al. 2024) montrent que cette tendance est variable suivant les cultures et les régions mais sans baisse à l'échelle globale. Cela souligne la complexité d'une réduction du recours aux produits phytosanitaires.

En grandes cultures biologiques, l'Indice de Fréquence de Traitement Phytosanitaire (IFT) peut être considéré comme étant proche de 0 (Sautereau and Benoit, 2016) puisque le cahier des charges exclut le recours aux pesticides de synthèse. Plus spécifiquement, le cahier des charges interdit l'utilisation d'herbicides ce qui nécessite une conception des systèmes de culture et des pratiques intégrant des solutions face aux problématiques de gestion des adventices. Les systèmes biologiques fournissent donc des exemples de systèmes de culture sans usage d'herbicides sur lesquels il est possible de s'appuyer pour s'affranchir des produits phytosanitaires. Les systèmes en AB combinent des solutions permettant non seulement de gérer les bioagresseurs (maladies, ravageurs et adventices) mais visent aussi à optimiser la fertilité du sol en s'appuyant sur des processus biologiques et écologiques. Les méthodes prophylactiques sont privilégiées aux solutions curatives comme le désherbage mécanique et le raisonnement de combinaisons de leviers agroécologiques permet d'élaborer des stratégies de gestion des adventices innovantes s'affranchissant des herbicides. Les références et les logiques de conception de ces systèmes peuvent servir d'inspiration pour les praticiens visant une réduction des herbicides.

L'objectif du projet Made in AB (projet DEPHY EXPE ECOPHYTO 2019-2024) était de produire des références techniques sur la maîtrise des adventices sans herbicides, avec des leviers actionnables en agricultures conventionnelle et biologique (Figure 18). Made in AB a produit des résultats à deux échelles : (i) à l'échelle de leviers individuels (rotation et implantation couvert végétal), et (ii) à l'échelle des systèmes de culture. Ces résultats ont été mobilisés pour évaluer la multi-performance des systèmes sans herbicide. Ce travail s'est appuyé sur la valorisation des suivis des dispositifs longue durée du réseau RotAB mais aussi par la mobilisation de groupes de producteurs pour valider les indicateurs pertinents pour décrire leurs systèmes. Enfin, une des sorties du projet est la base de données constituée dans le projet (analyse multicritère) et qui est accessible librement sur le site data.gouv.fr.

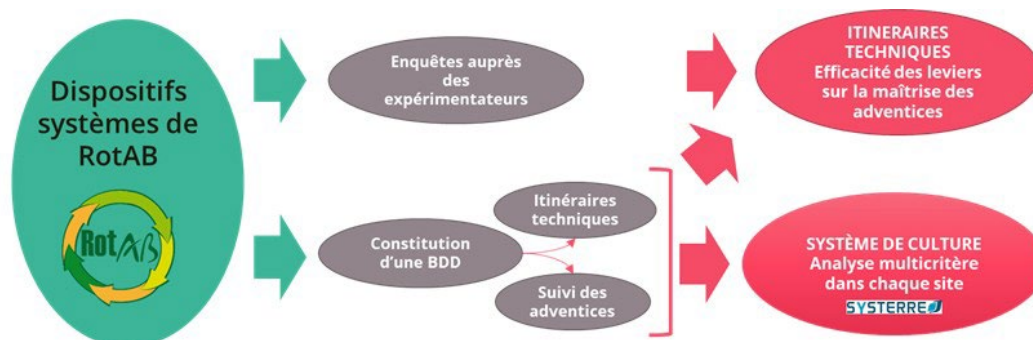


Figure 18 : Schéma des actions réalisées dans le projet Made in AB.



2. L'acquisition et le traitement des données des dispositifs de longue durée

2.1. Le réseau RotAB

Le projet s'est appuyé sur un réseau d'essais longue durée en grandes cultures biologiques sans élevage, RotAB (**Figure 19**). Ce réseau a un historique de partenariat depuis le projet RotAB (2008-2010) qui a permis d'initier les premiers travaux de valorisation transversale des résultats des différentes expérimentations systèmes. Les dispositifs ont des conceptions très variables : Conlie, Kerghennec, Dunière sont des essais systèmes avec tous les termes de la rotation chaque année. Le site de Thorigné (dispositif Rotaleg) a une conception différente qui présente des répétitions spatiales mais qu'un seul terme de la rotation chaque année. Le site de Corbas quant à lui a deux termes de la rotation chaque année (2 cultures qui se suivent dans la rotation) et les autres sites n'ont pas de répétitions et s'approchent plus d'observatoires pilotés ou de suivi de diagnostic (cas spécifique de La Hourre). Chaque site possède aussi des spécificités en termes d'objectif visé, cela peut être de s'affranchir du labour (cas de Corbas), tendre vers un système en agriculture biologique de conservation des sols (ex Conlie) ou encore de viser l'autonomie vis-à-vis des intrants (ex Rotaleg à Thorigné). Chaque site de RotAB est décrit sur le site [ECOPHYTOPIC](http://ecophytopic.org) et dans la base de données en ligne. Tous les expérimentateurs de RotAB ont fait l'objet d'enquêtes qui ont permis l'analyse des leviers de gestion des adventices comme les couverts végétaux et la rotation. L'analyse multicritère a été réalisée sur 3 sites contrastés en termes de conception et de localisation géographique : Kerghennec, Boigneville et Corbas.

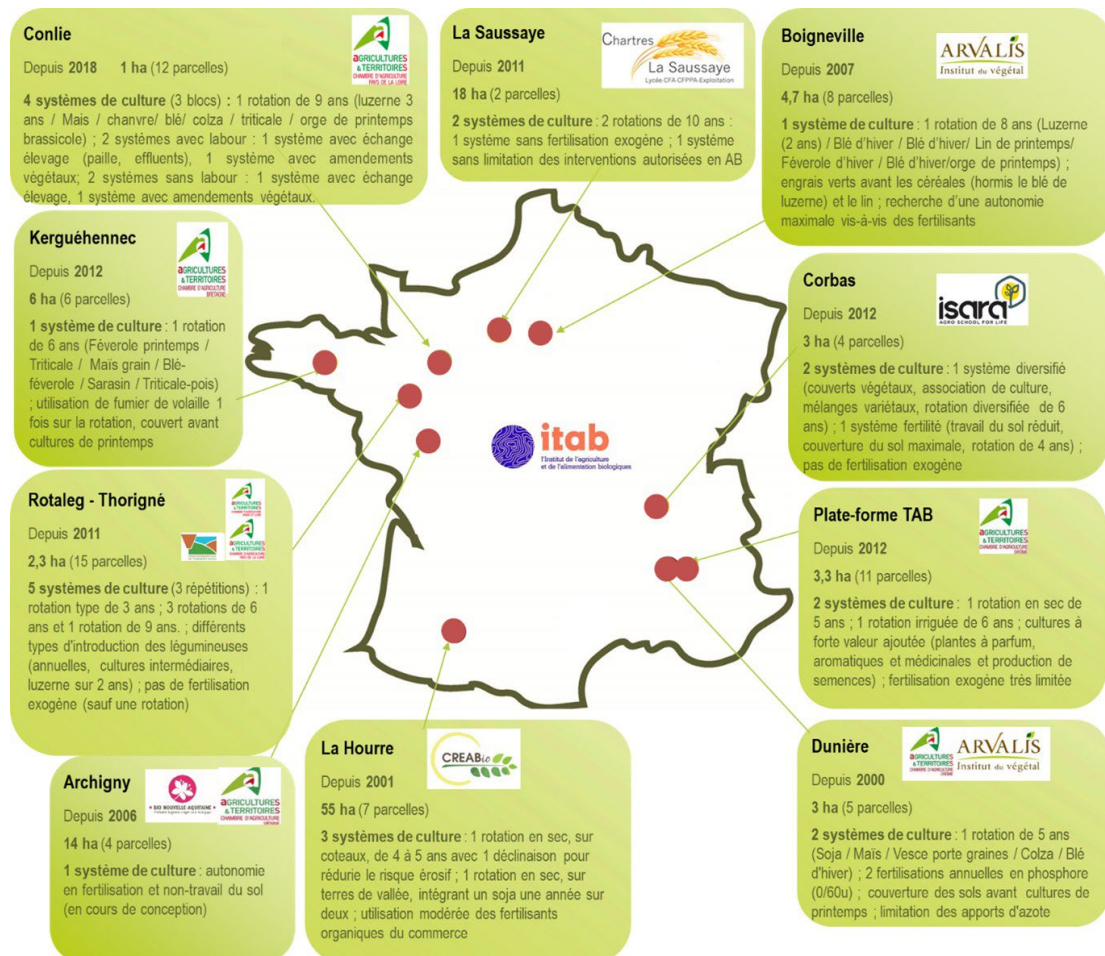


Figure 19 : Carte des sites du projet RotAB et description des dispositifs expérimentaux. Source : ITAB



2.2. Protocole de suivi des sites

Afin de permettre une analyse transversale entre sites, un protocole commun a été établi pour le projet Made in AB. Le but des suivis était d'évaluer l'impact des systèmes de culture sur l'évolution des adventices et intégrait :

- des comptages des adventices et identification de leurs stades en début de culture ou avant la première fauche pour les cultures pluriannuelles ;
- des comptages et identification des stades des adventices à floraison 2 à 3 semaines après le dernier désherbage (sur même surface) ;
- de manière facultative, la satisfaction de désherbage était évaluée par une note subjective par les expérimentateurs.

Dans les suivis, les comptages sont réalisés dans 10 cadres de 0.25 m² disposés aléatoirement. En même temps que le comptage des adventices, le stade des adventices est repéré (stade dominant). Les adventices et la culture étaient également prélevées séparément pour estimer la biomasse sèche à l'étuve (48-72h à 70°C).

3. L'analyse de l'efficacité de différents leviers de gestion des adventices

Des ateliers ont été menés avec les partenaires du projet pour déterminer les leviers les plus pertinents à étudier de manière transversale entre site. Le but étant d'identifier des leviers qui sont connus pour leur efficacité potentielle sur la maîtrise des adventices mais qui nécessitent d'objectiver leur place dans les systèmes de production. Cela a abouti à travailler sur trois leviers de gestion : les couverts végétaux, la rotation, les faux semis.

Ces trois leviers ont été travaillés pendant des stages de fin d'étude et ont permis de valoriser les données et l'expertise des expérimentateurs du projet sur chacun des sites de RotAB. Néanmoins les travaux sur les faux-semis n'ont pas pu aboutir ; il s'est avéré complexe sur le plan méthodologique de valoriser les données sur ce levier. En effet, la définition du faux semis a posteriori dans la base de données est complexe. Son effet est très dépendant de la nature du faux semis (Prieur, 2016) ce qui complexifie d'autant plus son analyse en multi-site. Par ailleurs, les pratiques de travail du sol ne sont pas toujours spécifiquement ciblées sur la gestion des adventices (destruction du couvert, préparation du lit de semence) et il est difficile de définir de manière homogène ce qui est ou n'est pas un faux semis (faux semis de fait vs faux semis intentionnels). A défaut d'aboutir à des résultats exploitables, la réflexion méthodologique a fait apparaître la rareté d'actions spécifiquement identifiées comme faux semis. Souvent les interventions semblaient plus viser la destruction d'une adventice particulière comme les vivaces que de faciliter les levées. Pour un futur travail sur le sujet des faux semis, la qualification des interventions et des objectifs associés devront être relevés (a minima avoir l'information de gestion des vivaces vs action sur le stock d'adventices). Les conditions d'interventions et l'efficacité finale sont aussi des éléments clefs qui ont manqué et qui sont indispensables pour juger de l'efficacité des faux semis. Cela montre également que la caractérisation des règles de décision dans l'ensemble des dispositifs de suivis est une nécessité afin de faciliter l'interprétation des interventions et la compilation des résultats.

3.1. Présentation des indicateurs

L'impact des leviers a été estimé au regard de différents indicateurs (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces indicateurs ont été mis en parallèle de levier de gestion pour étudier l'existence d'un lien de corrélation avec les indicateurs de flore adventices. Ils ont été mobilisés autant pour étudier les composantes de la rotation des systèmes de RotAB que pour étudier l'impact des couverts végétaux sur la flore adventice à l'échelle de la succession culturale.



Tableau 17 : Indicateurs suivis ou calculés pour estimer le degré de maîtrise des adventices.

	Indicateur	Description
Adventices	Nuisibilité	Nuisibilité des adventices à floraison de la culture suivante estimée à priori de 1 (faible) à 3 (forte)
	Compétitivité (nutrition)	Biomasse d'adventices (g/m ²) à floraison de la culture suivante
	Compétitivité	Densité de pieds d'adventices à floraison de la culture suivante par m ²
	Diversité de la flore	Richesse spécifique à floraison de la culture suivante
	Diversité de la flore	Indice de Shannon (Shannon 1949) à floraison de la culture suivante
	Dominance d'adventice	Indice d'équitabilité de Piélu (Piélu 1966) à floraison de la culture suivante
Leviers de gestion	Labour (DernierLab)	Antériorité du dernier labour (années) (nombre d'années sans labour avant la culture. Valeur de 0 si la culture est précédée d'un labour)
	Rotation	Durée de la rotation culturale (années)
	Interculture (Dureeinterc)	Durée de l'interculture entre deux cultures principales (jours)

3.2. Les relations entre indicateurs descriptifs de la flore adventice et les pratiques

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur les différents indicateurs présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Celle-ci a mis en évidence une assez faible corrélation entre indicateurs liés aux adventices et l'antériorité du labour et la durée de la rotation. Malgré le fait que ce soient deux leviers de gestion importants bien connus, cela met en évidence que ce sont des leviers qui, seuls, ne sont pas suffisants pour avoir un impact visible sur la flore. La variable durée de l'interculture semble quant à elle corrélée à la nuisibilité des adventices, avec une nuisance moyenne sur la culture suivante plus importante dans les périodes d'intercultures plus longues.

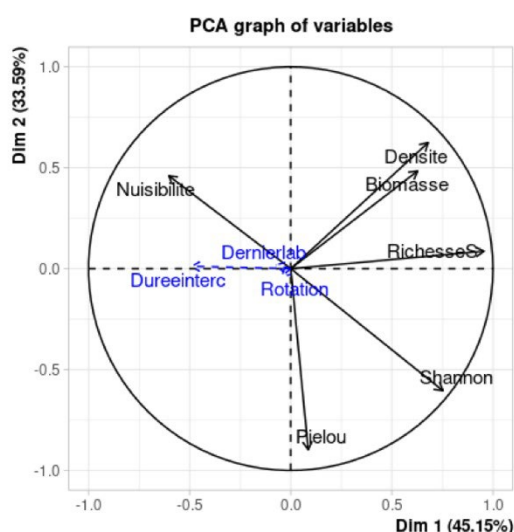


Figure 20 : Analyse en composantes principales sur les variables liées aux adventices (noir) et celles liées aux leviers (bleu). Dureeinterc = Durée de l'interculture (jours), RichesseS = Richesse spécifique, Dernierlab = Antériorité du dernier labour, Rotation = Durée de la rotation

Les relations entre indicateurs montrent également que la nuisibilité a tendance à être inversement proportionnelle aux indicateurs de diversité, équitabilité et de richesse spécifique. Il s'agit d'une corrélation, néanmoins ce résultat est à mettre en parallèle de la bibliographie qui tend à montrer qu'une flore diversifiée pourrait réduire la dominance d'espèces nuisibles (Adeux et al. 2019 ; Mezière et al. 2015 ; Esposito et al 2023). Par ailleurs, la biomasse

aérienne totale d'adventices n'est pas directement reliée à la nuisibilité moyenne. Ce résultat ne permet pas de conclure sur la pertinence de la biomasse comme indicateur de nuisibilité dans les systèmes bio étudiés. Néanmoins, il interroge sur l'existence d'une réelle compétition avec la culture. Enfin la densité d'adventices est un indicateur très lié à la biomasse ce qui tend à montrer une redondance d'information entre les deux indicateurs.

3.3. L'impact des couverts végétaux à l'échelle de la succession culturale

Pour étudier l'impact des couverts végétaux (CV) sur les sites de RotAB, l'échelle de la succession culturale a été privilégiée : les données acquises n'étaient pas encore suffisantes pour travailler de manière transversale entre sites à l'échelle de la rotation. Le détail du travail réalisé est présent dans le rapport de stage d'Alexis Moreau (2020). L'hypothèse H1 qui a été évaluée est que les couverts



végétaux ont un impact significatif sur la flore adventice de la culture qui succède. L'hypothèse H0 étant que l'impact des couverts n'est pas visible dans le cadre d'une analyse transversale.

Pour tester l'hypothèse que les couverts ont un impact sur la flore adventice de la culture qui succède, les durées d'intercultures des dispositifs de longue durée de RotAB ont été catégorisées en interculture courtes avant culture d'hiver (0 à 144 jours) et intercultures longues avant culture de printemps/été (179-318 jours maximum). La comparaison entre les situations avec couverts et sans couverts pour chacune de ces deux périodes a permis de définir s'il y avait des différences significatives sur les indicateurs liés aux adventices (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces différences ont été évaluées par comparaison de moyennes par v-test.

La comparaison de moyennes montre une différence liée à la présence de couvert quel que soit le type d'interculture. En moyenne, il a été observé une moindre biomasse et nuisibilité des adventices mais aussi une réduction d'indice de Shannon. Ce dernier s'interprète différemment selon les 2 périodes d'intercultures. Pour les intercultures courtes, il y a une réduction de la diversité d'adventices avec une dominance d'une partie des espèces qui ont une plus grande densité de pieds au m². Pour les intercultures longues, il existe une richesse spécifique moindre mais en moyenne le risque de dominance n'est pas plus élevé que sans couvert.

Même si ces tendances sont significatives, elles sont à relativiser. En effet, ce sont des différences estimées sur des moyennes qui masquent la forte variation entre systèmes et sites. A titre d'exemple, les couverts en interculture courte ne sont mis en place que sur Boigneville, Conlie, La Hourre et Thorigné/Rotaleg. Par ailleurs, aucune pondération n'a été appliquée par site pour corriger le poids de certains sites qui ont des historiques plus importants de suivi. La biomasse adventice à floraison, présentée (**Figure 21**), illustre bien la forte variabilité dans les données. Les différences sont particulièrement marquées entre période d'intercultures : les intercultures longues sont celle où la réduction de la biomasse adventices est la plus importante. Sur les autres variables, les différences sont trop faibles ou contradictoires entre les tests sur les moyennes et les regroupements statistiques pour pouvoir tirer des conclusions.

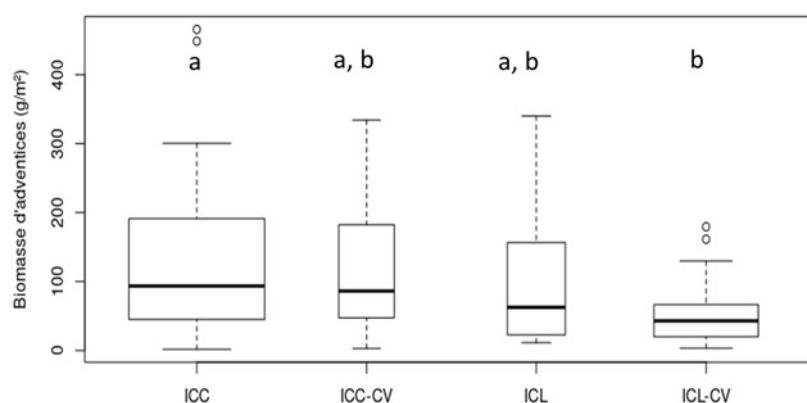


Figure 21 : Boxplots des biomasses adventices à floraison de la culture. Les points représentent les valeurs en dehors des écart types eux même représentés par les extrémités du boxplot ; entre les extrémités de la boîte 50% des données et le trait central représente la médiane. ICC= interculture courte sans couvert, ICL=interculture longue sans couvert, ICC-CV= IC courte avec couvert, ICL-CV : IC longue avec couvert. Les lettres représentent les regroupements réalisés par le test de comparaison de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Les différences sont donc en moyenne très faibles entre situations avec couvert végétal et situation sans couvert. Ce résultat est cohérent avec d'autres travaux (Alletru and Labreuche, 2019 ; Bàrberi and Mazzoncini, 2009 ; Métais et al., 2017, Rouge 2023). Les seules tendances qui se dégagent seraient



d'une part (i) une nuisibilité des adventices réduite en moyenne dans les cultures qui succèdent les couverts et (ii) pour les intercultures longues, un effet assez marqué du couvert qui tendrait vers une plus faible biomasse d'adventices.

Ainsi, à défaut d'observer des effets positifs des couverts, les situations où les couverts ont été implantés ne semblent pas avoir accru le risque de développement des adventices, et ont pu avoir un effet de réduction de la nuisibilité de la flore adventice. La forte variabilité des données est due à de fortes disparités interannuelles mais aussi entre système qu'il serait intéressant d'investiguer à l'avenir, avec le jeu de données complet acquis sur les 6 années du projet (2019-2025).

3.4. L'impact de la rotation sur la flore adventice

L'effet de la rotation de culture dépend de la diversité des cultures qui la compose, de l'alternance des périodes de semis et aussi du lien avec l'itinéraire technique des cultures comme c'est le cas pour la possibilité de biner certaines cultures. L'effet de la rotation impacte les adventices de manière variable. La diversification peut réduire la dominance de certaines adventices (Woźniak, 2019), réduire le stock semencier (Teasdale et al., 2004), diminuer la densité d'adventices (Rodriguez, 2004). L'alternance est aussi efficace pour réduire la pression des adventices à long terme (Anderson., 2010). De manière moins directe, la diversification des rotations et de l'assolement peut avoir aussi un effet positif sur les régulations biologiques (Petit et al., 2015).

Ces travaux montrent la place importante de la rotation pour la maîtrise de la flore adventice. Cependant dans des situations de production réelle, il est nécessaire de hiérarchiser les leviers de gestion mobilisables et d'identifier des combinaisons de leviers efficaces. Le contexte de production mais aussi les contraintes réelles de production sont autant d'éléments supplémentaires qui peuvent aussi venir limiter l'efficacité réelle d'un levier. Pour répondre à ces problématiques, le réseau RotAB a été mis à contribution de deux manières :

- la mise en place d'une enquête semi-directive auprès des expérimentateurs du réseau ;
- la valorisation des données adventices recueillies sur les sites d'expérimentations.

Pour ces enquêtes, le but était de bénéficier de l'expérience des expérimentateurs systèmes, d'une part pour leur connaissance de la gestion des adventices mais aussi pour objectiver la logique de construction de leurs systèmes. Tous les résultats sont restitués dans le rapport de stage de Grégoire Labiche (Labiche, 2022).

Les enquêtes menées auprès des expérimentateurs ont permis de mettre en évidence que les leviers ayant un impact sur des pas de temps les plus long sont considérés comme les plus efficaces. C'est le cas notamment de la diversification et l'alternance des cultures ou de la couverture pluriannuelle des sols (ex prairie temporaire). Dans le cas d'un couvert permanent, il s'agit d'un levier qui a été relevé particulièrement pertinent mais qui n'est pratiqué que sur un site (Rotaleg Thorigné) et est particulièrement complexe à concilier avec une bonne maîtrise de la flore adventice, notamment parce que cette couverture maximale du sol est associée à une réduction du travail du sol (antagonisme avec degré de satisfaction de mise en application). Néanmoins, la bibliographie valide l'importance de la couverture du sol comme un critère important pour la gestion des adventices à long terme (Munier-Jolain et al., 2012).

Pour autant, les leviers qui visent une maîtrise des adventices annuelles ne sont pas à négliger. Le degré de satisfaction de maîtrise est souvent perçu comme élevé sur ces leviers. Par ailleurs, la combinaison de ces pratiques, dans le cas du site de Corbas comme l'association « cultures sarclées » et « alternances des cultures » permet une bonne maîtrise de l'enherbement, y compris des graminées, même sur la modalité sans labour. Cela se retrouve aussi sur les biomasses d'adventices où les cultures d'hiver (non binées) ont une biomasse d'adventices à floraison plus importante que les cultures



d'été/printemps souvent sarclées. Globalement les expérimentateurs ont tous souligné que la rotation et les composantes présentées sont toutes efficaces mais jamais seule : c'est la combinaison de pratiques qui permet d'avoir une satisfaction vis-à-vis des adventices.

En revanche, le degré de satisfaction de certains leviers liés à la rotation peut être très variable. C'est le cas de la couverture pluriannuelle (pose parfois souci sur les graminées), l'alternance des cultures sur les adventices peu sensibles au labour (majoritairement vivaces) et l'utilisation de cultures sarclées. Dans le cas des prairies temporaires, la fréquence de fauche pourrait expliquer ces variations de réponse : sur certains systèmes, certaines fauches n'ont pas géré la grenaison ; ce qui peut limiter l'efficacité de ce type de levier. Il existe également un antagonisme de gestion de certains types d'adventices : avec des prairies temporaires, les vivaces pourront être étouffées mais les graminées peuvent plus facilement se développer. L'alternance des cultures peut être une réponse à cette problématique mais doit être adaptée à chaque contexte. L'analyse des données des sites montre que les alternances optimales sont différentes entre sites (Labiche, 2022).

4. Analyse multicritère des sites de RotAB

4.1. Les données et hypothèses de travail

Afin d'analyser les systèmes de RotAB selon des critères importants pour les producteurs, un travail d'identification d'indicateur de performance a été réalisé par des groupes de producteurs DEPHY Ferme et une enquête présentée au salon Tech&Bio. La liste préliminaire de ces indicateurs est issue d'InnovAB (Fontaine et al. 2019) et soumis au vote (prioritaire, secondaire, hors sujet). Tous les indicateurs proposés sont apparus pertinents même si tous ne sont pas apparus comme étant des éléments essentiels à l'évaluation. Un indicateur nouveau a été identifié avec la présence d'une CUMA sur le territoire et qui est à relier avec l'organisation du travail et les aspects économiques.

L'analyse multicritère a principalement été réalisée à l'aide de l'outil Systerre® développé par Arvalis sur lequel les expérimentateurs systèmes se sont appuyés pour analyser les résultats produits à l'échelle de la rotation. Les sorties ont été comparées aussi avec d'autres indicateurs issus des suivis, en particulier les relevés d'adventices. Des hypothèses de travail ont dû être formulées pour extrapoler les résultats des dispositifs à des exploitations virtuelles sous Systerre®. L'adaptation de chaque choix a été réalisée sur la base de l'expertise des expérimentateurs pour être représentatif de leur système dans leur contexte pédoclimatique. Les hypothèses de travail ont eu un impact sur :

- la surface totale associée à chaque système : la plateforme TAB 90 ha, Conlie, Kerghennec et La Hourre 100 ha, Thorigné/Rotaleg 135 ha, Dunière 150 ha, La Saussaye 180 ha, Corbas 200 ha et pour Boigneville 300 ha ;
- le coût du matériel (au cas par cas hypothèse d'achat en neuf/occasion) ;
- la main-d'œuvre : un exploitant par système sauf pour Dunière (1 exploitant + 1 salarié) et la plateforme TAB (1 exploitant plus main-d'œuvre occasionnelle pour castration du maïs), sur Thorigné 1 exploitant et 0.3 unité de travail humain salarié ;
- l'extrapolation des résultats annuels des cultures en une rotation complète assolée dans le cas de systèmes n'ayant pas tous les termes de la rotation chaque année

Le coût du matériel a dû être ajusté pour rester représentatif des exploitations : ex sur le site la Hourre une partie des outils a été considérée comme étant achetée d'occasion ce qui n'a pas été le cas dans la réalité (suréquipement liée à des activités pédagogiques qui a été subventionné partiellement et des surfaces en conventionnel non intégrées dans Made in AB).

Pour l'analyse multicritère, tous les dispositifs n'ont pas pu être valorisés faute d'avoir des données complètes à temps pour l'analyse. Seuls les sites de Kerghennec, Corbas et Boigneville ont été retenus



(données valorisées par culture et à l'échelle de la rotation de chaque système). La diversité de leur conception et des contextes pédoclimatiques permettent néanmoins de représenter une diversité suffisante pour en tirer des enseignements.

A défaut d'une analyse de chaque site, l'ensemble des données des 10 sites sont rendus accessibles sur le site data.gouv (Made in AB -RotAB) pour donner la possibilité à de futures valorisations des données acquises. Ces données accessibles à minima sur la durée du projet mais parfois depuis le démarrage des dispositifs systèmes En complément des données, l'analyse des dispositifs, système par système est présentée sur le site ECOPHYTO

4.2. Les enseignements de l'analyse multicritère sur les essais systèmes des sites de Corbas, Kerghennec et Boigneville

Sur tous les systèmes étudiés aucun des indicateurs est en dessous des critères d'acceptation des expérimentateurs système, cela est notamment dû au fait que tous les systèmes peuvent être considérés comme durables sur les différents indicateurs (fertilité, économique, organisationnels, flore adventice contenue). Certains de ces indicateurs sont présentés (**Tableau 18**).

En revanche il y a des points de vigilance sur les tendances observées sur les sites. C'est notamment le cas des aléas économiques ou de maîtrise des adventices qui sont très liés à la diversification des cultures. L'effet de la diversification dans un système est bien visible sur le site de Corbas où il est possible de comparer le système « fertilité » (sans labour) et le système « diversité » (axé diversification des cultures). Sur la rotation « fertilité », les variations des marges sont plus importantes liées aux fluctuations des prix de vente. Cette diversification peut aussi s'accompagner dans un premier temps par des résultats en deçà des attentes, notamment à cause de l'apprentissage de la maîtrise des itinéraires techniques. A Corbas, cela s'est traduit par le développement plus important des adventices sur les nouvelles cultures implantées (pois chiche, colza et maïs). Les années suivantes, l'implantation des cultures ont été mieux réussies ; ce qui a permis d'avoir des résultats satisfaisants en termes de rendement et de maîtrise de la flore adventice.

A l'échelle de certaines cultures, les critères d'acceptation sont à peine atteints et voire même en deçà de l'acceptable comme la féverole de printemps à Kerghennec où le rendement objectif est à peine acceptable à cause d'une pression adventice insuffisamment maîtrisée ou des rendements aléatoires liées au contexte climatique (cas du sarrasin).

Tableau 18 : Indicateurs descriptifs des 4 systèmes étudiés pour l'analyse multicritère. Les indicateurs sont calculés sur la moyenne des cultures de la rotation (minimum une rotation). Le rendement objectif est défini selon les sites par site selon l'historique de données disponibles, des références externes (nouvelles cultures) ou par des agriculteurs

Rotation/système	Pourcentage rendement objectif (%)	Biomasse adventices (tonnes matière sèche/ha)	Temps de travail global (heures/ha)	Marges directes avec aides (moyenne rotation en euros)
Boigneville	96%		3.7	780 €
Corbas - Diversité	88%	0.3	5.9	1 013 €
Corbas - Fertilité	84%	0.5	5.6	966 €
Kerghennec	99%	1.1	6.4	1 066 €

Deux éléments clefs sont relevés sur tous les sites pour la réussite des cultures : la rapidité d'implantation et les conditions d'intervention pour le désherbage. Ce sont les éléments explicatifs majeurs des échecs de culture ou des rendements en deçà des attentes. Dans le cas de Kerghennec, l'outil J-DISPO (Métais et al. 2024) a été testé et utilisé pour diagnostiquer les raisons d'interventions peu efficaces. Les résultats ont montré que sur cultures d'hiver les fenêtres de passages de la herse étrille, en conditions optimales, sont très faibles en particulier pour l'avoine et l'association triticale/pois.



En conséquence, les années avec peu de jours disponibles pour intervenir et où la réactivité demandée est importante, la maîtrise des adventices est souvent plus faible. C'est notamment le cas observé sur avoine en 2019 avec une biomasse aérienne d'adventices de 2 t/ha contre moins de 0.5 t/ha sur les années avec plus de jours disponibles.

Concernant le cas spécifique du non-labour, le site Corbas et le système « fertilité » montre une augmentation du risque de développement des adventices (cf. biomasse adventice **Tableau 18**), en particulier des graminées (principalement le ray-grass) comparativement au système diversité. Les densités de ray-grass sont clairement plus élevées sur orge avec une différence marquée entre les deux systèmes « diversité » (densité maximale de 3 pieds/m²) et « fertilité » (densité maximale de 200 pieds par m²). En dehors de la culture d'orge, les graminées sont plutôt contenues même sur la modalité sans labour. Cette maîtrise des adventices en non-labour s'explique par une alternance de cultures qui réduit le risque de développement des graminées sur les cultures d'hiver mais aussi par des fréquences élevées d'intervention (travail du sol) qui remplace l'action du labour. Dans une situation où le travail du sol serait réduit, il serait probable de voir une augmentation des graminées. Sur les modalités en agriculture biologique de conservation (ABC) du site de Conlie, cette augmentation est visible avec un impact significatif sur le rendement entre système ABC et système avec un travail du sol plus classique.

La rentabilité économique est aussi très liée au contexte du marché et au contexte local. Sur les trois sites deux scénarios de prix de vente ont été testés et comparés avec les prix réellement observés : un scénario avec prix 2021 (hypothèse plutôt favorable) et un scénario avec prix 2023 (hypothèse fortement défavorable). Sur les trois sites, seul Boigneville est affecté par des hypothèses de prix de vente bas et hausse des charges au point de questionner la viabilité du système (données accessibles sur data.gouv ; **Figure 22**). Avec des hypothèses de prix de vente de 2023 sur Boigneville, le système est à peine viable et est alors très dépendant des aides (marge directe hors aides en moyenne de 8 euros/ha/an). Cela suggère que dans un contexte de marché défavorable, la conception des systèmes pour la gestion des adventices doit concilier la nécessité de réduire des charges de production et de diversifier des cultures pour compenser les variations de marché de vente entre cultures.

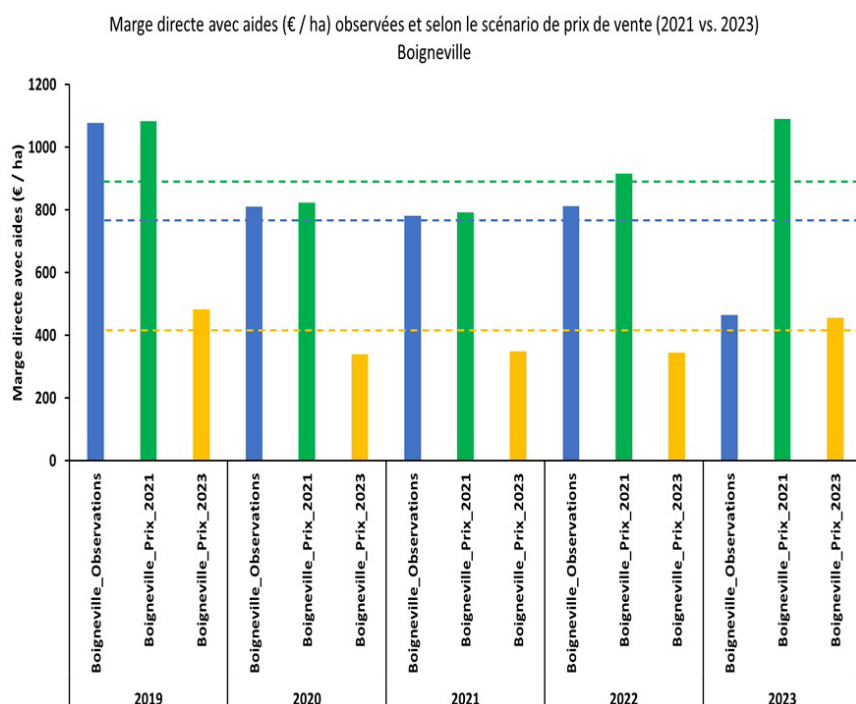


Figure 22 : Marge directes moyennes sur le site de Boigneville et pour trois hypothèses de prix : les prix observés par année, selon les prix 2021 (Hypothèse prix de vente élevés et prix carburant 0.63 € / l) ou selon les prix de 2023 (Hypothèse prix de vente bas et prix carburant 1.13 € / l). Les trois scénarios ont été testés sur les données de suivi de 2019 à 2023. Les moyennes sont estimées sur l'ensemble des cultures de la rotation. Source : Loïc Viguié – Arvalis



5. Discussion

5.1. Quelle performance dans les stratégies de gestion proposées par les dispositifs de RotAB ?

Le projet Made in AB a mis en évidence la complexité du positionnement des pratiques et l'équilibre nécessaire entre tous les leviers pour maîtriser les adventices. Néanmoins la multiperformance des dispositifs système montre des résultats globalement satisfaisants à l'échelle de la rotation. Sur le plan économique, cette performance est néanmoins dépendante des aides et n'est pas ou peu viable dans des années comme 2023 où les prix de vente étaient faibles et les charges élevées.

Les systèmes testés dans RotAB sont par leur essence innovants mais il n'est pas à exclure que ces innovations puissent se traduire par une dégradation des performances non visées directement dans leur conception par rapports aux contextes de productions couramment rencontrés. Sur le site de Kerghennec le système AB a pu être comparé à une exploitation fictive moyenne du contexte breton et les 7 indicateurs regardés, rendement énergétique, marge directe avec aides, le temps de travail total, l'efficacité économique des intrants, les émissions de gaz à effet de serre, l'IFT total et la diversité des cultures, les performances sont bien supérieures à l'exception de l'indicateur de rendement énergétique qui est dégradé de -34% du système fictif moyen (site ECOPHYTO – page Kerghennec). Sur le système bio autonome de Boigneville cette comparaison a été réalisée de 2009- à 2022 sur une ferme type du Bassin parisien et fait un constat similaire sur l'efficacité énergétique mais avec des performances plus nuancées sur les autres critères (Pegues et al. 2023). Sur les critères économiques et environnementaux le dispositif est assez proche de la ferme type et parfois en retrait notamment sur la marge nette. Celle-ci reste néanmoins positive (223 euros/ha). Ces deux exemples rassurent sur l'aspect réaliste des systèmes étudiés dans RotAB. Sur la gestion des adventices, les systèmes en réduction de travail du sol ou en non-labour ont un degré de satisfaction moindre au global de par la complexité de la maîtrise des adventices (Labiche, 2022).

5.2. Comment concevoir des systèmes permettant de gérer les adventices sans recours au produits phytosanitaires ?

Concernant la maîtrise des adventices des sites en réduction du travail du sol ou non, l'effet de compétition des cultures est un des leviers les plus efficaces. D'une part via l'utilisation de couverts végétaux mais aussi en misant sur des cultures étouffantes comme les prairies temporaires. La stratégie d'étouffement seule n'est cependant pas suffisante : dans les systèmes de RotAB plusieurs éléments clefs de la construction ont été identifiés :

- l'intégration de cultures sarclées ;
- l'alternance des cultures doit intégrer une diversité de période de semis printemps/été/hiver ;
- la diversification de culture de même cycle assure une diversification de phénologie et de phénotypes des cultures.

L'équilibre à trouver entre ces leviers est dépendant des objectifs du système de production, que ce soit en termes de rendement mais aussi de pratiques comme c'est le cas dans des systèmes en réduction du travail du sol.

L'acceptabilité des adventices dans les systèmes sans herbicides, une piste à explorer ?

Deux autres éléments sont importants à travailler : l'acceptabilité des adventices et les indicateurs de gestion. La question du seuil d'adventices acceptable est apparue fréquemment lors du projet et les indicateurs regardés ne sont pas toujours suffisants pour estimer un impact a priori sur les cultures. En prenant l'exemple du site de Kerghennec la relation biomasse adventice et rendement par culture ne montre de corrélation positive que sur maïs et féverole. Cela n'exclue pas un effet des adventices sur

les autres cultures, toutefois l'effet de compétition adventice semble peu évident. En parallèle de ce constat, les travaux sur les couverts et les travaux récents tendent à montrer qu'une flore diversifiée pourrait contenir les adventices nuisibles (Adeux et al. 2019 ; Mezière et al. 2015 ; Esposito et al. 2023). Une piste supplémentaire pour améliorer la maîtrise des itinéraires techniques serait de recentrer la gestion d'adventices uniquement sur celles qui sont nuisibles, en favorisant celles dont les externalités sont positives, notamment pour la régulation des autres espèces.

5.3. La valeur scientifique, technique et pédagogique des dispositifs de longue durée : le cas de RotAB

L'analyse des dispositifs de longue durée de RotAB a aussi permis de discuter la valeur scientifique, technique et pédagogique de ces dispositifs. Intrinsèquement, ils sont adaptés à l'étude de thématiques visibles sur des pas de temps long comme sur la maîtrise de la flore adventices ou encore l'évaluation de la fertilité du sol. Mais au-delà de l'échelle d'analyse du dispositif la place du dispositif de suivi de longue durée permet d'objectiver la place des leviers souvent travaillés de manière analytique (**Figure 23**). Ces dispositifs jouent aussi un rôle pédagogique et de démonstration qui est d'autant plus important que les résultats produits s'inscrivent dans un cadre proche de la situation producteur. Les échanges avec des producteurs (expérience du site de Kerghennec) ou la mise en place de suivi chez des producteurs (cas du site d'Archigny) peuvent permettre de mettre en évidence le caractère innovant de ces dispositifs. Les agriculteurs sont d'ailleurs souvent partie prenante dans la conception et le pilotage des dispositifs (ex Conlie).

Derrière les dispositifs de suivi long terme, il existe une diversité de suivis qui ont chacun des limites méthodologiques différentes. Certains dispositifs comme les suivis de diagnostic n'ont pas de rotation fixée et se rapprochent fortement d'une situation réelle de production mais avec la difficulté à interpréter les résultats (cas du site de la Hourre). A contrario certains dispositifs comme Rotaleg ou Conlie intègrent des systèmes de référence et ont plusieurs blocs répétés spatialement. L'interprétation est facilitée au détriment d'une capacité de modifier la rotation. Malgré cette diversité de dispositifs, la mise en réseau des suivis et la mise en place de protocole commun permet de dégager des réponses transversales entre sites comme cela a été le cas pour Made in AB.

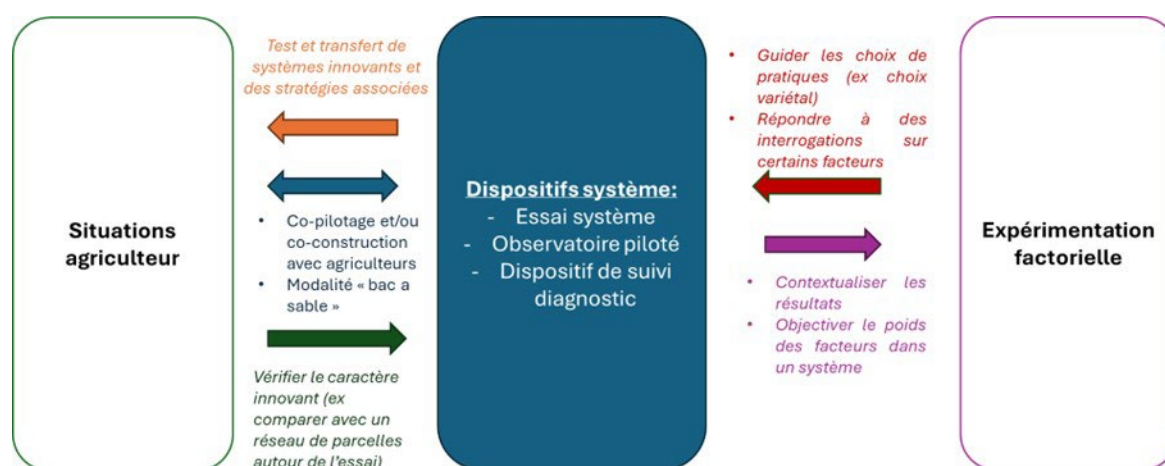


Figure 23 : Schéma des interactions des dispositifs de suivi longue durée

L'interprétation des dispositifs longue durée de manière trans-site nécessite en sus des précautions méthodologiques liés à leur conception. D'une part, pour rester dans le domaine de validité des dispositifs ou des protocoles de suivi qui ne permettent pas toujours de décorrélérer les effets (cas de l'étude des leviers de gestion des adventices). L'étude de leviers de gestion doit se focaliser sur l'objectivation de la place de ces leviers dans des systèmes. D'autre part, parce que transposer les



résultats d'un dispositif de suivi longue durée à une situation réaliste nécessite de prendre en compte la différence d'échelle et conserver la cohérence des systèmes. Sur ce point, Made in AB a permis de tester l'outil J-DISPO qui est particulièrement pertinent pour s'assurer que les temps d'intervention sont bien cohérents avec les fenêtres d'intervention.

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 ou sur le site data.gouv.fr

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

Ambrogio COSTANZO : [0000-0002-0605-0821](https://orcid.org/0000-0002-0605-0821),

Enguerrand BUREL : [0000-0003-1966-7844](https://orcid.org/0000-0003-1966-7844),

Florian CELETTE : [0000-0001-7614-9491](https://orcid.org/0000-0001-7614-9491),

Loïc VIGUIER : [0000-0001-7863-9478](https://orcid.org/0000-0001-7863-9478)

Contributions des auteurs (taxonomie CRediT)

Enguerrand Burel : rédaction - version originelle, visualisation, **Ambrogio Costanzo** : rédaction - révision et correction, administration du projet, visualisation, **Alexandre Tricheur** : recherche, **Anne-Laure De Cordoue** : recherche, **Loïc Viguié** : rédaction - révision et correction, curation des données, analyse formelle, recherche, visualisation, **Florence Letailleur** : rédaction - révision et correction, recherche, **Aloïs Artaux** : rédaction - révision et correction, analyse formelle, recherche, , méthodologie **Jean Champion** : recherche, **Clément Bardon** : recherche, **Aurélien Dupont** : rédaction - révision et correction, , méthodologie, analyse formelle, **Eve-Anna Sanner** : recherche, **Delphine Barberis** : recherche, rédaction - Révision et correction, **Clémence Isac** : recherche, rédaction - Révision et correction **Florien Celette** : curation des données, analyse formelle, Investigation , méthodologie

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Nous remercions Alexis Moreau, Grégoire Labiche et Hélène Chesneau pour leurs travaux de stage sur le projet Made in AB. Nous adressons également des remerciements à tous les contributeurs directs ou indirects à Made in AB, notamment aux agriculteurs des groupes DEPHY FERME qui ont permis d'identifier les critères clefs pour évaluer les systèmes.

Déclaration de soutien financier

Le projet a été financé avec les fonds de l'OFB dans le cadre du programme ECOPHYTO DEPHY EXPE 2.



Références bibliographiques

- Adeux, G., Vieren, E., Carlesi, S. et al. 2019. Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nat Sustain* 2, 1018–1026. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0415-3>
- AGRESTE (2013) Les indicateurs de fréquence de traitement (IFT) en 2011 en France. Agreste Les Dossiers 18:5–9.
- Alletru, C., Labreuche, J., 2019. Impact du travail du sol et des couverts végétaux en interculture sur la gestion des adventices en grandes cultures. Presented at the Végéphyt - 24ème conférence du COLUMA Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Orléans.
- Anderson, R.L., 2010. A rotation design to reduce weed density in organic farming. *Renew. Agric. Food Syst.* 25, 189–195. <https://doi.org/10.1017/S1742170510000256>
- Bàrberi, P., Mazzoncini, M., 2009. Changes in weed community composition as influenced by cover crop and management system in continuous corn. *Weed Science* 49, 491–499. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2001\)049\[0491:CIWCCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2001)049[0491:CIWCCA]2.0.CO;2)
- Chayre, A., Gibert, C., Mezilet, Y., 2024. Carte ADONIS présentant par commune l'usage des pesticides au travers de l'indice de fréquence de traitement. Version du 4 novembre 2024. SOLAGRO, 44 pages
- Esposito M, Westbrook AS, Maggio A, Cirillo V, DiTommaso A, 2023. Neutral weed communities: the intersection between crop productivity, biodiversity, and weed ecosystem services. *Weed Sci.* 71:301–311. <https://doi.org/10.1017/wsc.2023.27>
- Fontaine L., Celette F., Cordeau S., Métais P., Vacher C., Cohan J-P., Fourrié L., Jouany C., Leclerc P., Vericel G. et al. 2019. InnovAB - Améliorer les systèmes de grande culture en agriculture biologique : enseignements d'un réseau d'expérimentations de longue durée. *Innovations Agronomiques*, 2019, 71, pp.295-309. (10.15454/8lpmxj). (hal-02105010)
- Labiche G., 2022 Evaluer l'impact de la rotation culturale sur la maîtrise des adventices en Agriculture Biologique. 119p doi: 10.13140/RG.2.2.11177.81767
- Made in AB -RotAB : <https://www.data.gouv.fr/datasets/made-in-ab-rotab/>
- Métais P., Lacoste M., Dul P., Celette F., Viguier L. 2024. Estimation of available days for mechanical weeding with J-DISTAS: relevance and limits in cropping systems evaluation. European Society of Agronomy Congress, poster.
- Métais, P., Vuillemin, F., Cordeau, S., 2017. Étude de l'effet du travail du sol et des couverts sur les adventices dans des contextes de production variés. Séminaire de restitution à mi-parcours du projet de recherche ANR CoSAC, INRA, Paris.
- Mézière D, Colbach N, Dessainta F, Granger S 2015. Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators *Eur. J. Agronomy* 68 (2015) 22–37 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.004>
- Moreau A. 2020 Évaluer l'impact des couverts végétaux dans la maîtrise des adventices en AB », 35 pages
- MTECT. 2023. État des lieux des ventes et des achats de produits phytosanitaires en France en 2021
- Munier-Jolain, N., Mediene, S., Meiss, H., Boissinot, F., Rainer, W., Jacques, C., Bretagnolle, V., 2012. Rôle des prairies temporaires pour la gestion de la flore adventice dans les systèmes céréaliers. *Innov. Agron.* 22, 71–84.
- Pegues, A., Carel Y., Bouttet, D., Pesou R., 2023. Essai bio longue durée : zoom sur les côtés économique et environnemental. *Terre-net*. article en ligne accès le 04/07/2025
- Petit, S., Labruyère, S., Trichard, A., Ricci, B., Bohan, D., 2015. Gestion territoriale des adventices : effets des propriétés du paysage sur les communautés adventices et sur leur régulation par les carabidae. *Innov. Agron.* 43, 71.
- Pielou, E.C., 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13(1), 131–144



Prieur L. 2016. Gestion des adventices : les faux semis. Alter Agri mars-avril 2016 p 26-28

Rodriguez, A., 2004. Le contrôle de la flore adventice en grandes cultures biologiques. Première partie : connaître la biologie des adventices pour mieux les gérer. Alter Agri 4-7.

Rouge, A. 2024. Régulation biologique des adventices par les couverts d'interculture : identification des déterminants et quantification des effets à différentes échelles temporelles. Thèse soutenue le 9 novembre 2023.

Sautereau N, Benoit M 2016. Quantifier et chiffrer économiquement les externalités de l'agriculture biologique ?

Shannon, C. E., 1948. A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal, 27, 379–423, 623–656

Sicard H, Arino J, Aubert C, et al 2012. Désherber mécaniquement les grandes cultures.

Teasdale, J.R., Mangum, R.W., Radhakrishnan, J., Cavigelli, M.A., 2004. Weed Seedbank Dynamics in Three Organic Farming Crop Rotations. Agron. J. 96, 1429–1435. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1429>

Woźniak, A., 2019. Effect of Crop Rotation and Cereal Monoculture on the Yield and Quality of Winter Wheat Grain and on Crop Infestation with Weeds and Soil Properties. Int. J. Plant Prod. 13, 177–182. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00044-w>

Pour citer cet article : Enguerrand Burel, Ambrogio Costanzo, Alexandre Tricheur, Anne-Laure de Cordoue, Loïc Viguié, et al.. Made in AB -Maîtrise des ADvEntlces eN AB. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.98-112. [10.17180/ciag-2026-vol109-art08](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Contribution des aménagements agroécologiques à la régulation des ravageurs en cultures maraîchères sous abri : Projet DEPHY COSYNUS 2019-2024

Jérôme LAMBION¹, Pierre LASNE², Anthony GINEZ³

Avec la collaboration de Marine BRUNO, Aurélie FERRER, Valérie FONTAINE, Benjamin GARD, Emilien GENETIER, Camille GIRAUDET, Danny LEBRETON, Inès MAHE

¹ GRAB : BP 11283, 84911 AVIGNON cedex 9, France

² CTIFL : Antenne de Brindas, Les Hôteaux, 123 chemin du Finday, 69126 BRINDAS, France

³ APREL : route de Mollégès D31, 13210 Saint Rémy de Provence, France

Correspondance : jerome.lambion@grab.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art09>

Résumé

Après un diagnostic agro-environnemental initial, des aménagements agroécologiques ont été mis en œuvre de façon préventive sur trois sites, à l'échelle de l'exploitation : bandes fleuries, zones réservoirs, bandes de céréales, haies... Des stratégies de transfert actif d'auxiliaires entre les aménagements et les cultures ont aussi été réalisés. L'enherbement spontané a été géré de façon raisonnée. L'articulation entre les leviers de gestion des ravageurs (biodiversité fonctionnelle, lutte biologique, prophylaxie, traitements phytosanitaires) a été étudiée, notamment à travers la rédaction de règles de décision. Les objectifs visés ont été atteints sur les 3 sites expérimentaux : rendements maintenus, amélioration de la marge sur l'exploitation en Agriculture Biologique (AB) (réduction des achats d'auxiliaires), réduction forte des Indices de Fréquence des traitements (IFT) insecticides sur les sites en conventionnel.

Mots-clés : biodiversité fonctionnelle, régulation naturelle, auxiliaires, expérimentation système, règles de décision

Abstract: Contribution of agro-ecological infrastructures to the regulation of pests in vegetable production under greenhouses: DEPHY COSYNUS project 2019-2024

After an initial diagnosis, preventive agro-ecological infrastructures (flower strips, banker plants, cereal strips, hedges...) were implemented on three sites, on a farm-wide scale. Active transfers of natural enemies between agro-ecological infrastructures and crops were also realized. Spontaneous flora was managed to optimize the presence of natural enemies. The combination of the different pest management levers (functional biodiversity, biological control, prophylaxis, phytosanitary treatments) was studied, using decision rules. The objectives were achieved on the three experimental sites: commercial yields were maintained, net margin on the organic farm was improved (fewer natural enemies purchased), and Treatment Frequency Index for pests on the conventional sites was significantly reduced.

Keywords: functional biodiversity, natural regulation, natural enemies, system experiment, decision rules



1. Contexte et objectifs

1.1. La biodiversité fonctionnelle : une approche relativement nouvelle

Depuis plusieurs décennies, une perte de biodiversité sans précédent s'opère dans le monde et l'intensification de l'agriculture en est une des raisons principales (Altieri, 1999, Rusch et al., 2016), à cause de la simplification des paysages agricoles et de la diminution et fragmentation des espaces non-cultivés (Tscharntke et al., 2005). Or, la biodiversité rend de nombreux services essentiels à l'Homme dont la régulation des ravageurs des cultures (Altieri, 1999 ; Landis et al., 2000). Les travaux scientifiques montrant l'intérêt de cette biodiversité dite fonctionnelle sont nombreux, et ont concerné des échelles différentes : le paysage autour des parcelles agricoles étudiées (Gillespie et al., 2016, Pfister et al., 2017) mais aussi les Infrastructures Agro-Ecologiques (IAE) au sein des exploitations.

Les travaux scientifiques internationaux ont souvent concerné le plein champ, en cultures légumières ou en grandes cultures : par exemple, sur chou (Luka & Barloggio, 2016 ; Balmer et al., 2014), en grandes cultures (Van Rijn & Wäckers, 2016 ; Ramsden et al., 2015), sur pomme de terre (Tschumi et al., 2016). Les cultures maraîchères, notamment sous abri, ont jusqu'ici été peu concernées (Pinheiro & Manandhar, 2015). Messelink a bien mis en avant le potentiel important de la biodiversité fonctionnelle pour les abris, ainsi que les marges de progrès possibles (Messelink et al, 2014, Messelink et al, 2021). Les travaux français récents réalisés dans le cadre de programmes nationaux ont permis de faire avancer les connaissances. Dans AGATH et dans PARCEL-R, les bandes fleuries annuelles semées en bordure de melonnière en plein champ ont permis d'augmenter significativement les populations de prédateurs de pucerons, notamment coccinelles, dans les cultures (Schoeny et al., 2014 ; Lambion & Franoux, 2016 ; Picault et al., 2017). Dans MACROPLUS, des bandes fleuries à base de souci officinal ont permis le maintien de punaises prédatrices au sein des abris permettant de réguler efficacement aleurodes et *Tuta absoluta* (Lambion, 2013). Dans MUSCARI, différents mélanges fleuris à base de vivaces ont été semés et comparés, ce qui a permis d'élaborer un mélange optimal en terme d'occupation du sol et de refuge pour les auxiliaires (Warlop et al., 2018).

Ces bandes fleuries permettent de créer des conditions favorables au développement et au maintien des auxiliaires. L'intérêt de ces IAE peut cependant être insuffisant (Tscharntke et al, 2016) et présenter un caractère aléatoire, avec des variations inter-annuelles. Pour certains ravageurs comme le thrips (Picault et al., 2018), les IAE ne permettent pas une régulation satisfaisante et semblent mêmes problématiques. Certaines IAE mises en place en culture de fraisier sous abri dans le cadre de FRAGASYST ont pu héberger des auxiliaires en quantité importante, sans que l'effet sur les cultures ait pu être vérifié (Turquet et al., 2024). La gestion des ravageurs doit donc être globale, à l'échelle du Système De Culture (SDC) et s'appuyer sur un ensemble de mesures, parmi lesquelles la biodiversité fonctionnelle.

1.2. Un nouveau levier à intégrer aux systèmes maraîchers sous abri ?

En production maraîchère sous abris froids, les bioagresseurs (principalement les ravageurs) pénalisent les performances des exploitations, à cause des pertes de récolte engendrées (quantité et qualité) et d'une gestion aux coûts importants (en intrants et en main d'œuvre).

Favoriser la biodiversité fonctionnelle par l'installation d'IAE apparaît comme une solution durable et prometteuse pour réguler les ravageurs sous abris. Ce levier a jusqu'à présent été peu travaillé dans le cadre de rotations complètes, prenant en compte les contraintes de l'intégralité du système de culture.

Une des rotations typiques de la moitié Sud de la France en maraîchage sous abris non chauffés est la séquence solanacée / salade / cucurbitacée / salade. Malgré les variabilités observées sur le terrain (entre les sites, entre les années), l'aubergine et le concombre sont les cultures d'été subissant le plus de traitements (cf. tableau 1).



Tableau 1 : IFT recueillis en 2018, pour une rotation et un itinéraire technique classiques sur 2 ans, sous abri non chauffé, dans la moitié Sud de la France

	Aubergine	Salade	Concombre	Salade	Moyenne sur 1 rotation (2 ans)	Moyenne sur 3 rotations (6 ans)
IFT insecticides	5 à 10	2 à 3	3 à 8	2 à 3	18 (12 à 24)	54
IFT fongicides	0 à 4	2 à 4	1 à 6	2 à 4	11 (5 à 18)	33
IFT herbicides	0 à 2	1	0 à 2	1	4 (2 à 6)	12

Dans ce SDC, la gestion des ravageurs engendre les IFT les plus élevés. Les ravageurs les plus préjudiciables sur les cultures d'été sont les pucerons, les thrips et les acariens tétranyques. Sur les cultures d'hiver, les pucerons sont les principaux ravageurs.

L'objectif du projet est donc de tester des SDC de rupture favorisant l'utilisation de la biodiversité fonctionnelle comme premier levier pour agir sur la régulation des ravageurs visés, tout en diminuant au maximum l'usage des produits phytosanitaires. Les effets de la modification des pratiques et/ou de la mise en place des IAE sur les autres ravageurs non ciblés et sur les maladies sont pris en compte. L'enjeu est de vérifier si les IAE mises en place de façon préventive à l'échelle de l'exploitation contribuent à la régulation des ravageurs, et de travailler sur l'articulation des différents leviers de gestion des ravageurs (prophylaxie, lutte biologique, produits de biocontrôle ou hors biocontrôle...), dans une optique de pilotage global des cultures.

Les objectifs diffèrent entre les sites expérimentaux du projet COSYNUS :

- GRAB (exploitation en AB – Bouches du Rhône) : renforcer la performance de l'exploitation en réduisant les coûts en intrants, et ainsi améliorer l'attractivité de l'AB ;
- CTIFL (station expérimentale - Rhône) : baisser l'IFT insecticides de 100 % ;
- APREL (exploitation en conventionnel – Bouches du Rhône) : baisser l'IFT insecticides de 50%.

2. Méthodologie expérimentale

Le SDC étudié sur les sites d'expérimentation reprend cette rotation solanacée / salade / cucurbitacée / salade et les cultures de concombre et aubergine y sont privilégiées. Cette rotation est mise en place trois fois pendant la durée du projet, avec éventuellement des différences de choix d'espèces, à l'intérieur de la même famille botanique.

2.1. Diagnostic initial à l'échelle de l'exploitation

Un diagnostic agro-environnemental a été réalisé par l'association Arthropologia en tout début de projet sur les 3 sites expérimentaux pour caractériser les différents éléments semi-naturels (ESN) constitutifs des exploitations concernées. Quantité et qualité des éléments préexistants (haies, talus, fossés, bandes enherbées...), présence/absence des connectivités ont permis de mettre en évidence les éléments à préserver et d'élaborer des propositions d'optimisation des ESN préexistants ou de mise en place de nouvelles IAE.

2.2. Phase de co-construction

Les responsables de sites expérimentaux, les animateurs des réseaux DEPHY Ferme (en cultures légumières sous abris froids dans le Sud-Est et en Bourgogne-Franche-Comté), les chercheurs/expérimentateurs d'Arthropologia, du CTIFL et de l'ISARA se sont réunis en début de projet



afin d'élaborer collectivement les stratégies d'aménagement à proposer aux producteurs, au sein d'ateliers de co-construction. En fonction des résultats de projets précédents, des retours d'expérience du terrain (service rendu en rapport avec l'effort fourni), des leviers d'aménagements ont été inventoriés de façon exhaustive et hiérarchisés afin de déterminer lesquels semblaient les plus prometteurs et correspondre aux contraintes envisagées sur les sites expérimentaux (où, quand, comment intégrer ces aménagements dans la rotation type ?). L'objectif était la sélection de leviers communs mis en place sur les trois sites expérimentaux, afin de cerner le caractère généralisable, ou pas, des observations réalisées. Ces propositions d'aménagement, croisées avec les préconisations du diagnostic précédent, ont été soumises à chaque producteur accueillant un site expérimental, ce qui a permis d'adapter les stratégies aux contraintes imposées par chaque SDC.

2.3. Un pool d'aménagements agroécologiques réalisés à l'échelle de l'exploitation

La majorité des leviers testés dans le projet est commune sur tous les sites. Certains leviers n'ont été testés que sur un site pour tenir compte de contraintes particulières (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Leviers de gestion des ravageurs mis en oeuvre sur les différents sites expérimentaux

		GRAB	CTIFL	APREL
Gestion optimisée de l'enherbement	Broyage séquencé des entreserres	x		
Bandes fleuries pérennes semées ou plantées dans les abris	En bordure intérieure des abris ; plantation d'achillée millefeuilles, d'alyse, de souci ou semis de mélange fleuri favorable à la biodiversité (habitat + ressources florales)	x	x	x
Bandes fleuries pérennes semées en dehors des abris	Dans les entreserres ; semis de mélange fleuri favorable à la biodiversité (habitat + ressources florales)	x	x	
Plantes nectarifères dans la culture	Sur le rang central de la culture : alyse plantée ou semée (ressources florales)	x	x	x
Zones réservoirs	Blette, féverole, céréales (habitat + proies-hôtes de substitution)	x	x	x
Plantes-relais	Eleusine, Gomphocarpus portant des pucerons spécifiques et des momies de parasitoïdes	x	x	x
Transfert actif	Transfert d'auxiliaires entre les IAE et la culture	x	x	x
Lâcher d'auxiliaires	Achat d'auxiliaires exogènes	x	x	x
Produit de biocontrôle		x		x
Insecticide non biocontrôle				x

2.4. Suivis et pilotages réalisés sur les sites expérimentaux

2.4.1. Suivis dans les IAE et la culture

Le protocole expérimental est le même sur chacun des trois sites. Des suivis mensuels ont été réalisés dans les IAE. Après une observation visuelle de 5 minutes pour dénombrer les adultes de syrphes, une aspiration de 5 secondes avec un aspirateur (type Makita DUB363) a été réalisée sur un plant de chaque espèce plantée de l'IAE. Pour les bandes de céréales, les semis de mélange fleuri, la flore spontanée, l'aspiration de 5 secondes a été réalisée sur 1 m linéaire (soit 0,2m²). Chaque IAE a été échantillonnée deux fois par date. Les échantillons prélevés ont été ramenés au laboratoire et triés. Les



insectes ont été identifiés jusqu'à un niveau taxonomique permettant de déterminer leur régime alimentaire.

Des suivis hebdomadaires ont été réalisés dans les cultures d'été : les ravageurs et les auxiliaires ont été dénombrés sur 30 plantes repérées par abri, et sur 5 feuilles d'âge différent par plante.

L'analyse de la dynamique des ravageurs et des auxiliaires, dans la culture et dans les IAE, a permis de poser des hypothèses fortes sur la contribution des IAE à la régulation naturelle des ravageurs observés.

2.4.2. Pilotage - articulation des différents leviers de gestion des ravageurs

Les suivis réalisés ont permis de dresser un bilan fiable et actualisé de la situation phytosanitaire de la culture. Ce bilan a servi de base chaque semaine à la co-construction avec le producteur de la stratégie de protection à mettre en œuvre. Pour cela, l'expérimentateur s'est appuyé, notamment pour la gestion des pucerons, sur un cortège de Règles de Décision (RDD) élaboré collectivement avec tous les partenaires en début de projet et mis à jour chaque année, en fonction des retours d'expériences (échec ou succès de chaque RDD) de l'année écoulée. Ces RDD ont reposé sur les paramètres calculés lors des suivis réalisés (âge de la culture, fréquence d'attaque du ravageur, niveau de population du ravageur, ratio ravageur / auxiliaire...). Le dépassement de seuils définis collectivement a déclenché des opérations de transfert actif d'auxiliaires, de lâchers, d'arrachages de plants ou d'organes trop attaqués, et en dernier recours des traitements, d'abord localisés puis généralisés en cas d'attaque grave.

2.4.3. Caractérisation de l'efficacité du système et de ses composantes

Evaluation de l'efficacité globale du système de culture sur les attaques de ravageurs

Afin d'objectiver le ressenti de l'expérimentateur, une méthode d'analyse a été élaborée pour caractériser chaque année sur chaque site expérimental le niveau de gestion du ravageur étudié. Elle s'est basée sur les fréquences et intensités d'attaque du ravageur étudié, sur les effectifs relatifs de ce ravageur et de ses auxiliaires au moment des pics de population, sur la durée nécessaire à la réduction des effectifs du ravageur étudié.

Contribution individuelle des leviers mis en œuvre

Chaque année, l'expérimentateur a attribué une note de 0 à 2 pour chaque levier mis en œuvre dans le système de culture (0 : aucune contribution, levier inefficace ; 2 : contribution importante à la régulation des ravageurs). Pour les IAE, cette note s'est appuyée sur leur capacité à héberger les auxiliaires attendus, en effectifs suffisants, au moment opportun, et que ces auxiliaires aient participé substantiellement au contrôle des ravageurs dans la culture. Ces données ont permis d'évaluer l'intérêt de chaque levier individuellement et de caractériser la variabilité inter-annuelle.

2.4.4. Données économiques et définition du système de référence

Chaque année, les données technico-économiques de la culture (rendement, ventes, itinéraire cultural, IFT, temps de travaux, achat d'intrants) sont collectées auprès du producteur afin de pouvoir calculer les charges (notamment liées à la protection des cultures), ainsi que la marge nette de la culture.

Ces données sont ensuite comparées à un système de culture témoin appelé Système De Référence (SDR). Issu de dires d'expert (ingénieurs des réseaux DEPHY Ferme, conseillers, bilan BSV...), il correspond à un système de culture équivalent en tout point au système de culture COSYNUS (même culture, même itinéraire, même bassin de production), mais sans aucune mise en place d'IAE. Chaque année, pour chaque culture, ce SDR est actualisé : la pression en ravageurs, et les moyens de gestion des bioagresseurs sont ajustés en fonction des pratiques observées dans le bassin de production.

3.2. Contribution individuelle des leviers mis en œuvre

La majorité des leviers contribue à la bonne régulation des ravageurs.

Certains leviers comme la bande fleurie intérieure, les zones réservoirs et les transferts actifs ont eu des contributions très satisfaisantes, d'environ 1,5 sur les trois sites expérimentaux (cf. figure 1).

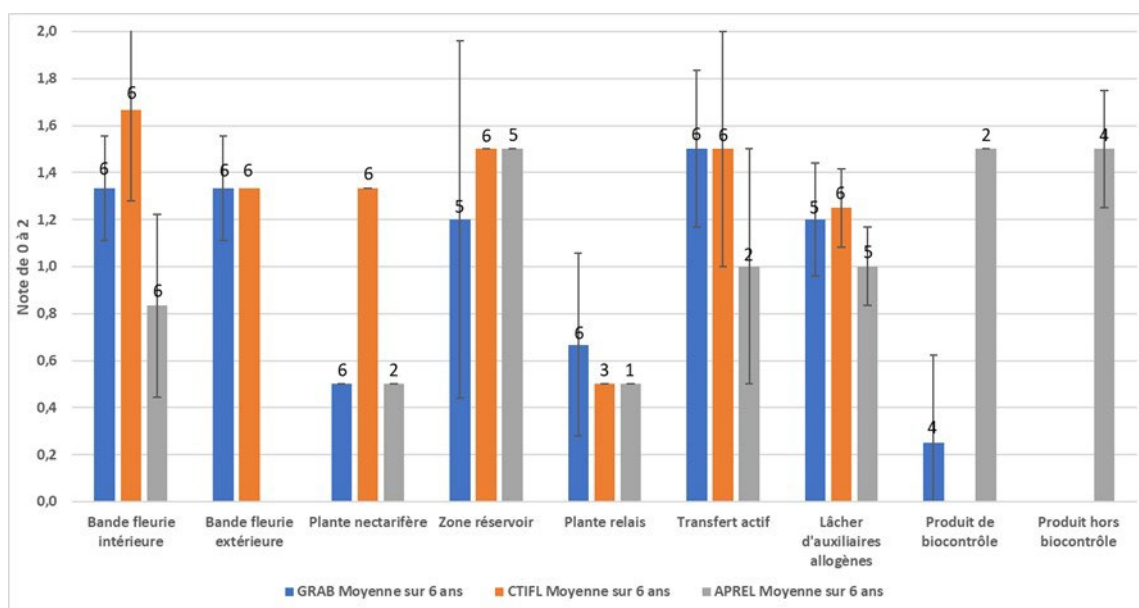


Figure 1 : Contribution moyenne des leviers mis en œuvre (avec écart-types moyens), par site. Le chiffre au-dessus de l'histogramme correspond au nombre d'années de mise en œuvre du levier sur le site

Les écart-type moyens sont de l'ordre de 0,2 à 0,3, ce qui représente une variabilité faible. Certains écart-types moyens sont cependant plus élevés (supérieurs à 0,5), ce qui dénote une plus grande variabilité inter-annuelle (zone réservoir au GRAB, transfert actif au CTIFL et à l'APREL). Par exemple, sur le site expérimental du GRAB, la zone réservoir de céréales a hébergé courant mars une grande quantité de prédateurs et de parasitoïdes de pucerons en 2020, 2021, et 2023 (notes de 2, 2, 1,5 respectivement). En 2022 et 2024, aucun puceron n'était présent en sortie d'hiver sur les céréales, de sorte qu'aucune population d'auxiliaires n'a pu s'y établir (notes de 0,5, 0 respectivement).

Certains leviers comme la bande fleurie extérieure, les lâchers d'auxiliaires ont eu des contributions moyennes correctes comprises entre 1 et 1,5. Pour ces deux leviers, il peut s'avérer difficile d'évaluer l'effet direct sur la culture.

Certains leviers comme les plantes nectarifères (alysse plantées dans les cultures), les plantes-relais ont donné des résultats insuffisants. Les quelques alysse plantées sur le rang central de la culture ont été peu attractives pour les syrphes quand les bandes fleuries étaient denses en bordure de parcelle (GRAB et APREL). Ce levier est cependant intéressant en saison d'hiver quand les autres aménagements sont moins fournis ou lorsqu'il n'y a pas d'autre aménagement dans l'abri ou pas de floraison aussi favorable aux syrphes dans les aménagements (CTIFL). Les plantes-relais fournies gracieusement par un pépiniériste ne portaient malheureusement que peu de pucerons spécifiques et peu de momies de parasitoïdes. Leur intérêt en tant que source précoce de parasitoïdes était donc faible. Cette donnée souligne la difficulté technique pour un pépiniériste de produire des plantes-relais suffisamment pourvues en momies de parasitoïdes en tout début de culture (mars-avril).

Les produits appliqués en curatif pour gérer les ravageurs ont donné des résultats contrastés. Sur le site expérimental du GRAB, les produits de biocontrôle ont été appliqués en dernier recours, sur des



populations de ravageurs certainement trop établies pour être correctement contrôlées. Sur le site de l'APREL, les produits (biocontrôle et hors biocontrôle) ont été appliqués plus tôt, ce qui a favorisé leur efficacité.

3.3. Calcul de l'IFT gestion des ravageurs

Site expérimental du GRAB :

Le site expérimental du GRAB étant situé sur une exploitation en AB, aucun produit phytosanitaire hors biocontrôle n'a été utilisé. Les principales applications ont concerné les limaces et escargots contre lesquels de l'orthophosphate de fer a été épandu en préventif sur la périphérie des parcelles (cf. figure 2). Les principales cibles des traitements curatifs ont été les acariens.

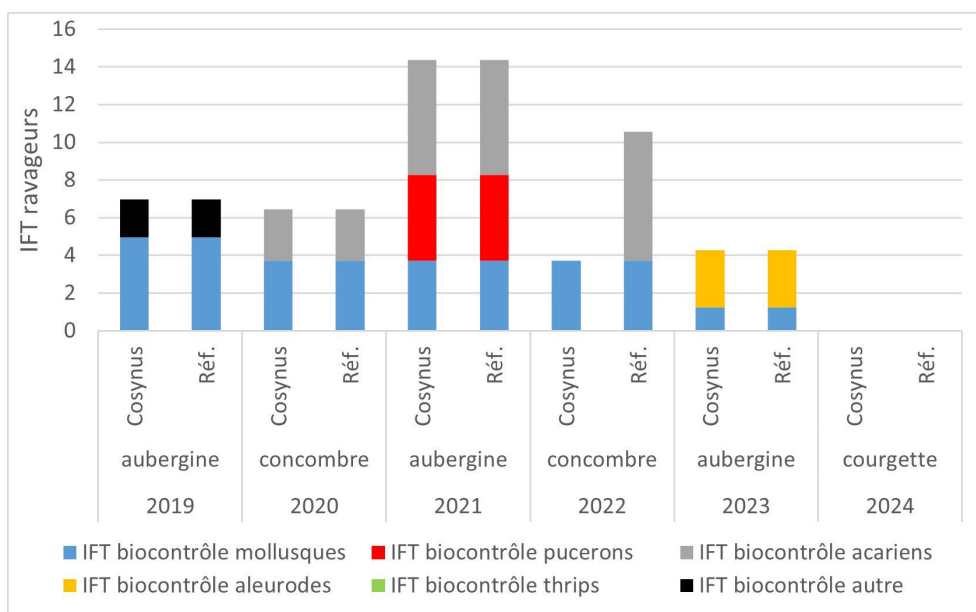


Figure 2 : IFT gestion des ravageurs pour les deux systèmes de culture, sur le site du GRAB

Les traitements contre pucerons, acariens, aleurodes ont été réalisés en dernier recours, sur des populations bien installées de ravageurs. Dans ces conditions, les efficacités observées ont été clairement insuffisantes. Les traitements réalisés ont été équivalents dans le système COSYNUS et dans le système de référence, à part en 2022, où l'attaque d'acariens a été généralisée dans la région, alors que les acariens ont été bien régulés dans le système COSYNUS.

Site expérimental de l'APREL :

L'exploitation suivie par l'APREL était en agriculture conventionnelle. Des traitements de biocontrôle ont été utilisés prioritairement et des produits de synthèse ont été appliqués en dernier recours. Dans le système COSYNUS, les traitements de biocontrôle ont surtout été utilisés contre les maladies. Contre les ravageurs, une application d'orthophosphate de fer contre les limaces et les escargots était systématique et les autres ravageurs ont avant tout été gérés par les lâchers d'auxiliaires (cf. figure 3).

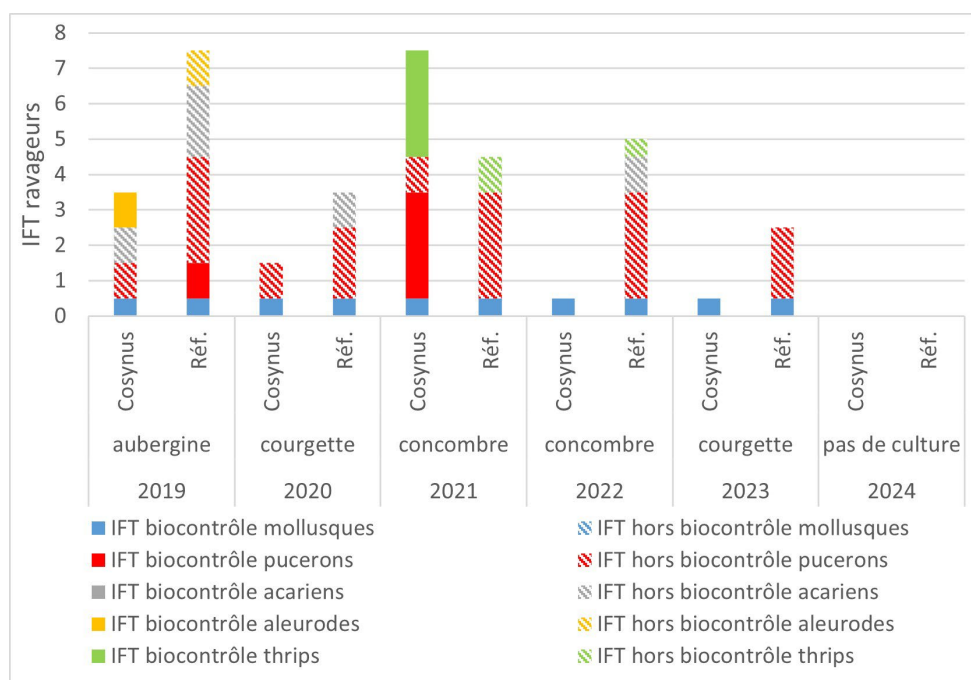


Figure 3 : IFT gestion des ravageurs pour les deux systèmes de culture, sur le site de l'APREL

Si cette stratégie s'avérait insuffisante, des produits de synthèse étaient appliqués en choisissant des spécialités compatibles avec la présence d'auxiliaires. Mis à part en 2021 où la pression thrips et pucerons avait engendré la répétition de plusieurs traitements de biocontrôle, le système COSYNUS a permis de réduire l'IFT total de 42 % et l'IFT hors biocontrôle de 80 %. En 2022 et 2023, aucun traitement de synthèse n'a été appliqué contre les ravageurs.

3.4. Etude technico-économique

3.4.1. Intérêt économique des transferts actifs (TA) par rapport aux lâchers d'auxiliaires (exemple sur le site du CTIFL) :

Le transfert actif d'auxiliaires indigènes a consisté à prélever des auxiliaires présents dans les IAE, puis à les lâcher dans la culture. Les *Macrolophus* ont été prélevés par frappe sur les soucis ; les larves et adultes de coccinelles ont été prélevés à la main dans la zone réservoir.

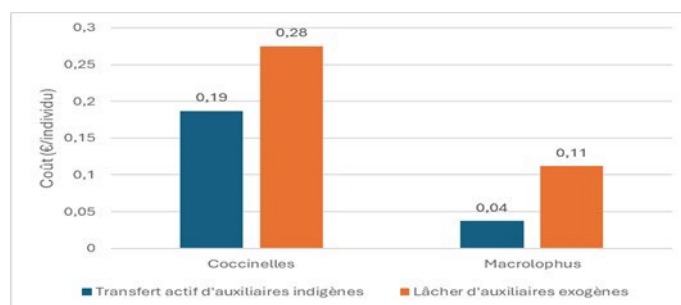


Figure 4 : Comparaison du prix moyen d'un auxiliaire selon les deux méthodes d'apport (site du CTIFL)

Dans la figure 4, les prix moyens ont été calculés en prenant en compte le prix des auxiliaires vendus, le nombre d'individus (transférés ou lâchés) ainsi que le temps de main d'œuvre (entretien des IAE et temps de capture et de lâcher). Par exemple, pour les transferts actifs de coccinelles, il a fallu en moyenne 25 minutes pour capturer 45 individus. Ce temps a pu fortement varier en fonction de la



biodiversité présente dans les IAE et les parcelles. Ces moyennes ont été calculées sur un total de 22 transferts actifs (7 TA de coccinelles et 15 TA de Macrolophus).

La technique du transfert actif a été moins coûteuse pour les deux types d'auxiliaires : -32% pour les coccinelles et -64% pour les Macrolophus. Cette méthode a montré d'autres avantages : elle a permis d'être plus réactif car il n'y a pas eu de délai de livraison ; les infestations ont donc été mieux anticipées. Néanmoins, elle a nécessité une bonne reconnaissance des auxiliaires et a imposé d'observer régulièrement les IAE et les cultures. Elle a demandé aussi aux agriculteurs d'anticiper l'installation des IAE pour obtenir des auxiliaires précocement dans la culture.

3.4.2. Charges liées à la protection des cultures

L'analyse des coûts liés à la protection des cultures (intrants et main d'œuvre pour limiter maladies et ravageurs) montre que le système COSYNUS a permis globalement de limiter les charges (cf. figure 5).

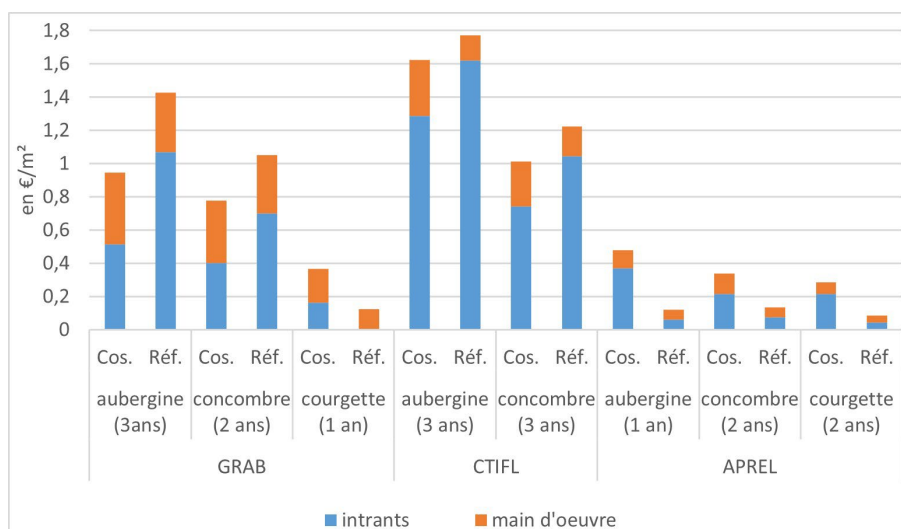


Figure 5 : Charges moyennes liées à la protection des cultures pour les deux systèmes de culture, par espèce cultivée

Site expérimental du GRAB :

Sur les 6 ans de suivi (6 cultures d'été + 5 cultures d'hiver), la mise en œuvre des aménagements a mobilisé de la main d'œuvre supplémentaire (plantation, surveillance, transfert actif) de l'ordre de 26 % (cf. figure 5). Elle a permis cependant une économie forte au niveau des intrants, de l'ordre de 50 %, essentiellement grâce à la réduction des achats d'auxiliaires lâchés. Au total, les charges de gestion des bioagresseurs ont été réduites de 27 %.

Pour les 6 ans de suivi et la globalité des charges de culture, les coûts de main d'œuvre ont été augmentés de 1,5 % et les intrants diminués de 6,5 % dans le système COSYNUS. Sur 6 ans, la marge nette a été supérieure de 15 % dans le système COSYNUS, en comparaison au système de référence, grâce à la réduction des achats d'intrants (principalement lâchers d'auxiliaires achetés), et au maintien du rendement.

Site expérimental du CTIFL :

Sur le site expérimental du CTIFL, où l'objectif était de réduire les IFT de 100 % (atteindre un IFT 0), les coûts liés à la protection des cultures ont été plus élevés que sur les autres sites (cf. figure 5). Cela s'explique par le fait que, hormis les infrastructures agroécologiques (IAE), le seul levier externe utilisable était l'introduction d'auxiliaires exogènes, une méthode plus coûteuse que l'utilisation de produits phytosanitaires. De plus, les charges pour la culture de l'aubergine ont été plus élevées que celles du concombre, en raison de la durée de culture plus courte de cette dernière. Pour la protection



des cultures, le système COSYNUS a affiché des coûts d'approvisionnement (intrants) plus bas sur l'ensemble des années d'expérimentation, avec une réduction moyenne de 29,5 % sur les six ans du projet. En revanche, les coûts de main-d'œuvre y ont été plus élevés, avec une augmentation moyenne de 38,6 % sur la même période. Le coût total de protection des cultures a été plus élevé de 0,19 €/m² dans le système de référence par rapport au système COSYNUS.

Pour les 6 ans de suivi et la globalité des charges de culture, les coûts de main d'œuvre ont été augmentés de 2,8 % et les intrants diminués de 6,3 % dans le système COSYNUS. Sur 6 ans, la marge nette a été supérieure de 4,1 % dans le système COSYNUS, en comparaison au système de référence.

Site expérimental de l'APREL :

Les charges relatives à la protection contre les bioagresseurs ont été relativement limitées (cf. figure 5). Le SDR n'a utilisé que des traitements de synthèse dont le coût est faible. Le système COSYNUS a fait appel à divers leviers dont la mise en œuvre engendre un temps de travail plus important : entretien de la bande fleurie et des autres IAE, introduction d'auxiliaires, répétition des applications de produits de biocontrôle. L'achat d'auxiliaires a engendré également un surcoût dans la stratégie. Toutefois la stratégie COSYNUS est restée tout à fait réalisable puisque le coût de la protection contre les bioagresseurs a été de 0,24 € à 0,50 € selon la culture et l'année. En prenant en compte toutes les dépenses pour l'entretien de la culture et les récoltes le surcoût de la stratégie COSYNUS ne dépasse pas 4% par rapport à la référence.

Pour les 6 ans de suivi et la globalité des charges de culture, les coûts de main d'œuvre ont été augmentés de 2,3 % et les intrants augmentés de 6 % dans le système COSYNUS. Sur 6 ans, la marge nette a été inférieure de 5 % dans le système COSYNUS, en comparaison au système de référence.

4. Conclusions et perspectives

Pour ce projet, l'approche système s'est avérée adaptée : une combinaison de leviers a été testée, sur une rotation maraîchère complète réaliste, en tenant compte des contraintes des producteurs. La méthodologie expérimentale mise en place a montré que des systèmes maraîchers s'appuyant sur la biodiversité fonctionnelle comme premier levier de gestion des ravageurs pouvaient s'avérer performants. Les objectifs fixés ont été atteints : amélioration de la marge en AB (baisse des coûts des lâchers d'auxiliaires), réduction de l'IFT ravageurs en conventionnel sans augmentation des attaques de ravageurs, ni baisse du rendement. Les suivis réalisés ont en outre permis de caractériser la contribution de chaque aménagement : les bandes fleuries dans et hors des abris, les transferts actifs à partir de zones réservoirs sont ainsi les stratégies les plus intéressantes. Le suivi sur 6 ans a aussi mis en évidence les variabilités inter-annuelles, comme pour les bandes de céréales, qui n'hébergent pas systématiquement chaque année pucerons spécifiques et parasitoïdes intéressants.

Les aménagements réalisés ont permis de (re)créer un agroécosystème plus résilient, grâce à la présence durable d'une diversité importante d'auxiliaires. L'autonomie et la réactivité des producteurs ont été renforcées, car ils ont pu réduire leurs achats d'intrants (auxiliaires ou produits phytosanitaires) et les auxiliaires auto-produits dans les zones-réservoirs ont pu être transférés sans délai (contrairement à la lutte biologique classique), ce qui s'est avéré déterminant pour freiner immédiatement l'augmentation rapide des populations de ravageurs.

Au-delà des bénéfices clairs en termes technico-économiques (marge accrue, autonomie accrue, IFT réduit...), il faut garder à l'esprit que cette approche nécessite un investissement humain non négligeable. Les économies d'intrants impliquent une augmentation du temps de travail, et une montée en compétence pour optimiser les services de régulation naturelle des ravageurs. Dans l'absolu, cet investissement humain pour la reconception du système, la meilleure reconnaissance des auxiliaires, l'observation renforcée des cultures et des IAE reste raisonnable. Chef d'exploitation, chef de culture, ouvriers peuvent d'ailleurs tous en bénéficier. Cependant, la charge mentale des maraîchers est déjà



importante, et la nécessité d'anticiper (notamment pour les commandes de graines et/ou de plants, la mise en place des IAE) se heurte parfois à la gestion des multiples urgences sur la ferme. Il est clair que cette stratégie basée sur les IAE ne peut être optimale que si la mise en place et la gestion des IAE sont pleinement intégrées à l'itinéraire cultural.

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 pour la rédaction.

ORCIDs des auteurs

Jérôme LAMBION : <https://orcid.org/0000-0002-9605-856X>

Contributions des auteurs

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

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Remerciements aux producteurs ayant accueilli les essais pendant 6 ans, aux stagiaires ayant contribué à l'acquisition des données, et à l'exploitation des résultats.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été financé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB).

Références bibliographiques

- Altieri M., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 74, 19-31.
- Balmer O., Généau C.E., Belz E., Weishaupt B., Förderer G., Moos S., Luka H., 2014. Wildflower companion plants increase pest parasitism and yield in cabbage fields: Experimental demonstration and call for caution. *Biological control*, 76, 19-27.
- Gillespie M.A., Gurr G.M., Wratten S.D., 2016. Beyond nectar provision: the other resource requirements of parasitoid biological control agents. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 159(2), 207-221.
- Lambion J., 2013. Flower strips as winter shelters for predatory miridae bugs. *II International Symposium on Organic Greenhouse Horticulture 1041*. 149-156.
- Lambion J., Franoux L., 2016. Agroecological infrastructures to enhance the presence of natural enemies against aphids. *III International Symposium on Organic Greenhouse Horticulture 1164*. 419-424.



- Landis D., Wrattens S., Gurr G., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual review of entomology*, 45, 175–201.
- Luka H., Barloggio G., 2016. Biodiversity enhancement and utilization–Pest control in brassicas. *Acta Fytotechnica et Zootechnica*, 18(5), 53-55.
- Messelink G.J., Bennison J., Alomar O., Ingegno B.L., Tavella L., Shipp L., Wäckers F.L., 2014. Approaches to conserving natural enemy populations in greenhouse crops: current methods and future prospects. *BioControl*, 59(4), 377-393.
- Messelink G.J., Lambion J., Janssen A., van Rijn P.C., 2021. Biodiversity in and around greenhouses: Benefits and potential risks for pest management. *Insects*, 12(10), 933.
- Pfister S.C., Schirmel J., Entling M.H., 2017. Aphids and their enemies in pumpkin respond differently to management, local and landscape features. *Biological Control*, 115, 37-45.
- Picault S., Lambion J., Bouvard D., Deboevre S., Lavigne D., Pernazza A.S., 2017. La colonisation de pucerons en cultures de melon - L'emploi des bandes fleuries comme outil de régulation. *Infos CTIFL*, 331, 35-43.
- Picault S., Quennesson S., Roy G., Davy M., Torres M., Ginez A., Schoeny A., Lambion J., Lavigne D., Bouvard D., 2018. AGATH: Utilisation de plantes de service et de kaolin pour gérer les populations de pucerons et de thrips en cultures légumières. *Innovations Agronomiques* 63 (2018), 385-397
- Piñero J.C., Manandhar R., 2015. Effects of increased crop diversity using trap crops, flowering plants, and living mulches on vegetable insect pests. *Trends Entomol.*, 11, 91-109.
- Rusch A., Chaplin-Kramer R., Gardiner M.M., Hawro V., Holland J., Landis D., Woltz M., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: a quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198-204.
- Schoeny A., Boissot N., Lambion J., Wipf-Scheibel C., Mistral P., Gognalons P., Lecoq H., 2014. Conception d'associations en maraîchage de plein champ: exemple de production de melons associés à des bandes fleuries pour lutter contre les pucerons et les virus. *Innovations Agronomiques*, 40, 113-4.
- Tscharntke T., Klein A., Kruess A., Steffan-Dewenter I., Thies C., 2005., Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management. *Ecology Letters*. 8, 857-874.
- Tscharntke T., Karp D.S., Chaplin-Kramer R., Batáry P., DeClerck F., Gratton C., Martin E.A., 2016. When natural habitat fails to enhance biological pest control–Five hypotheses. *Biological Conservation*, 204, 449-458.
- Tschumi M., Albrecht M., Collatz J., Dubsky V., Entling M.H., Najar-Rodriguez A.J., Jacot K., 2016. Tailored flower strips promote natural enemy biodiversity and pest control in potato crops. *Journal of applied ecology*, 53(4), 1169-1176.
- Turquet M., Amiraux C., Geny A., Ginez A., Naulleau C., 2024. FRAGASYST : 5 années de combinaison de leviers innovants pour gérer les bioagresseurs sur fraisier de printemps. *Innovations Agronomiques*, 98, 335-348.
- Warlop F., Lambion J., Wartelle R., Gibert C., Gardarin A., Giffard B., Cornillon M., Senegas I., Mary S., Magro A., Chifflet R., Leveque F., 2018. Muscari : synthèse du projet. Muscari : synthèse du projet. HYPERLINK "https://wiki.itab-lab.fr" <https://wiki.itab-lab.fr/muscari/>. 24p.

Pour citer cet article : Jérôme Lambion, Pierre Lasne, Anthony Ginez. Contribution des aménagements agroécologiques à la régulation des ravageurs en cultures maraîchères sous abri : Projet DEPHY COSYNUS 2019-2024. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.113-125. [10.17180/ciag-2026-vol109-art09](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Diversité des Champignons Mycorhiziens à Arbuscules (CMA) dans les sols de Martinique dans un contexte de modèle du jardin créole antillais

Metty TREBEAU¹, Dominique BARRY-ETIENNE², Myriam DUCHEMIN², Azimê YOL² et Patricia LACLAU²

¹ FREDON Martinique, Route du Lycée agricole, Croix Rivail, Chemin Tolobe, 97224 Ducos

² SAS Mycea, 162 rue du caducée, CS 75095, 34 197 Montpellier Cedex 5

Correspondance : dominique.barry@mycea.fr ; m.trebeau@fred972.org

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art10>

Résumé

Dans le cadre du réseau DEPHY, le projet CABioSol mené par FREDON Martinique visait à concevoir des agroécosystèmes valorisant la biodiversité fonctionnelle des sols. Les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) ont été choisis comme auxiliaires biologiques clés. Pendant trois ans, une étude de leur diversité a été menée sur deux sites au sol et climat très contrastés conduits avec un système de Culture (SdC) de type Jardin Créole Antillais. Les résultats montrent une augmentation rapide du nombre de spores et de la diversité mycorhizienne dès la première année avec le SdC. À Sainte-Anne où le sol est travaillé régulièrement, les CMA du genre *Glomus* dominant, tandis qu'à Les Oliviers où le sol est moins impacté, la diversité est plus élevée avec les genres *Paraglomus* et *Diversisporales* qui sont des indicateurs de sols stables. De plus, les résultats montrent que la structuration des communautés est influencée à 29 % par le contexte pédoclimatique, le reste étant probablement lié au système de culture et aux végétaux cultivés. Ces travaux montrent l'intérêt des pratiques agroécologiques comme le SDC Jardin Créole Antillais pour valoriser la biodiversité locale des sols.

Mots-clés : Agroécologie ; Champignons endomycorhiziens ; Diversité ; Jardin créole antillais ; Métabarcoding

Abstract: Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) in Martinique soils in the context of a Caribbean Creole garden model

As part of the DEPHY network, the CABioSol project led by FREDON Martinique aimed to design agroecosystems that make the most of functional soil biodiversity. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) were chosen as key biological auxiliaries. Over a three-year period, a study of their diversity was carried out on two sites with very contrasting soils and climates, using a Jardin Créole Antillais-type cropping system (SdC). The results show a rapid increase in spore numbers and mycorrhizal diversity from the first year with the SdC. At Sainte-Anne, where the soil is worked regularly, *Glomus* CMAs dominate, while at Les Oliviers, where the soil is less impacted, diversity is higher with *Paraglomus* and *Diversisporales* genera, which are indicators of stable soils. In addition, the results show that 29% of community structuring is influenced by the pedoclimatic context, with the remainder probably linked to the cropping system and the plants grown. This work demonstrates the value of agroecological practices such as the SDC Jardin Créole Antillais for enhancing local soil biodiversity.

Keywords: Agroecology; Endomycorrhizal fungi; Diversity; Caribbean Creole Garden; Metabarcoding

1. Contexte de l'étude

Les mutations du secteur agricole imposent le développement de systèmes de cultures alternatifs conciliant rentabilité et respect de l'environnement. En Martinique, les défis sont accrus par le climat tropical humide et les aléas climatiques extrêmes qui favorisent bioagresseurs et dégradation rapide



des sols. L'agriculture, bien qu'en déclin face au tourisme et aux services, reste essentielle pour l'identité, l'économie locale et la souveraineté alimentaire. Les productions fruitières, vivrières et maraîchères ne couvrent que 44 % de la SAU et reposent à 87 % sur des micro et petites exploitations familiales (Agreste, 2020). Elles fonctionnent souvent sans approche agronomique durable et dépendent de traitements phytosanitaires curatifs (Angeon et al., 2014). Il devient ainsi stratégique de concevoir des agroécosystèmes valorisant les ressources naturelles locales et notamment les microorganismes du sol. Depuis 2012, FREDON Martinique, via ECOPHYTO puis le projet CABioSol, développe des alternatives basées sur la macrofaune fonctionnelle et les champignons endomycorhiziens indigènes, s'appuyant sur les travaux de l'unité ASTRO de l'INRAE et de Marie Chave (Projets : REACTION, MYCOBIOTECH, SYSTEMYC, MYMYX, 2014-2019).

1.1. Intérêt biologique des symbioses mycorhiziennes

Plus de 90 % des espèces végétales forment des associations symbiotiques avec des champignons mycorhiziens. Parmi eux, les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) sont présents chez 80 % des plantes terrestres incluant la majorité des cultures légumières et fruitières (Smith & Read, 2008). Le champignon obtient des ressources carbonées issues de la photosynthèse du végétal, tandis que ses hyphes explorent largement le sol environnant lui permettant de capter efficacement eau et éléments minéraux qu'il transfère à la plante. Les CMA sont aussi connus pour améliorer la résistance des plantes aux pathogènes racinaires (Azcón-Aguilar et al., 1997) et aux stress hydriques via des modulations physiologiques et biochimiques de la plante (Oehl et al., 2010). De plus, ces champignons excrètent de la glomaline, une glycoprotéine impliquée dans la structuration du sol limitant ainsi les effets de compaction et d'érosion qui sont des enjeux majeurs pour les sols tropicaux soumis à de fortes pluies.

1.2. Intérêt de l'étude de la diversité des communautés de CMA indigènes

Connaitre les communautés de CMA au sein des agroécosystèmes est fondamentale afin de préserver cette biodiversité et de pouvoir optimiser leurs services écosystémiques pour les plantes cultivées. D'autant plus, que les CMA indigènes naturellement présents dans les sols sont connus pour être adaptés aux spécificités locales (Laclau et al., 2025), ils représentent une ressource renouvelable, précieuse et mobilisable pour les cultures. A ce jour, les biostimulants commerciaux, enrichis en CMA exogènes, peuvent provoquer des risques écologiques en perturbant l'équilibre et la dynamique symbiotique locale (Janoušková et al., 2013). En effet, des interactions complexes voire concurrentielles entre CMA exogènes et indigènes peuvent avoir lieu (Mummey et al., 2009) et avoir un impact sur l'équilibre écosystémique des sols ainsi que sur la productivité agricole. Ceci est particulièrement vrai pour les territoires insulaires où les communautés microbiennes se sont adaptées à des conditions pédoclimatiques et végétales spécifiques. L'introduction d'inoculum exogène ou de plantes exotiques pourrait alors déséquilibrer ces systèmes fragiles (Ramana, 2022).

1.3. CaBioSol : une agroécologie martiniquaise grâce à la symbiose mycorhizienne

L'agroécologie s'appuie sur les processus naturels pour concevoir des systèmes agricoles durables. Dans le projet CABioSol, un système de culture (SdC) inspiré du **jardin créole Antillais** a été mis en place, combinant rotations de cultures maraîchères, vivrières et fruitières à des bandes relais composées de Fabaceae, Poaceae et Asteraceae. Ces plantes entretiennent les réseaux mycorhiziens et servent de réservoirs en propagules fongiques qui facilitent la mise en place de nouvelles symbioses mycorhiziennes lors des cultures suivantes. De plus, ces bandes relais fournissent d'autres services écosystémiques comme la régulation biologique par insectes auxiliaires.

L'objectif du projet Cabiosol est d'étudier l'impact du SdC 'jardin créole Antillais' sur la composition et l'évolution de la communauté en CMA indigène dans des sols martiniquais sur plusieurs années de



culture. Sur 2 sites aux pédoclimats contrastés et avec des SdC agroécologiques, l'évolution quantitative et qualitative des communautés de CMA a été suivie sur 3 ans. Il en ressort des informations concernant l'impact du SdC sur la diversité en CMA dans les sols, l'impact de la géolocalisation sur la structuration de la communauté de CMA et de la connaissance sur les espèces de CMA spontanément présentes dans les sols agricoles de Martinique.

2. Méthodologie

2.1. Les sites d'études

Deux sites aux pédoclimats contrastés ont été sélectionnés, l'un au nord de l'île et l'autre au sud (Figure 2). Pour chaque site, un bilan annuel de la diversité en CMA a été fait sur 3 sections du SdC sur 3 ans discontinus pour cause de Covid. L'essai a été mis en place en 2019 et a été suivi en 2021, 2022 et 2023. Chaque section, quadrillée de bandes relais diversifiées pérennes, a vu se succéder des rotations de cultures selon le planning de plantation établi.

Lorrain-EARL Les Oliviers : sols à allophanes peu évolués, sur tufs avec gibbsite et cendres par endroits. Pluviométrie moyenne de 2200mm/an, températures entre 21°C à 30 °C. Peuplement d'adventices en place lors de l'état des lieux : *Colocasia sp.*, *Amatanthus sp.*, *Euphorbia hiva*, *Spermacoce latifolia*, *Phenax sonneratii*, *Comelina diffusa* et *Bracharia sp.* Pas de précédent cultural les deux années précédentes.



Sainte Anne-SEA : vertisols. Pluviométrie inférieure à 1500 mm/an, températures de 26°C à 33 °C. Peuplement d'adventices en place lors de l'état des lieux : *Cleome viscosa*, *Euphorbia heterophylla*, *Bacharia sp.*, *Chloris inflata* et *Panicum maximum*. Précédents culturaux : tomate, concombre et manioc.

Figure 1 : Localisation des sites étudiés sur l'île de la Martinique

2.2. La gestion culturale des observatoires

Ces deux observatoires pilotés sont conçus sur le modèle du jardin créole Antillais avec des bandes relais diversifiées et des rotations de cultures maraichères (telles que les Aubergines, Choux, Concombre/Courges, Gombo, Groseille pays, Haricot vert, Laitue Piment/Poivron), vivrières (Patate douce et Manioc) et fruitières (Goyave, Maracuja et Mangue).

Tableau 1 : Plan de rotation des observatoires pilotés.

Sites	Section s	2020	2021	2022	2023
Les Oliviers	A1	Piment / Cive	Haricot / Gombo	Haricot / Betterave	Barbadine
	A2	Gombo / Haricot	Piment / Cive	Baselle	Baselle
	B1	Piment / Cive	Concombre / Haricot / Chou	Gombo / Chou	Piment / Cives
	B2	Gombo / Chou	Piment	Gombo / Concombre	Gombo / Chou
	C1	Bannane	Poivron / Concombre	Cive / Groseille Pays	Cive / Giraumon
	C2	Bannane	Concombre / Poivron	Cive / Groseille Pays	Concombre / Poivron
	D1	Haricot / Aubergine	Haricot / Concombre / Aubergine	Chou / Tomate	Chou / Tomate
	D2	Jachère	Groseille Pays	Piment / Cive	Dachine
	E1	Cive	Fruit de la passion	Fruit de la passion	Fruit de la passion



Saint - Anne	E2	Cive	Goyave	Goyave	Goyave
	F	Haricot / Groseille Pays	Gombo	Patate Douce / Haricot	Aubergine / Groseille Pays
	G	Haricot / Groseille Pays	Patate Douce	Haricot / Patate Douce	Haricot / Groseille Pays
	A1	Plantes aromatiques	Plantes aromatiques	Plantes aromatiques	Jachère
	A2	Laitue / Haricot/ Chou	Tomate/ Haricot / Cive	Aubergine / Laitue	Jachère
	B1	Bannane	Bannane	Bannane	Bannane
	B2	Bosquet plantes relais	Bosquet plantes relais	Bosquet plantes relais	Bosquet plantes relais
	C1	Courgette	Tomate / Concombre / Cive	Patate douce / Courgette	Jachère
	C2	Piment / Cive	Laitue / Haricot / Cive	Manioc	Jachère
	D1	Cive /Laitue	Piment / Cive	Haricot / Tomate / Cive	Jachère
	D2	Giraumon	Patate Douce /Pastèque	Piment / Cive	Jachère
	E1	Mangue	Mangue	Mangue	Mangue
	E2	Goyave	Goyave	Goyave	Goyave
	F	Bosquet plantes relais	Bosquet plantes relais	Bosquet plantes relais	Bosquet plantes relais

Chacune des sections qui composent les SdC dont les rotations d'assolement sont décrites dans le tableau 1 est bordée de bandes relais composées de Fabaceae (*Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan* ou *Canavalia ensiformis*), de Poaceae (*Sorghum bicolor*) et d'Asteraceae (*Tagetes patula*, *Zinnia elegans*).

2.3. Suivis de la diversité en CMA dans les sols

2.3.1. Etude des communautés de CMA

Chaque communauté de CMA est caractérisée quantitativement par le nombre de spores viables présentes dans un sol et par le taux de mycorhization des racines, et qualitativement par la diversité moléculaire dans le sol et les racines (analyses par métabarcoding).

En 2019, un état des lieux a été fait sur la communauté de CMA de chacun des sites étudiés en déterminant le nombre de spores présentes dans le sol et les espèces présentes. Les trois années suivantes, des prélèvements de sol et de racines des plantes cultivées ont été réalisés.

Pour chacune des 3 sections de chaque site, du sol a été prélevé (3 prélèvements équivalents mélangés) afin de maximiser la diversité. Des racines fines (< 1 mm) ont été récoltées sur les cultures en place (3 prélèvements). A partir de chaque échantillon de sol et de racines, 3 sous-échantillons ont été constitués pour les analyses au laboratoire. Le nombre de spores pour une section correspond à la moyenne des 3 sous-échantillons, de même pour le taux de mycorhization. La diversité moléculaire est issue de l'analyse des 3 sous-échantillons.

2.3.2. Quantification du nombre de spores dans les sols

Les spores de CMA présentes dans les échantillons de sol ont été extraites en suivant la méthode de tamisage humide adaptée de Gerdemann et Nicolson (1963) et de Daniels et Skipper (1982). Pour chaque prélèvement de sol, 3 échantillons de 50 g ont été passés à travers trois tamis emboîtés de 1000, 400 et 45 µm. Les spores récupérées sur le tamis de 45 µm ont été purifiées sur un gradient de saccharose à 60 % par centrifugation à 3 000 tours/minute pendant 2 x 3 minutes. Les spores de CMA récupérées ont été remises en suspension dans 15 ml d'eau. Le nombre de spores a été compté dans un aliquot de 1 ml sous un stéréomicroscope (grossissement 40x). Le nombre moyen de spores est donné pour 100 g de sol sec. Les 14 ml restants ont été conservés à -20°C jusqu'à l'extraction de l'ADN et les analyses moléculaires ultérieures.

2.3.3. Détermination de la colonisation des racines par les champignons endomycorhiziens

Les fragments de racines échantillonnés (3 répliques de 16 fragments de 1 cm de long pour chaque section) ont été traités dans du KOH 10 % à température ambiante pendant 10 heures avant leur coloration avec de l'encre noire de Schaeffer comme décrit dans Vierheilig et al. (1998). Les racines ont été montées sur des lames de microscope et examinées. Pour chaque répétition, la fréquence de mycorhization (F %), le taux de mycorhization des racines (M %), l'abondance des arbuscules (A %) et



des vésicules (V %) dans le système racinaire ont été évalués selon Trouvelot et al. (1986) à l'aide du programme MYCOCALC.

2.3.4. Extraction, amplification et séquençage de l'ADN

L'ADN des spores de CMA issues des 3 échantillons de sol, a été extrait grâce au kit FastDNA Spin for soil (MP Biomedicals, Europe) conformément aux instructions du fabricant. L'ADN a été élué dans 100 µl d'H₂O DNase free. Les échantillons de racines ont été broyés à l'azote liquide. L'ADN a été extrait à partir de 250 mg de racines broyées à l'aide du kit FastDNA Spin for soil (MP Biomedicals, Europe). L'ADN a été élué dans 100 µl d'H₂O DNase free.

Pour chaque échantillon ADN, l'amplification par PCR de la région d'intérêt pour le CMA (18S de l'ARNr) a été faite selon le protocole décrit par Laclau et al (2025). Pour l'analyse en métabarcoding, la seconde PCR a été réalisée à l'aide d'un kit Nextera® XT Index Kit (Illumina, San Diego, USA) en suivant les instructions du fabricant. Les produits PCR finaux ont été séquencés sur un séquenceur MiSeq Illumina en utilisant le MiSeq Reagent Kit v3 (600-cycle ; Illumina).

2.3.5. Analyses bioinformatiques et statistiques

Les séquences d'ADN ont été analysées à l'aide d'un pipeline bioinformatique selon le protocole décrit dans Laclau et al., 2025. La base de données Maarjam (Öpik et al., 2010) a été utilisée pour assigner spécifiquement les Unités Taxonomiques Opérationnelles (OTUs) des champignons mycorhiziens à arbuscules. Un regroupement en unité taxonomique a été fait à l'aide du logiciel vsearch (v. 2.22.1 ; Rognes et al. 2016) à un niveau d'identité de 97 %. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R Studio (Posit team 2024, version 2023.12.1) et de R version 4.3.3 (R Core Team, 2023).

3. Résultats

3.1. Description du jeu de données

Initialement, l'étude devait porter sur le suivi durant 3 ans du nombre de spores de CMA dans le sol et du taux de mycorhization dans les racines de 3 sections sur deux sites aux pédoclimats contrastés de l'île. L'année 2020 marquée par le Covid n'ayant pas permis de faire les prélèvements, il a été décidé de reporter d'un an le projet. En 2021 et 2023 l'ensemble des échantillons de sol et de racines a pu être analysé. Pour l'année 2022 les racines n'ont pas pu être analysées car trop dégradées.

Dans cet article, tous les résultats quantitatifs obtenus sur les spores et mycorhizes sont présentés. En revanche, concernant la diversité, étant donné le manque de données sur les mycorhizes, seuls les résultats issus du jeu de données 'spores' sont présentés.

3.2. Quantité de spores et taux de mycorhization racinaire

3.2.1. Nombre de spores dans le sol

Globalement, après 3 ans, le SdC a eu un impact positif sur l'augmentation du nombre de spores de CMA dans le sol des deux sites étudiés avec un effet plus marqué à Sainte-Anne (Figure 3). Par rapport au référentiel du nombre de spores dans les sols décrit dans Laclau et al. (2025), les valeurs observées qualifient Sainte-Anne d'élevée en quantité de spores alors que le site les Oliviers est moyen.

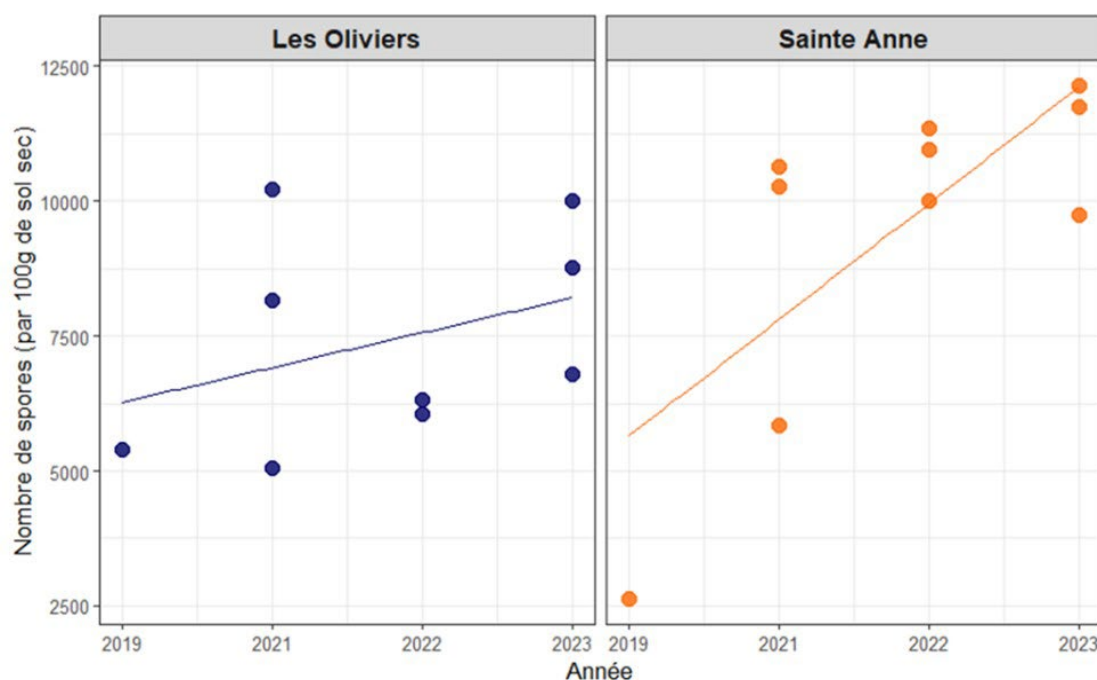


Figure 2 : Nombre de spores (dans 100 g de sol sec) des 3 parcelles pour chaque site d'étude en fonction des années.

En effet, pour la parcelle des Oliviers, le nombre de spores dans 100 g de sol sec varie entre 5 000 et 10 000 quelle que soit l'année ou la section étudiée. En revanche, pour le site de Sainte-Anne, le nombre de spores pour une année donnée varie peu entre les sections et le nombre de spores tend à augmenter au-delà de 10 000 spores/100 g de sol sec (Figure 3). En fin d'étude, sur le site des Oliviers le nombre de spores a légèrement augmenté dans le sol (en moyenne de 5 000 spores/100 g à 8 000 spores/100 g), alors que pour le site de Sainte-Anne la quantité de spores a été multipliée par 5 (en moyenne de 2 500 spores/100 g à 12 500 spores/100 g).

3.2.2. Taux de mycorhization racinaires

Le taux de mycorhization racinaire permet de savoir si les CMA ont plus ou moins colonisé les racines des végétaux et s'ils ont mis en place des arbuscules, organes nécessaires aux échanges avec les racines de la plante. Malgré le faible nombre d'échantillons racinaires analysés, il ressort que quelles que soient la section et l'année, les racines des végétaux cultivés présentaient tous des mycorhizes. Toutefois, pour toutes les conditions, les racines analysées étaient moyennement mycorhizées (taux de mycorhization M variant entre 10 et 30 %) (Résultats non présentés).

3.2.3. Diversité en CMA

Concernant la diversité en CMA, nous nous sommes intéressés à celle liée aux spores présentes dans les échantillons de sol, le jeu de données sur les mycorhizes étant trop faible pour en sortir des conclusions.

Une augmentation du nombre d'OTU après 4 ans de culture a été observée pour les deux sites en comparaison au nombre d'espèces lors de l'état initial (Figure 4). Dans l'intervalle, le nombre d'OTU a cru régulièrement dans le cas du site des Oliviers alors qu'il est resté stable à Sainte-Anne pour augmenter fortement entre 2022 et 2023. De même, le nombre de genres a peu varié dans le cas de Sainte-Anne pour les 3 premières années alors qu'il a atteint son maximum dès 2021 pour les Oliviers. 70 OTU's différentes ont été détectées sur les 4 années pour le site des Oliviers et 85 pour le site de Sainte-Anne.

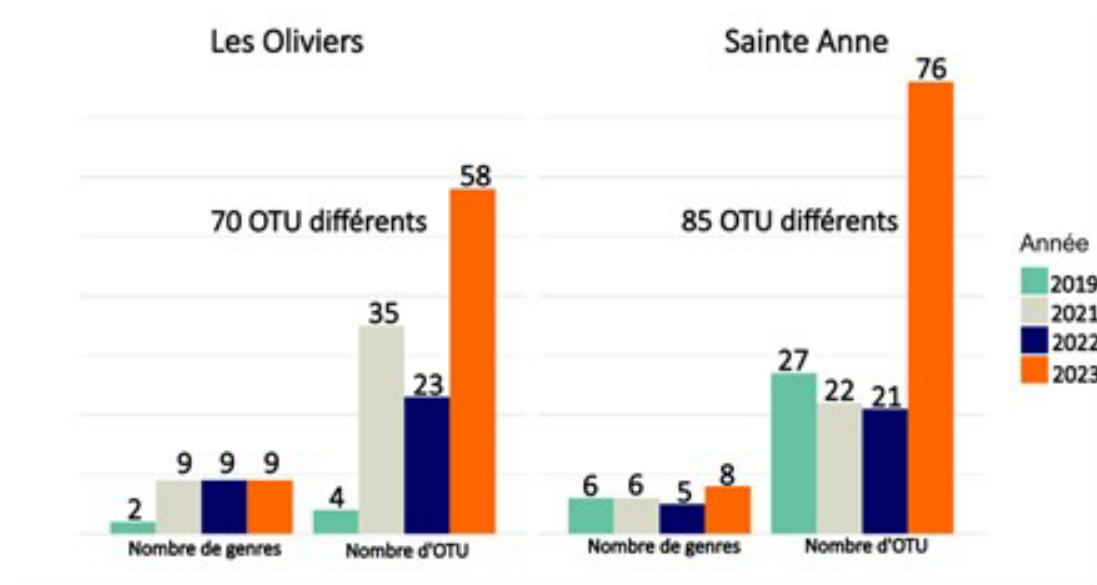


Figure 3 : Nombre d'espèces (OTU) et de genres détectés dans les spores pour les deux sites

Les diagrammes ci-dessous montrent la répartition des genres (en %) dans les deux sites (Figure 4). Visuellement, on observe une grande différence entre les 2 sites, avec 49 % des OTU's détectées du genre *Paraglomus* pour les Oliviers contre seulement 18 % pour Sainte Anne. Pour Sainte Anne où le genre *Glomus* domine avec 43 % des OTU's détectées.

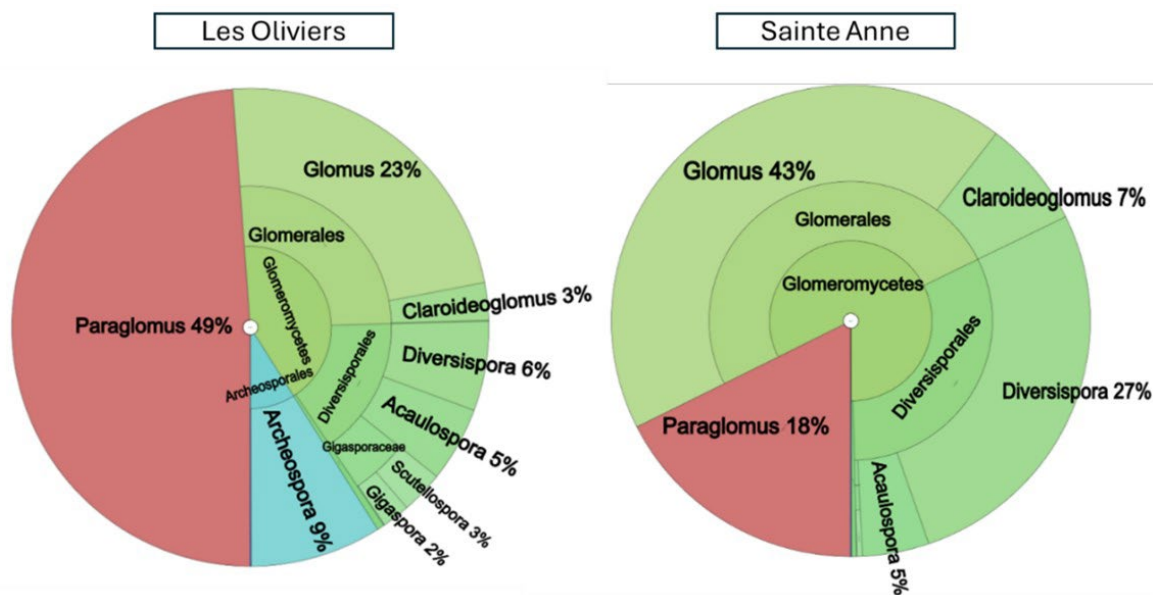


Figure 4 : Pourcentage de répartition des différents genres et familles de CMA pour l'ensemble des OTU's détectées sur la totalité de l'étude pour chaque site

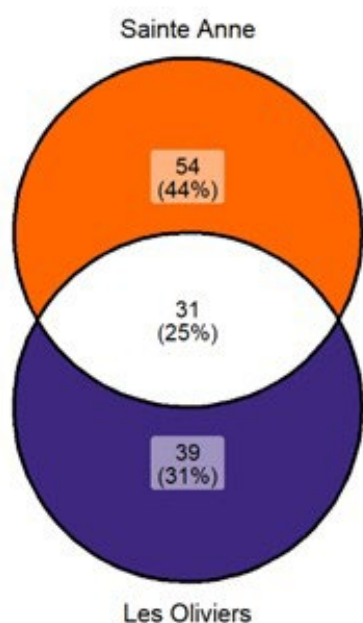
La famille des Glomerales représente une part importante de la communauté endomycorhizienne sur le site Sainte-Anne (50 %) dont le sol requiert un travail régulier de décompactage. Les Glomerales sont connus pour leur adaptation aux sols perturbés. Leur abondance marquée sur ce site est vraisemblablement liée aux itinéraires culturels mis en place avec travail du sol relativement intense et fréquent. Les espèces de cette famille sont à cycle très court, formant de petites spores majoritairement dans les racines, et donc peu impactées par les perturbations appliquées au sol.



A l'inverse, la communauté endomycorhizienne du site Les Oliviers est plus diversifiée et dominée par des familles connues pour se développer dans les milieux naturels stables où le sol n'est pas ou peu impacté par les activités humaines. En effet, les familles Paraglomus, Diversispora et Archaeospora représentent 74 % de la communauté du site Les Oliviers. Formant des spores plus grosses dans le sol et ayant un cycle plus long, les espèces de ces familles sont sensibles aux pratiques ayant recours aux intrants chimiques et mécaniques. Leur présence marquée sur le site Les Oliviers pourrait par conséquent indiquer des pratiques culturales plus douces que sur le site Sainte-Anne. Il est cependant à noter que durant l'étude, plusieurs parcelles sont restées en jachère, ceci pourrait expliquer la présence prépondérante des genres appartenant à ces familles.

3.2.4. Impact du site sur la communauté

Le diagramme de Ven (Figure 5) représente le nombre d'espèces communes entre les deux sites. Il apparaît que seulement 31 % des OTU's identifiées dans les spores sur l'ensemble de l'étude étaient communes aux deux sites.



les deux sites (Figures 6 et 7).

Figure 5 : Diagramme de Ven représentant pour chaque site le nombre d'OTU's et le pourcentage représentatif par rapport au nombre total d'OTU's identifiés dans la fraction constituée par les spores, ainsi que la proportion d'OTU's communes aux deux sites.

De plus, les graphiques en Biplot (Figure 7) permettent de comparer les OTU's communes ou non aux 2 sites au niveau des spores ou des racines. Ces graphiques représentent l'ensemble des OTU's détectées pour les 3 sections des 2 sites étudiés sur les 3 ans. Ces représentations montrent des différences d'espèces (OTU's) entre les 2 sites au niveau des spores et des mycorhizes que ce soit pour les OTU's les plus ou les moins représentées en nombre de séquences. Nos observations montrent une forte différence de composition en OTU's entre

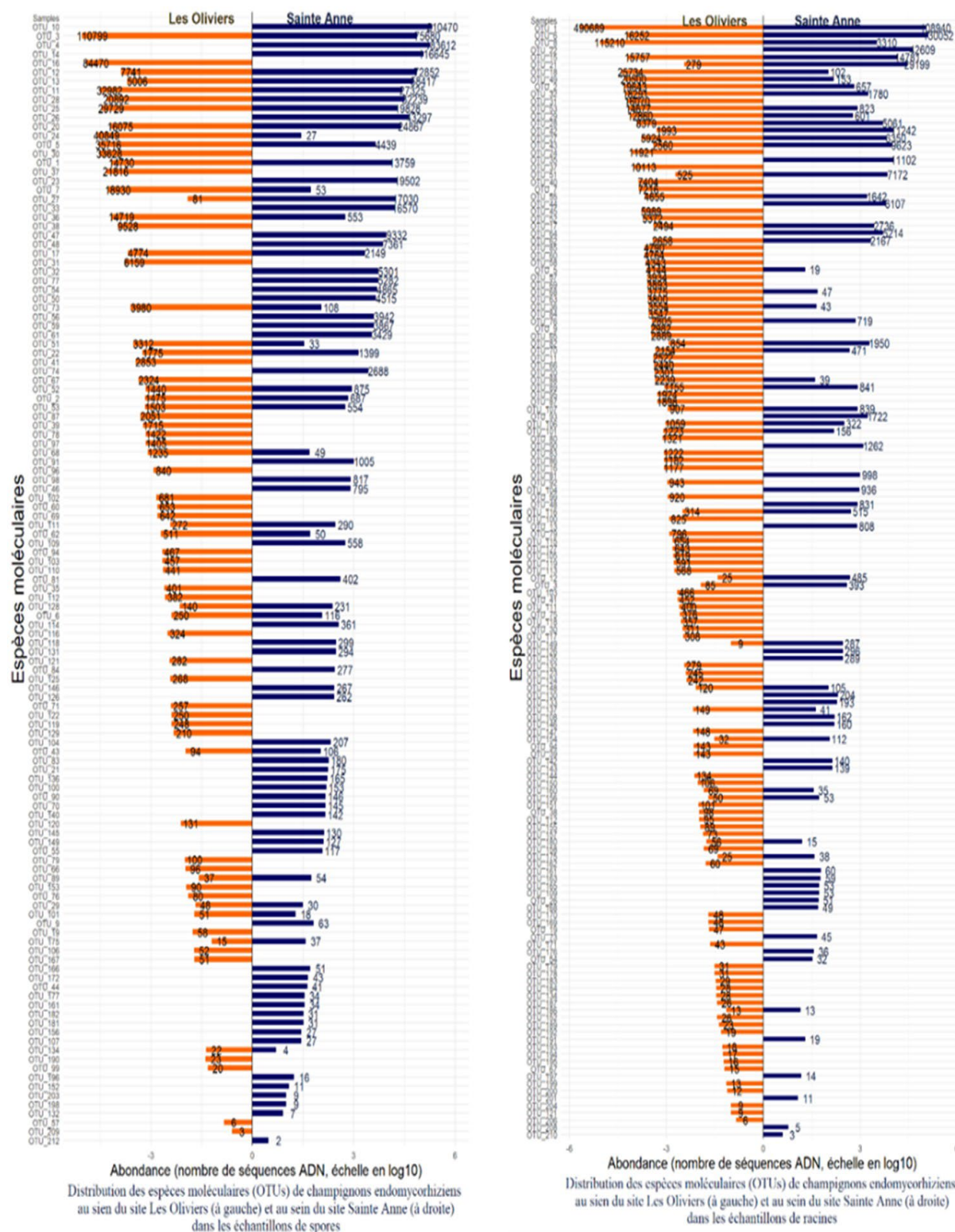


Figure 6 : Biplot représentant les OTU's détectées dans la fraction sporale totale (graphique de gauche) ou dans les racines (graphique de droite). Les OTU's sont classées de la plus abondante à la moins abondante (abondance liée aux nombres de séquences de l'OTU's dans l'analyse en métabacoding).

Des analyses en PERMANOVA ont été faites afin d'expliquer ces observations. Il ressort que concernant les espèces présentes sous forme de spores, le site explique à 29 % (p-value 0.001) la



différence de composition des OTU's détectées dans les deux sites (Figure 7). Les 71 % restant n'ont pu être expliqués par les autres variables.

Toutefois, l'année semble avoir un impact lorsque l'on s'intéresse à l'ensemble des OTU's détectées à la fois dans les spores et racines. Or une année est caractérisée par le climat (pluviométrie, températures etc.) mais surtout par les cultures mises en place sur les parcelles. Il est possible que ces dernières aient un impact sur les espèces de CMA présentes (résultats non présentés).

Test de comparaison au sein des spores globales

```
## Permutation test for adonis under reduced model
## Terms added sequentially (first to last)
## Permutation: free
## Number of permutations: 999
##
## vegan::adonis2(formula = .formula, data = metadata)
##          Df SumOfSqs      R2      F Pr(>F)
## Site      1  1.9125 0.29241 7.0251 0.001 ***
## Residual 17  4.6282 0.70759
## Total    18  6.5407 1.00000
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure 7 : Résultat de la Permanova sur l'ensemble des OTU's détectées dans les deux sites.

L'ensemble des résultats présentés (Figures 6, 7 et 8) montrent une diversité spécifique de la communauté en CMA propre à chaque site, cette diversité étant modulée par de nombreux facteurs dont les conditions pédoclimatiques du site lui-même. Des études complémentaires permettraient d'identifier les autres variables (végétaux, itinéraire cultural etc.) impactant la communauté en CMA présente dans une parcelle agricole.

4. Conclusions

L'un des objectifs de cette étude était de mieux connaître la diversité en CMA dans des sols de Martinique et plus particulièrement dans le cadre de la filière dite de 'Diversification'. A notre connaissance, c'est la première fois qu'un tel jeu de données a été décrit pour cette île des Antilles.

Nous nous sommes intéressés aux sols maraichers cultivés selon le modèle jardin créole Antillais. L'objectif était de savoir quel était l'impact de ce SdC sur la diversité mycorhizienne des sols avec une rotation pluriannuelle des cultures et la conservation de bandes relais diversifiées.

Globalement, après 4 années de culture, une plus grande diversité en CMA et un nombre plus important de spores dans le sol dans les deux sites ont été observés par rapport à la situation de départ. Ce modèle de culture semble être propice à la diversification en espèce de CMA dans les sols permettant aux végétaux d'avoir accès à une diversité de fonctions portées par chacune des espèces présentes.

La diversité en CMA et plus largement des microorganismes dans les sols, est un élément essentiel à la résilience des végétaux face aux aléas climatiques ou abiotiques. Il sera intéressant de suivre ces sites sur le long terme face au changement climatique et de mesurer le bénéfice de la diversité en CMA pour les cultures.

Le site des Oliviers présente une forte proportion de CMA pouvant indiquer des itinéraires culturaux peu impactants pour les sols avec notamment la présence de Paraglomales. En effet, Gosling et al. (2013) ont montré que les familles des Paraglomales, Diversisporales et Archaeosporales, sont généralement plus présentes dans des sols faiblement travaillés, plutôt stables et naturels. En revanche, pour Sainte-Anne les espèces du genre *Glomus* sont prépondérantes, ces résultats peuvent en partie être expliqués par le travail du sol régulier de ce site. D'après certaines études, l'intensité du travail du sol impacte les



communautés de CMA. Notamment, il a été montré que le genre *Glomus* est majoritaire dans un sol fortement perturbé par des pratiques agricoles intensives (Jansa et al., 2002 ; Oehl et al., 2010).

Les résultats présentés montrent clairement une différence au niveau des OTU's identifiées et composant la communauté en CMA pour chaque site. Cette différence étant en partie expliquée (29 %) par le site lui-même, le reste (71 %) n'ayant pu être expliqué par les autres variables étudiées. L'impact du site ou géolocalisation sur les communautés indigènes a déjà été montré dans les travaux de Jansa et al. (2014) et de Hansard et al., 2013. De plus, Lors de travaux menés en métropole sur la composition des communautés de CMA dans différents terroirs viticoles plus ou moins éloignés, Laclau et al. (2025) montrent que le site joue directement sur la composition de la communauté en CMA dans le sol (2025).

Concernant les 71 % restants, il est probable que le mode de culture en jardin créole Antillais en explique une grande proportion. En effet, l'alternance des cultures dans ce système est importante et les végétaux cultivés durant l'étude (Solanacées, Alliées) sont connus pour s'associer avec des espèces différentes de CMA. Toutefois, les progrès en détection de la diversité notamment chez les endomycorhiziens permettent aujourd'hui de s'apercevoir que le nombre d'espèces de ces champignons est largement plus élevé que celui décrit jusqu'alors. Il est probable qu'à terme ces études montrent que certaines espèces de CMA s'associent préférentiellement avec certains genres voire espèces végétales.

D'un point de vue technique, cette étude a été compliquée par de nombreux événements et imprévus. Malgré cela, les résultats montrent l'intérêt d'aller plus loin dans la compréhension de l'évolution de la diversité de CMA dans les sols, dans les racines des cultures dans un modèle cultural de type jardin créole Antillais, mais aussi de mieux étudier l'impact des bandes relais dans le système.

Dans le cas d'une suite, il sera nécessaire d'avoir un jeu de données plus conséquent avec des répétitions de l'itinéraire cultural (nombre de rotations et type de culture) mis en place afin de mieux comprendre son incidence sur les communautés de CMA mais aussi de démontrer l'importance de la diversité en CMA sur la résilience de ces cultures. Des informations sur l'association des espèces de CMA en fonction du végétal tant au niveau de la culture que de la bande relais permettraient d'affiner des rotations et les plantes relais les plus efficaces.

Ces premiers travaux ont permis de montrer l'intérêt du modèle **jardin créole Antillais** pour améliorer la diversité des CMA du sol. Des études complémentaires sur la diversité microbienne (bactéries, champignons etc.) et sur les fonctions associées pourraient permettre d'étendre ce modèle au-delà de l'arc Antillais et constituer un nouvel itinéraire agricole pour la transition agroécologique.

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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



Contributions des auteurs

Metty Trébeau a lancé le projet, mis en place l'expérimentation et fait les prélèvements de sols et de racines sur le terrain. Dominique Barry-Etienne et Patricia Laclau ont participé avec la Fredon à la construction de l'essai, aux réunions bilans et à la rédaction de l'article. Myriam Duchemin et Patricia Laclau ont fait les comptages de spores et taux de mycorhization racinaire. Myriam Duchemin a fait les analyses biomoléculaires et Azimê YOL les analyses et rendus bio-informatiques des données de séquençages.

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

Des remerciements sincères sont à adresser à l'ensemble des partenaires du projet pour leurs collaborations durant ces dernières années lors des phases de terrain. Et également aux équipes de MYCEA dont l'expertise a permis d'atteindre les objectifs du projet de manière efficace. Des remerciements pour l'ensemble des contributions tout au long de projet.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été menée grâce au concours de financement de l'Office Français de la Biodiversité dans le cadre du réseau DEPHYExpe.

Références bibliographiques

- Angeon V., Bilon R., Chave M., 2014. Co-construire des innovations de rupture. Gouvernance et apprentissage dans le cadre de la filière de mycorhizes à la Martinique. 51. Colloque ASRDLF : Métropolisation, cohésion et performance, quels futurs pour nos territoires ? Association de Science Régionale de Langue Française (ASRDLF). FRA., Marne La Vallée, France. 17 p
- Azcón-Aguilar C. and Barea J.M., 1997. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens – an overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza*, 6, 457-464.
- Chave M., Tchamitchian M., Ozier-Lafontaine H., 2014. Agroecological engineering to biocontrol soil pests for crop health. *Sustainable Agriculture Reviews 14: Agroecology and Global Change*, 14, Springer International Publishing, 511 p., *Sustainable Agriculture Reviews*, 978-3-319-06015-6. Gosling P., Proctor M., Jones J., Bending G., 2013. Distribution and diversity of *Paraglomus* spp. in tilled agricultural soils, *Mycorrhiza*, 24: 10.
- Janoušková M., Krak K., Wagg C., Štorchová H., Čáková P., Vosátka M., 2013. Effects of Inoculum Additions in the Presence of a Preestablished Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community. *Applied and Environmental Microbiology*, 79.
- Jansa J., Mozafar A., Anken T., Ruh R., 2022. Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza*, 12, (5), 225-234.
- Laclau P., Taudière A., Bernard M., Bodéan L., 2025. Terroir and farming practices drive arbuscular mycorrhizal fungal communities in French vineyards. *Frontiers microbiology*, (15), 16p.
- Mummey D., Antunes P., and Rillig M., 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi pre-inoculant identity determines community composition in roots. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, (6), 1173-1179.
- Oehl F., Laczko E., Bogenrieder A., Stahr K., Bösch R., Van Der Heijden M., Sieverding E., 2010. Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, (5), 724-738



Ozier-Lafontaine H., Boval M., Alexandre G., Chave M., Grandisson M., 2011. Vers l'émergence de nouveaux systèmes agricoles durables pour la satisfaction des besoins alimentaires aux Antilles-Guyane. *Innovations Agronomiques*, 16, 135-152.

Smith S. and Read D., 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd Edition, Academic Press, London.

Pour citer cet article : Metty Trebeau, Dominique Barry-Etienne, Myriam Duchemin, Azimê Yol, Patricia Laclau. Diversité des Champignons Mycorhiziens à Arbuscules (CMA) dans les sols de Martinique dans un contexte de modèle du jardin créole antillais. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.126-138. [10.17180/ciag-2026-vol109-art10](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Evaluation des risques liés à l'utilisation de semences non traitées sur le rendement et la qualité grainière du blé tendre d'hiver

Jay Ram¹ LAMICHHANE* et Véronique LAUDINOT²

¹ Université de Toulouse, INRAE, INPT, EI PURPAN, AGIR, Castanet-Tolosan Cedex, France

² Chambre d'Agriculture du Grand Est, 9 rue de la Vologne Bâtiment I 54520 LAXOU, France

*Correspondance : jay-ram.lamichhane@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art11>

Résumé

L'utilisation de semences traitées avec des fongicides conventionnels est une pratique courante en agriculture conventionnelle, depuis plusieurs décennies. Cette pratique vise notamment à lutter contre les agents pathogènes transmis par les semences et le sol, susceptibles d'affecter le rendement et la qualité des cultures semées. Plus spécifiquement, pour le blé d'hiver, deux maladies clés, à savoir la carie commune, causée par *Tilletia* spp., et la fusariose de l'épi, causée par *Fusarium* spp., peuvent affecter le rendement et la qualité en l'absence de traitement des semences avec des fongicides conventionnels. Cependant, les risques économiques liés à l'utilisation de semences de blé sans traitement chimique sont mal connus. Afin de combler ce manque de connaissances, un essai à grande échelle en exploitation a été mené sur six ans (2019-2024) afin d'évaluer les risques liés à l'utilisation de semences de blé sans traitement chimique dans la région Grand Est de la France. Globalement, nos résultats montrent qu'à quelques exceptions près, l'utilisation de semences de blé traitées avec des fongicides conventionnels n'augmente pas le rendement ni la qualité des grains. Ces résultats sont encourageants pour les agriculteurs français qui sont prêts à se passer des semences traitées avec des fongicides conventionnels en raison des préoccupations croissantes concernant la santé humaine et l'environnement.

Mots-clés : Traitements des semences, implantation des cultures, innovation, carie du blé, production de mycotoxines

Abstract: An on-farm experiment to assess the impact of planting untreated or non-chemically treated seeds on soft winter wheat yield and quality in North-East France

Planting seeds treated with conventional fungicides is a common practice in conventional agriculture since several decades. This practice is especially aimed at controlling seed- and soil-borne pathogens that may affect crop yield and quality. More specifically to winter wheat, two key diseases, namely common bunt, caused by *Tilletia* spp., and Fusarium head blight, caused by *Fusarium* spp may severely affect yield and quality in the absence of seed treatments with conventional fungicides. However, there is little knowledge about the economic risks of planting wheat seeds without chemical seed treatments. To fill this knowledge gap, a large-scale on-farm trial was conducted over 6 years (2019-2024) to assess the risks of planting wheat seeds without chemical seed treatments in the Grand Est region, North-East France. Overall, our results show that, except for a few exceptions, planting wheat seeds treated with conventional fungicides does not increase grain yield and quality. These results are encouraging for French farmers who are willing to give up planting seeds treated with conventional fungicides due to increasing concerns about human health and the environment.

Keywords: Seed treatments, crop establishment, innovation, wheat bunt, mycotoxin production



1. Introduction

Le traitement de semences consiste à traiter les semences avec plusieurs ingrédients actifs synthétiques ou naturels, notamment des insecticides, des fongicides, des nématicides, des rodenticides ou des répulsifs aviaires, seuls ou en combinaison (Lamichhane et al. 2020 ; Hitaj et al. 2020). L'objectif principal du traitement de semences aux pesticides est de réduire les risques de ravageurs et de maladies. Plus spécifiquement, la fonte des semis est la maladie la plus courante affectant les cultures semées, et peut être causée par des agents pathogènes transmis par les semences ou par le sol (Khanzada et al. 2002 ; Lamichhane et al. 2017). Cette maladie peut affecter les semences en germination, ainsi que les plantules, en pré- et post-levée, ce qui peut entraîner un échec d'implantation des cultures, des pertes de peuplement et de rendement tant en termes de quantité que de qualité. Le principal avantage de l'utilisation de semences traitées aux pesticides est lié à une réduction des risques de pertes de plantules, en pré- et post-levée dans des conditions propices aux bioagresseurs, notamment telluriques. Une description détaillée des avantages et des risques liés à l'utilisation de semences traitées aux pesticides a déjà été publiée (Lamichhane et al. 2020 ; Hitaj et al. 2020).

Dans les systèmes de culture conventionnels, l'utilisation de semences traitées aux pesticides est une pratique courante. Dans l'ensemble, plusieurs résultats de recherche ont remis en question la durabilité du traitement prophylactique des semences, soulignant la nécessité d'évaluer soigneusement les risques de ravageurs et de maladies avant d'utiliser systématiquement les semences traitées dans les agroécosystèmes (Rossman et al. 2018 ; Mourtzinis et al. 2019 ; You et al. 2020). Cependant, la plupart, voire la totalité, de ces études ont été menées en Amérique du Nord ou en Australie, tandis que peu d'informations étaient disponibles en Europe sur la durabilité des systèmes de grandes cultures sans traitement des semences par pesticides. Par exemple, une étude antérieure menée au Danemark (Jørgensen et al. 2012) et une autre dans le nord de l'Italie (Capo and Blandino 2021) ont montré peu ou pas d'avantages de l'utilisation de semences de blé traitées aux fongicides sur le rendement et la qualité dans les conditions de terrain. Cependant, ces études étaient limitées dans l'espace et dans le temps, soulignant la nécessité d'intégrer des gradients spatio-temporels plus larges pour évaluer la durabilité des systèmes de culture en l'absence des traitements chimiques des semences. Cette connaissance est particulièrement importante dans un contexte réglementaire en évolution rapide au sein de l'Union Européenne, où un grand nombre de molécules chimiques autrefois utilisées, y compris celles pour le traitement des semences ont été interdites. De plus, plusieurs mesures incitatives ont été mises en place au sein de l'Union européenne pour réduire la dépendance aux pesticides conventionnels ainsi que pour décourager l'utilisation de produits chimiques, y compris ceux utilisés dans le traitement des semences (e.g. Thiram, Métalaxyl-M). Un exemple typique à cet égard est la mise en place des Mesures Agro Environnementales et Climatiques (MAEC), un dispositif de développement territorial constituant l'un des outils majeurs du 2^e pilier de la Politique agricole commune.

Plus spécifiquement à la France, en 2017, suite à la prise en compte de l'indice de fréquence de traitement (IFT) de semences dans le calcul des objectifs des MAEC, des producteurs ont interrogé leurs conseillers quant aux risques économiques (pertes de rendement) de ne plus utiliser de traitements de semences chimiques étant donné le poids de ces pesticides dans leurs objectifs IFT hors herbicides. Face aux lacunes de connaissances de l'impact d'impasses répétées, un dispositif d'expérimentation système a été construit dans le cadre du projet DEPHY EXPE FAST (Faisabilité et évaluation de systèmes de cultures économes en pesticides en l'Absence répétée de Semences Traitées). Une description détaillée du projet a déjà été publiée (Lamichhane and Laudinot 2023). Globalement, FAST avait pour objectif d'explorer l'impact de l'absence de traitements de semences sur les résultats technico-économiques (quantité et qualité des récoltes) des systèmes de culture dans la région Grand Est. En effet, il existe des lacunes dans les connaissances quant à savoir si l'utilisation de semences non traitées chimiquement entraîne des pertes de qualité du rendement des grains le nord-



est de la France. Dans cet article, nous nous concentrerons uniquement sur la qualité des récoltes du blé d'hiver en l'absence de traitements chimiques des semences en mettant l'accent sur deux problèmes majeurs : la contamination par les mycotoxines et la carie.

2. Carie du blé : un problème important en l'absence de traitement chimique des semences ?

La carie commune du blé est causée par *Tilletia caries* et *T. foetida* tandis que la carie naine du blé est attribuée à *T. controversa* (Hoffmann 1982). Sur le blé tendre, la carie commune est la plus répandue et est économiquement importante en France, notamment en agriculture biologique en l'absence de traitements chimiques des semences (Valade et al. 2023). La carie commune peut survenir aussi bien sur le blé semé en automne que sur le blé semé au printemps, car les températures après le semis sont propices à l'infection des jeunes plants. La carie commune est principalement une maladie transmise par les semences, provoquée par les téliospores qui infestent la surface des semences. Cependant, les téliospores telluriques peuvent également être à l'origine de la maladie. La maladie se manifeste lorsque les téliospores présentes dans le sol ou sur les semences germent et produisent des hyphes qui infectent le coléoptile avant l'émergence des plantules. Les téliospores sur les semences mettent généralement plusieurs jours à germer, ce qui coïncide avec l'émergence du coléoptile. La maladie est favorisée par des températures fraîches du sol, avec un optimum de 5 à 10 °C (Hoffmann 1982).

Les traitements de semences chimiques sont très courants pour lutter contre la carie du blé en agriculture conventionnelle. En agriculture biologique, plusieurs traitements biologiques des semences ont été testés pour lutter contre la carie du blé avec différents niveaux d'efficacité (Koch et al. 2006 ; Goates and Mercier 2011). En France, les solutions existantes couramment utilisées pour lutter contre la carie du blé en agriculture biologique comprennent le traitement des semences avec le vinaigre, le cuivre et le soufre (Fromentin et al. 2023). Cependant, on sait peu de choses à ce jour sur la variabilité spatio-temporelle du développement de la carie du blé en l'absence de traitement chimique des semences, qui est d'une importance capitale pour la prise de décision des agriculteurs, en particulier lorsqu'ils utilisent des semences de ferme.

3. Production de mycotoxines

Les mycotoxines produites par les espèces de *Fusarium* et *Microdochium* phytopathogènes constituent un problème majeur pour la santé animale et humaine dans le monde entier (on Contaminants in the Food Chain (CONTAM) et al. 2017). Plusieurs espèces de ces pathogènes sont considérées comme la principale source de contamination par les mycotoxines des petites céréales dans les climats tempérés (Wang et al. 2024). Plus spécifiquement sur le blé, en plus de provoquer la fusariose de l'épi pendant la phase de reproduction, *Fusarium* spp. causent la fonte des semis de blé, affectant ainsi sa qualité d'implantation. Le déoxynivalénol (DON) et la zéaralénone (ZEA) sont principalement produits par *F. graminearum* et *F. culmorum*. *M. majus* (Wollenweber) et *M. nivale* Fries, transmis par les semences, sont les principaux agents pathogènes responsables de la fusariose des plantules dans les régions plus fraîches d'Europe du Nord (Glynn et al. 2008), mais plusieurs espèces de *Fusarium* peuvent également provoquer la fusariose des plantules, comme cela est souvent décrit dans les régions plus chaudes.

Le risque est potentiellement élevé après des saisons particulièrement humides pendant la floraison et la maturation (Osborne and Stein 2007). Une humidité plus élevée est également corrélée à la production accrue de la mycotoxine déoxynivalénol par *F. graminearum*, un pathogène infectant une gamme de céréales, ce qui entraîne des pertes économiques importantes et une réduction de la qualité des aliments (Andersen et al. 2015). La rotation des cultures en général et la culture précédente en particulier affectent la production de mycotoxines (Qiu et al. 2016).



Les traitements de semences sont très courants pour réduire les risques d'attaques par ces agents pathogènes transmis par les semences et le sol. Cependant, l'effet du traitement des semences avec un fongicide chimique est variable, et le seuil acceptable de semences contaminées n'est pas bien connu à ce jour (Jørgensen et al. 2012). Plus spécifiquement en France, on sait peu de choses à ce jour sur le risque de production de mycotoxines en l'absence de traitements chimiques des semences sur de larges gradients spatio-temporels.

4. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est de type observatoire piloté, mobilisant des agriculteurs-expérimentateurs. Les principales caractéristiques des sites d'étude utilisés pour les expérimentations sont présentées dans le **Tableau 1**. Ce réseau créé en 2019, était constitué de 32 sites (correspondant à des parcelles). Chaque site, comprend 2 modalités : REF (pratiques agriculteurs sur une durée de 5 à 6 campagnes, incluant des semences traitées chimiquement) et DEP (toutes pratiques étant égales à REF exceptée l'utilisation de semences non traitées chimiquement). Ces semences non traitées chimiquement sont de diverses natures en fonction des cultures et des pratiques des agriculteurs : semences certifiées non traitées chimiquement, semences certifiées traitées thermiquement, semences fermières triées non traitées et semences fermières triées et traitées avec du vinaigre. Dans le cas particulier du blé tendre d'hiver, la nature des semences non traitées chimiquement répondait à une règle de décision (cf Fig 3) à partir des semis de l'automne 2020 pour la récolte 2021.

La surface moyenne de chaque modalité est de 1.5 ha. La totalité des pratiques agricoles sont enregistrées annuellement (gestion de l'interculture, travail du sol, semis, variété, fertilisation, protection phytosanitaire,...). Les variables suivies annuellement dans chaque modalité sont : la dynamique de levée, le taux de pertes à la levée, des facteurs explicatifs du rendement (épis/m² en céréales à paille, poids des graines de colza,...), des indicateurs de qualité des récoltes (teneurs en sucre des betteraves, contamination carie en blé, mycotoxines,...), le rendement ainsi que l'abondance et la diversité microbiologique des sols. Un dénombrement des lombrics a été effectué en début et en fin d'expérimentation en 2024.

Les récoltes sont réalisées avec le matériel de l'agriculteur, sur une surface la plus grande possible et au moins supérieure à 500m² par modalité (Méthode appelée « Essai-bande »). Le seuil de 5qx/ha est communément partagé au sein de la communauté des expérimentateurs pour admettre une différence entre 2 bandes, tenant compte de l'hétérogénéité des sols et de la précision relative des outils de pesée.

Les systèmes de culture sont tous différents puisque construits individuellement par chaque agriculteur. La succession des cultures n'est pas figée à priori, elle est ajustée annuellement en suivant les règles de décision de chaque agriculteur qui adapte son assolement en fonction de ses objectifs et des conditions climatiques.

L'assolement annuel FAST est donc variable. Le maïs (grain ou ensilage) et le blé tendre d'hiver représentent les cultures majoritaires. Au total, sur les campagnes 2019 à 2024, 40 sites ont été implantés en blé tendre d'hiver, 37 sites en maïs et 15 sites en orge de printemps. Puis 14 sites en orge d'hiver et 12 sites en colza. Les autres cultures ont été implantées sur moins de 5 sites (**Figure 1**). Divers aléas depuis 2019 ont eu pour conséquence l'abandon de plusieurs sites, le réseau FAST comporte 24 sites en fin d'expérimentation (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des 24 sites expérimentaux représentant le projet FAST à ce jour. Les informations relatives au travail du sol, à la fonte des semis et au risque de carie sont basées sur les données



historiques des sites, les deux dernières se réfèrent uniquement aux céréales d'hiver. LF : Labour fréquent ; SD : Semis direct ; TCS techniques culturales simplifiées ; LO : Labour occasionnel.

Commune	Surface / modalité (ha)	Travail du sol historique	Texture (argile:limon:sable)	pH (eau)	Matière organique (%)	Risque fonte de semis	Risque carie
Aingeville	1	LF	22:63:15	7.9	3.3	Fort	Faible
Ambacourt	0.6	LF	36:46:18	8.1	3.6	Fort	Faible
Auzainvillers	8	LF	22:68:10	6.6	2.7	Moyen	Faible
Balleville	0.6	SD	20:48:32	6.3	4	Moyen	Faible
Domèvre sur Durbion	0.6	SD	22:54:24	6.2	2.8	Moyen	Faible
Les Ableuvenettes	0.6	TCS	22:63:20	8.2	5.3	Fort	Faible
Offroicourt	0.9	LF	47:46:7	8.1	2.9	Moyen	Faible
Pompierre	1.4	LO	31:51:18	8.1	4.9	Fort	Faible
Rebeuville	1.6	LO	30:66:4	7.4	3.1	Fort	Faible
Removille	0.8	LO	33:41:26	7.2	3.4	Fort	Fort
Saint Gorgon	0.9	LF	19:50:31	6.1	3.2	Moyen	Faible
Valfroicourt	0.8	LF	37:51:12	7.9	4.6	Moyen	Faible
Valfroicourt	2.6	LO	36:55:9	8.2	4.1	Moyen	Faible
Vroville	1.8	LO	34:60:6	7.9	4.3	Moyen	Faible
Bras sur Meuse	1.6	TCS	22:72:6	5.6	1.8	Faible	Faible
Pouilly sur Meuse	1	LS	26:56:18	7.8	9.7	Faible	Faible
Verdun-Regret	0.9	LF	28:47:25	8.2	4.6	Faible	Faible
Very	0.7	LO	25:67:8	7.2	2.3	Faible	Faible
Villegusien Le Lac	2	LO	30:61:9	7.9	5.3	Faible	Faible
Montuzain	1	TCS	21:39:40	8.2	5	Moyen	Moyen
Montuzain	1.8	TCS	24:48:28	8.2	3.9	Moyen	Moyen
Charbogne	1.7	TCS	39:54:7	8	2.9	Faible	Faible
Schirrhein	2.4	LF	56:28:16	7.1	4.7	Moyen	Faible
Dessenheim	0.5	LF	22:33:45	8.4	2.6	Moyen	Faible
Moyenne ± ET	2 ± 1			8 ± 1	4 ± 1		

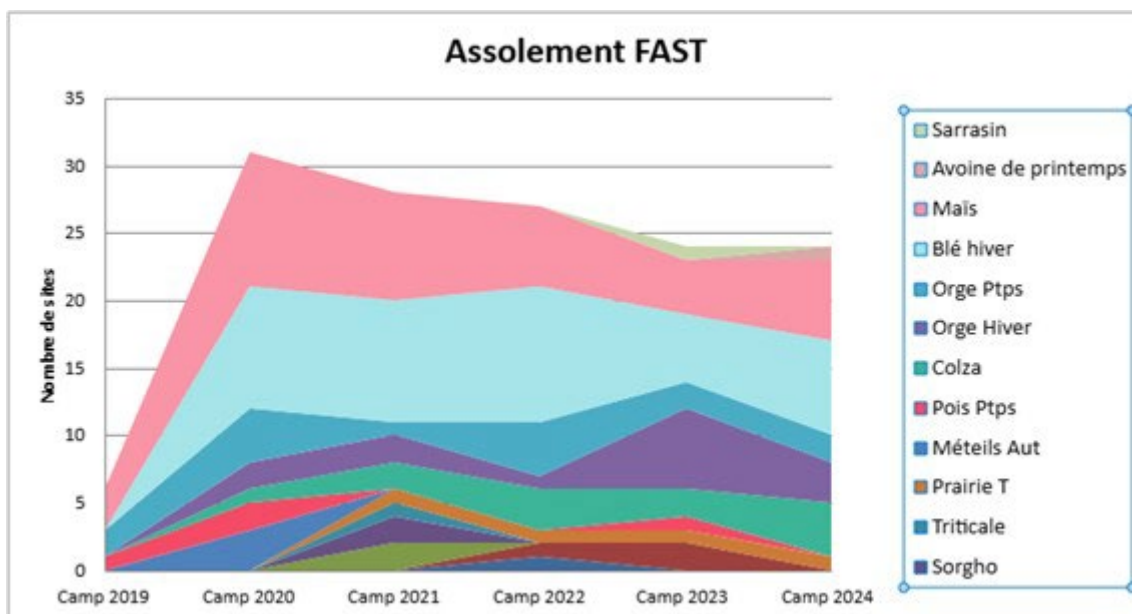


Figure 1 : Cultures suivies dans le projet FAST

5. Une règle de décision mise à l'épreuve pour maîtriser les dégâts de carie sur blé tendre d'hiver

Les leviers de gestion de la carie sont nombreux (**Figure 2**). La combinaison de ces leviers potentiels est cependant parfois en contradiction avec les leviers de gestion d'autres bioagresseurs. En particulier, le retard de la date de semis est fréquemment mis en place dans l'objectif de maîtriser les adventices alors qu'il peut favoriser l'installation de la carie en augmentant le délai d'apparition du stade 2 feuilles à partir duquel le blé devient résistant. Certains leviers sont difficilement actionnables à ce jour et la résistance des variétés est une connaissance peu voire pas diffusée.

La qualité des semences semble être le facteur déterminant sur lequel les agriculteurs peuvent avoir une action en tactique annuelle, spécialement en cas d'utilisation de semences fermières.

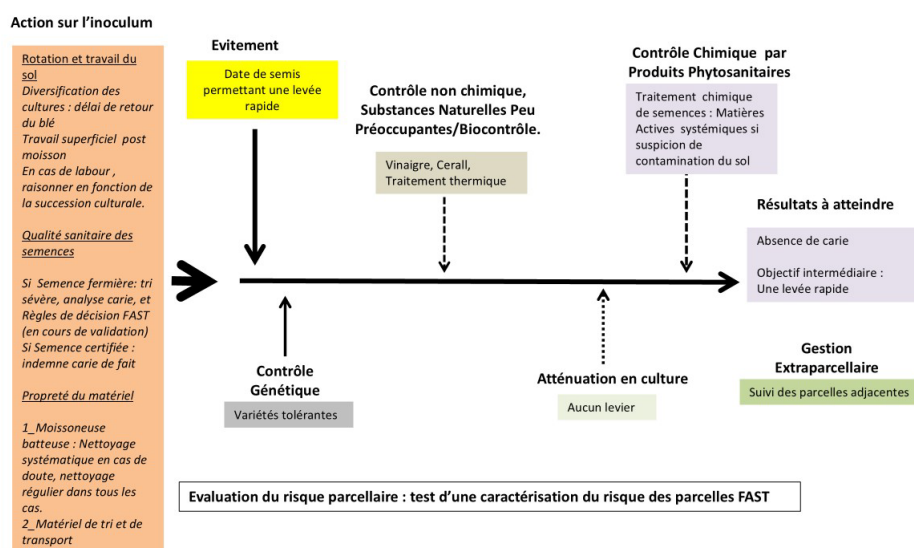


Figure 2 : Représentation de la combinaison des leviers de gestion de la carie testés dans le projet FAST

Le Projet FAST a proposé une règle de décision (**Figure 3**) nécessitant l'analyse de la teneur en carie des semences fermières et testé la faisabilité et la robustesse de cette règle de décision à partir de la campagne de récolte 2021. Neuf Traitements chimiques différents ont été recensés. Dans 68 % des cas, il s'agit de matières actives à action systémique (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Traitements chimiques de semences utilisés sur blé dans les modalités REF du projet FAST (2019-2024)

NOM COMMERCIAL ET ASSOCIATIONS	NOMBRE SITUATIONS	DE ACTION SYSTÉMIQUE	CLASSEMENT CMR
CELEST NET	8	Non	Non
MISOL	3	Oui	Non
NEGEV	1	Oui	Non
PREPPER	1	Non	Non
RUBIN PLUS	1	Oui	Oui
VIBRANCE GOLD	10	Oui	Oui
LATITUDE RANCONA 15ME	1	Oui	Oui
VITAVAX EXTRA	1	Oui	Oui
RANCONA 15ME	2	Oui	Oui

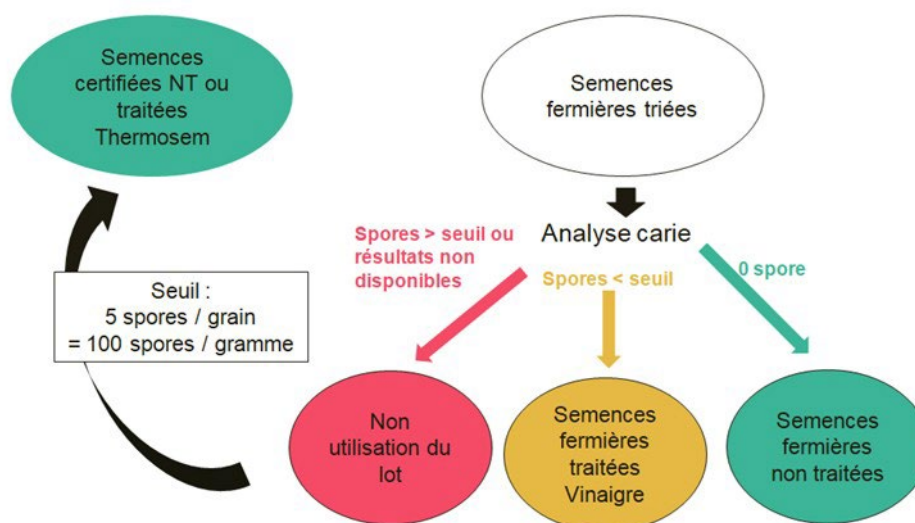


Figure 3 : Règle de décision concernant l'utilisation de lots de semences fermières suivie dans le projet FAST : l'utilisation de semences fermières n'est possible que si le lot a été soigneusement trié et que si la teneur en carie suite à l'analyse en laboratoire était inférieure à un seuil fixé à 100 spores / gramme. Au-dessus de ce seuil le lot n'est pas utilisé et la modalité DEP est alors implantée avec des semences certifiées achetées (non traitées ou traitées industriellement selon le procédé ThermoSem® consistant en une désinfection à la vapeur).



6. Résultats sur la quantité et la qualité des récoltes du blé tendre d'hiver

Toutes années et tous sites confondus (39 récoltes), les résultats des rendements sont statistiquement comparables, que les semences soient traitées chimiquement ou pas. Les rendements moyens sont respectivement de 75,3 qx/ha en REF vs 73,3 qx/ha en DEP.

En DEP, une perte de rendement supérieure à 5 quintaux a été mesurée dans 7 situations tandis qu'un gain supérieur à 5 quintaux dans 1 situation par rapport à la modalité REF. La diversité des caractéristiques de chaque situation (année, sol, date de semis, successions culturales...) n'a pas permis de mettre en évidence de facteurs explicatifs majeurs lié à cette variabilité de rendement (**Figure 4**).

Les situations jugées à risques, notamment les blés implantés après un blé, ne représentent que 3 situations sur les 39 récoltes et une seule d'entre elles obtient un rendement inférieur en DEP par rapport à la modalité REF.

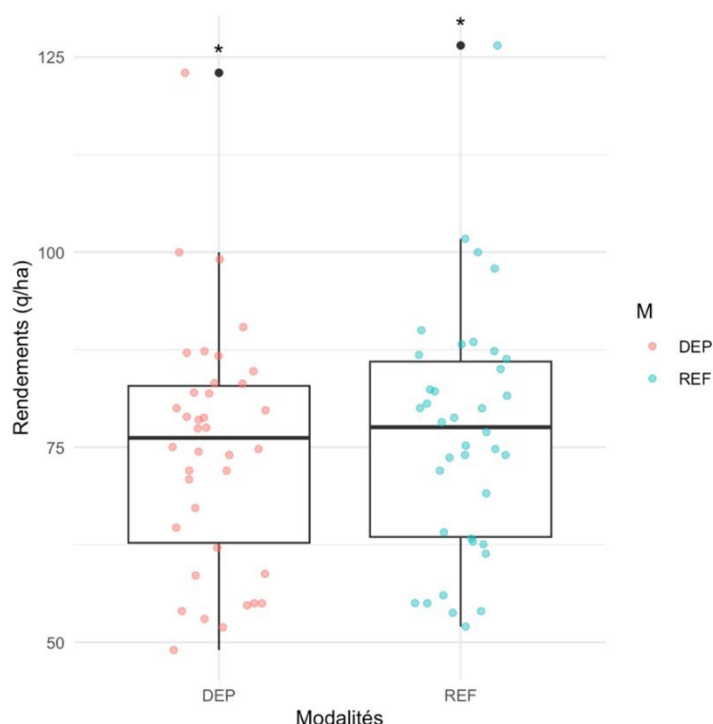


Figure 4 : Rendements du blé tendre d'hiver des modalités avec semences traitées chimiquement (REF) vs modalités avec semences non traitées chimiquement (DEP)

Maitrise de la carie du blé

Dans l'ensemble, 34 analyses ont été réalisées sur les deux modalités, sur 5 campagnes de récolte dont 24 situations issues de semences fermières et 10 situations dans lesquelles la modalité DEP a été implantée avec des semences certifiées traitées thermiquement. Un cas de suspicion de contamination par le matériel à la récolte (site B37V10 récolte 2022) nous a conduit à écarter le résultat des analyses (respectivement 1100 spores/gramme dans la modalité REF vs 1500 spores/gramme en DEP) de la synthèse. Sur 33 sites, la teneur en spores de carie est comparable dans les deux modalités (**Figure 5**, p-value = 0.0154) et la contamination est maitrisée à 6,45 spores / gramme en modalité REF et 6,5 spores / gramme en modalité DEP).

La règle de décision, n'a pas été respectée dans 13 situations dont 4 sites pour lesquels l'analyse des semences n'a pas été réalisée. Dans le cas des 8 parcelles avec analyses des semences, alors que la teneur en spores des semences fermières justifiait un traitement du lot avec du vinaigre (de 1 à 18



spores / gramme), la modalité DEP a été implantée avec des semences nues (aucun traitement de semences). Malgré cette entorse, les récoltes issues de l'expérimentation montrent des taux de contamination maîtrisés, inférieurs à 30 spores / gramme (pour une moyenne de 6.4 spores/gramme).

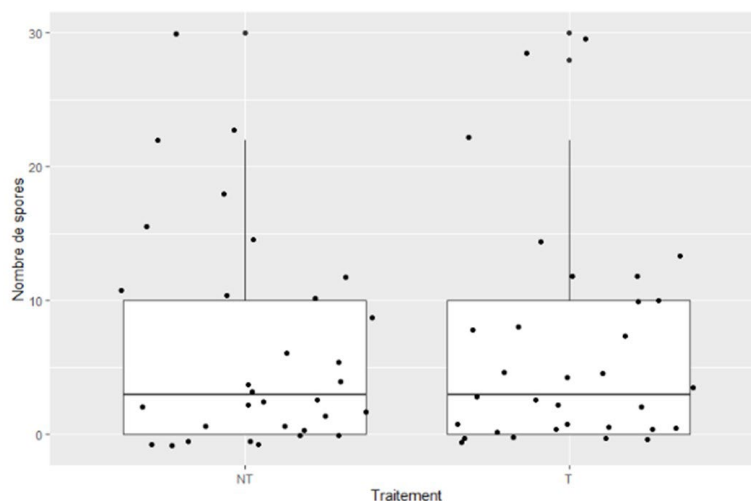


Figure 5 : Comparaison du nombre de spores par gramme des récoltes de blé issus de lots traités chimiquement (T) et de semences non traitées chimiquement (NT)

Maitrise de la teneur en mycotoxines des récoltes

Des analyses de teneur en Mycotoxines (Deoxynivalenol par la méthode MOC3107) des récoltes ont été réalisés sur 25 sites sur les 4 campagnes et permettent de classer les récoltes d'après la norme de commercialisation de 1000 µg/kg.

Dans les conditions de l'expérimentation, le traitement chimique des semences n'a pas d'effet sur la teneur en mycotoxines des récoltes. Seules 5 parcelles présentent des teneurs supérieures à la norme de commercialisation (voir **Tableau 3**), indépendamment de la modalité testée. Les analyses reflètent les situations à risques que sont les conditions climatiques (4 de ces parcelles correspondent à la récolte 2021) combinés à un précédent à risque et l'absence de travail du sols (les 5 sites étaient implantés derrière un maïs sans travail du sol).

Tableau 3 : Classement des échantillons des récoltes des parcelles d'expérimentation en fonction de leur teneur en DON (nombre d'analyses)

Modalité	Répondant aux normes de commercialisation	Ne répondant pas aux normes de commercialisation
REF (récolte issue de semences traitées chimiquement)	20	5
DEP (récolte issue de semences non traitées chimiquement)	20	5

7. Conclusions et perspectives

Les conditions de cette expérimentation reflètent des systèmes et des pratiques d'agriculteurs du Grand Est, pour lesquels le blé tendre d'hiver reste une culture majeure de leur rotation. Elles reflètent également la difficulté de réaliser des expérimentations à l'échelle du système de culture en ajustant des règles de décision au contexte de chacun, y compris les contraintes d'organisation du travail et de priorisation des chantiers.



Le nombre de suivis et d'analyses réalisés sur blé tendre d'hiver ne permettent certes pas de distinguer finement l'effet de nombreux facteurs sur la quantité et qualité des récoltes en blé tendre mais, en première analyse, les traitements chimiques des semences ne permettent pas un gain de productivité ni de qualité par rapport à des semences non traitées saines. Dans le cas spécifique des semences fermières, un tri sévère des lots et la réalisation d'une analyse en laboratoire permet de s'assurer de la qualité sanitaire vis-à-vis de la carie du blé tendre. Une règle de décision a montré son efficacité en termes de maîtrise de la contamination des récoltes par la carie issue des semences.

Le traitement chimique systématique des semences de blé ne semble donc pas justifié. Mais l'enjeu économique est négligeable et la disponibilité en semences certifiées non traitées n'étant pas toujours assurée par les fournisseurs habituels des agriculteurs conventionnels, la contrainte organisationnelle peut amener de nombreux producteurs à poursuivre leur utilisation.

Les résultats ont été discutés avec des producteurs. Leur volonté de tenter des impasses raisonnées est liée à leur aversion au risque personnel, en lien avec leurs freins et moteurs de leur propre changement ; les arguments de préservation de la santé des utilisateurs sont entendus par certains, prenant conscience que la moitié des traitements chimiques des semences qu'ils manipulaient étaient classés CMR (Cancérigène, Mutagène, Reprotoxique).

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

Jay Ram LAMICHHANE : <https://orcid.org/0000-0001-9780-0941>

Contributions des auteurs

Conceptualisation : JRL, VL ; Méthodologie : JRL, VL ; Investigation : JRL, VL ; Rédaction du brouillon original : JRL, VL ; Relecture finale : JRL, VL.

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

Tous nos remerciements aux agriculteurs-expérimentateurs et à leurs conseillers des structures partenaires : Chambres d'Agriculture d'Alsace, des Ardennes et des Vosges, le CETA de Romilly et la Coopérative EMC2.



Déclaration de soutien financier

Le projet FAST a été réalisé dans le cadre du Réseau DEPHY EXPE, Action du plan Ecophyto piloté par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec l'appui technique et financier de l'Office français de la Biodiversité

Références bibliographiques

- Andersen KF, Madden L V, Paul PA (2015) Fusarium Head Blight Development and Deoxynivalenol Accumulation in Wheat as Influenced by Post-Anthesis Moisture Patterns. *Phytopathology*® 105:210–219. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-14-0104-R>
- Capo L, Blandino M (2021) Minimizing Yield Losses and Sanitary Risks through an Appropriate Combination of Fungicide Seed and Foliar Treatments on Wheat in Different Production Situations. *Agronomy* 11:. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040725>
- Fromentin C, Culiez L, Delannoy T, Oste S (2023) Lutter contre la carie du blé en bio, des solutions existent. *L'Action Agric Picardie* 12:1
- Glynn NC, Hare MC, Edwards SG (2008) Fungicide seed treatment efficacy against *Microdochium nivale* and *M. majus* in vitro and in vivo. *Pest Manag Sci* 64:793–799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ps.1558>
- Goates BJ, Mercier J (2011) Control of common bunt of wheat under field conditions with the biofumigant fungus *Muscodor albus*. *Eur J Plant Pathol* 131:403–407
- Hitaj C, Smith DJ, Code A, et al (2020) Sowing Uncertainty: What We Do and Don't Know about the Planting of Pesticide-Treated Seed. *Bioscience* 70:390–403. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa019>
- Hoffmann JA (1982) Bunt of wheat. *Plant Dis* 66:979–986
- Jørgensen LN, Nielsen LK, Nielsen BJ (2012) Control of seedling blight in winter wheat by seed treatments – impact on emergence, crop stand, yield and deoxynivalenol. *Acta Agric Scand Sect B — Soil Plant Sci* 62:431–440. <https://doi.org/10.1080/09064710.2011.641028>
- Khanzada KA, Rajput A, Shah S, Lodhi M (2002) Effect of seed dressing fungicides for the control of seedborne mycoflora of wheat. *Asian J Plant Sci* 1:441–444
- Koch E, Weil B, Wächter R, et al (2006) Evaluation of selected microbial strains and commercial alternative products as seed treatments for the control of *Tilletia tritici*, *Fusarium culmorum*, *Drechslera graminea* and *D. teres*. *J Plant Dis Prot* 113:150–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF03356172>
- Lamichhane JR, Dürr C, Schwanck AA, et al (2017) Integrated management of damping-off diseases. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37
- Lamichhane JR, Laudinot V (2023) Vers une évaluation des systèmes de cultures économes en pesticides en l'absence répétée de semences traitées une présentation du projet FAST et les principaux résultats préliminaires. *Innov Agron* 89:15–28
- Lamichhane JR, You MP, Laudinot V, et al (2020) Revisiting sustainability of fungicide seed treatments for field crops. *Plant Dis* 104:610–623. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-19-1157-FE>
- Mourtzinis S, Krupke CH, Esker PD, et al (2019) Neonicotinoid seed treatments of soybean provide negligible benefits to US farmers. *Sci Rep* 9:11207. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47442-8>
- EP, Knutsen HK, Alexander J, et al (2017) Risks to human and animal health related to the presence of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms in food and feed. *EFSA J* 15:e04718. <https://doi.org/https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4718>
- Osborne LE, Stein JM (2007) Epidemiology of Fusarium head blight on small-grain cereals. *Int J Food Microbiol* 119:103–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.032>
- Qiu J, Dong F, Yu M, et al (2016) Effect of preceding crop on Fusarium species and mycotoxin contamination of wheat grains. *J Sci Food Agric* 96:4536–4541. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.7670>



Rossman DR, Byrne AM, Chilvers MI (2018) Profitability and efficacy of soybean seed treatment in Michigan. *Crop Prot* 114:44–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.08.003>

Valade R, Laudinot V, Grimault V (2023) La carie commune du blé: surveillance et moyens de lutte. *Phytoma* 759:27–32

Wang J, Sufar EK, Bernhoft A, et al (2024) Mycotoxin contamination in organic and conventional cereal grain and products: A systematic literature review and meta-analysis. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 23:e13363. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1541-4337.13363>

You MP, Lamichhane JR, Aubertot J-N, Barbeti MJ (2020) Understanding why Effective Fungicides against Individual Soilborne Pathogens are Ineffective with Soilborne Pathogen Complexes. *Plant Dis* 104:904–920. <https://doi.org/10.1094/pdis-06-19-1252-re>

Pour citer cet article : Jay Ram, Véronique Laudinot. Evaluation des risques liés à l'utilisation de semences non traitées sur le rendement et la qualité grainière du blé tendre d'hiver. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.139-150. [10.17180/ciag-2026-vol109-art11](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Impact de systèmes à sobres en produits phytosanitaires sur la biologie du sol

Sophie MAILLANT¹, Clément MUNIER¹, Nathael LECLECH¹

avec la collaboration de Camille CHAUVIN², Sarah GUILLOCHEAU³, Battle KARIMI⁴, Latounde MOYEDE¹, Marie-Noelle PONS⁵

¹ CRAGE, 9 rue de la Vologne, 54520 Laxou ; France

² ELISOL Environnement, ZA des Tourels, 10 avenue du midi, 30111 Congénies, France

³ 7, le Plessis, 56430 Mauron, France

⁴ NOVASOL, 64E Rue Sully - Bâtiment HOPE, 21000 Dijon, France

⁵ Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, CNRS-Université de Lorraine, 1 rue Grandville, BP 20451, 54001 Nancy cedex, France

Correspondance : sophie.maillant@grandest.chambagri.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art12>

Résumé

« En Grand Est, les acteurs agricoles ont conduit, de 2018 à 2024, des expérimentations de systèmes de culture limitant l'usage des produits phytosanitaires. Parmi les systèmes testés figuraient :

- un système sans produits phytosanitaires (0 PP) ;
- un système en protection intégrée avec -50 % de produits phytosanitaires (PIC) ;
- et un système en réduction du travail du sol sans glyphosate (AC).

Dans les trois systèmes, des indicateurs de fertilité biologique des sols ont été mesurés afin de déterminer l'impact de ces pratiques sur la biologie du sol. Certains indicateurs biologiques montrent que les trois systèmes sont équivalents, tandis que d'autres mettent en évidence des différences : en particulier, le système 0 PP a favorisé les nématodes et la décomposition du thé rouge. L'abondance des micro-organismes, quant à elle, donne des résultats contrastés selon les méthodes d'analyse utilisées. »

Mots-clés : Santé du sol, nématodes, micro-organismes, tea bag index, systèmes, faible IFT

Abstract: Little impact of farming practices on soil organisms within systems using very little pesticides.

In the Grand Est French region, agricultural stakeholders conducted experiments between 2018 and 2024 on farming systems with limited use of plant protection products. The systems tested included:

- a system with no plant protection products (0 PP),
- an integrated protection system with 50% fewer plant protection products (PIC),
- and a reduced tillage system without glyphosate (AC).

In all three systems, indicators of biological soil fertility were measured to determine the impact of these practices on soil biology. Some biological indicators showed that the three systems are equivalent, while others highlight differences: in particular, the 0 PP system favored nematodes and the decomposition of teabag. The abundance of microorganisms, on the other hand, gave contrasting results depending on the analysis methods used



Keywords: soil health, micro-organisms, tea bag index, farming system, low pesticide use

1. Introduction et état des connaissances

Selon le rapport 2024 de l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA, 2024), seulement 29 % des eaux de surface et 77 % des eaux souterraines avaient un « bon état chimique » en 2021 alors que l'atteinte d'un bon état de l'ensemble des masses d'eau était fixé pour 2015. Les pesticides et les nutriments utilisés en agriculture sont mis en avant comme principales pressions communes aux eaux superficielles et aux aquifères. En France, près de 20 % des stations de surveillance dépassent les concentrations maximales ou les concentrations moyennes annuelles admissibles dans les eaux de surface pour au moins un pesticide sur la période 2017-2019. Cette proportion atteint 60 à 100 % des stations sur le territoire de l'agence de l'eau Rhin Meuse ». (Zone de réalisation du projet XPE GE) (Ministère de l'Aménagement du territoire et de la transition écologique, 2022).

C'est dans ce contexte que les acteurs agricoles du Grand Est ont commencé à travailler à partir du milieu des années 2000 à une meilleure gestion de l'azote et des produits phytosanitaires dans les systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage de la région. Les premières expérimentations « systèmes » ont débuté en 2011 avec le projet EXPE Ecophyto Lorrain qui visait à tester une réduction d'au moins 50% des produits phytosanitaires sur les systèmes de cultures lorrains. Le projet s'est poursuivi en 2018 avec XPE-GE qui testait des systèmes en zéro phyto, des systèmes en protection intégrée avec -50% de phyto et un système en réduction de travail du sol sans glyphosate.

L'objectif de ces expérimentations est d'évaluer en conditions réelles des pratiques innovantes permettant de réduire l'utilisation de produits phytosanitaires par les agriculteurs, d'identifier les freins à leur mise en œuvre et de communiquer sur les résultats de ces pratiques. Parmi les leviers testés figurent : l'allongement des rotations, le désherbage mécanique, le travail du sol, le suivi des bioagresseurs et tous les leviers permettant de diminuer le recours aux produits phytosanitaires. Un grand nombre d'indicateurs a été suivi sur les différents systèmes pendant la durée du projet, ce qui permet d'évaluer leurs performances techniques, économiques, environnementales, ainsi que les impacts sur la qualité de l'eau et des sols. C'est l'impact sur la santé des sols qui est présenté dans cette étude.

Définie comme étant « la capacité continue des sols à fonctionner comme un écosystème vivant et vital qui soutient les plantes, les animaux et l'humanité » par Lehmann et al., (2020), la santé des sols constitue aujourd'hui un enjeu majeur. Selon Richelle, L., et al., (2023), plus de 30 % des sols mondiaux et 70 % des sols européens sont considérés comme dégradés ou en mauvaise santé, en grande partie (80 %) à cause de pratiques agricoles intensives. Beaucoup des fonctions des sols reposent sur les organismes qui vivent dans le sol. Les relations entre organismes vivant dans le sol et bonne santé du sol sont de mieux en mieux connues. Les indicateurs biologiques sont très nombreux et se diversifient encore (étude IndiQuaSols de Cousin et al., 2025). On en tire encore peu de conseil quantitatif concret mais les attentes sont fortes et supposent encore beaucoup d'acquisition de connaissances. Parmi les indicateurs biologiques opérationnels décrits par l'étude IndiQuaSol, la nématofaune, la Biomasse Microbienne Moléculaire, la Biomasse Microbienne par fumigation, et les lombriciens présentent de bonnes capacités à mesurer les effets de la réduction du travail et des phytosanitaires sur le fonctionnement biologique des sols. Dans cette étude, sont questionnées les performances (sensibilité, stabilité, précision...) de ces indicateurs dans des systèmes à faible utilisation de produits phytosanitaires et à intensité variable du travail du sol.



2. Caractéristiques de la plateforme expérimentale

2.1. Les trois systèmes

Trois systèmes de cultures ont été testés de 2018 à 2024 : zéro Produit Phytosanitaire (OPP), Agriculture de Conservation sans glyphosate (AC) et Protection Intégrée des Cultures (PIC). Chaque terme de la rotation était présent chaque année dans chacun des systèmes et les trois systèmes ont démarré d'un même niveau initial (même historique de pratiques). Plusieurs leviers étaient actionnés pour répondre à l'objectif de faible utilisation de phytos (tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des trois systèmes de la plateforme expérimentale. La réduction de produits phytosanitaires (PP) est exprimée par rapport à l'IFT moyen régional évalué à 5.1 (traitements de semences inclus) d'après l'Enquête SSP Agreste Pratiques culturales en grandes cultures de 2017

	<i>PIC</i>	<i>OPP</i>	<i>AC</i>
Objectif	Minimiser l'impact environnemental et le coût de la lutte sanitaire tout en maximisant les résultats économiques de l'agriculteur, en utilisant les PP en dernier recours	Contenir l'enherbement sans aucun PP tout en maintenant les performances et en utilisant des engrais minéraux	Réduire les consommations d'énergie, favoriser la fertilité du sol, en utilisant des PP en dernier recours et sans glyphosate
Rotation	Colza - blé tendre d'hiver - orge de printemps - pois de printemps - blé tendre d'hiver	Colza - blé tendre d'hiver - orge de printemps - pois de printemps - blé tendre d'hiver	Pois de printemps - colza - blé tendre d'hiver - orge de printemps
Désherbage	Mécanique + chimique	Mécanique	Mécanique + chimique
Mélanges variétaux	Mélanges entre 2 et 4 variétés pour toutes cultures à l'exception de l'orge de printemps semée en pur		
Décalage des dates de semis	Semis tardifs en céréales d'hiver, semis précoces en colza		
Couverture	Colzas associés et implantation de couverts d'intercultures avant cultures de printemps		Colzas associés et implantation de couverts d'intercultures avant cultures de printemps Couverture permanente envisagée au départ mais difficile en réduction de phyto et sans glyphosate
W sol	Alternance Labour/TCS (labour 2 années sur 5)	Labour (3 années sur 6)	Travail du sol réduit : travail du sol superficiel (moins de 5-7 cm) et semis direct occasionnel
PPP	Réduction de dose de produits phytosanitaires (-50% IFT) IFT moyen de 2.1 sur 6 ans (passage de 2.4 en 2018 à 1.1 en 2024)	Système sans produits phytosanitaires de synthèse (-100 % IFT),	Sans glyphosate et en forte réduction de phyto (-50% IFT) IFT moyen de 2.4 sur 6 ans (passage de 3.2 en 2018 à 1.2 en 2024)
Fertilisation	Engrais minéraux		



2.2. Localisation, climat et sol

La plateforme expérimentale est située en bordure ouest de la petite région agricole du plateau Lorrain, à Haroué (54). Elle est intégrée à une ferme de polyculture élevage d'un lycée agricole. Elle est constituée de trois séries de bandes : 4 pour le système AC, 5 pour le système PIC et 6 pour le système 0 PP, chacune d'une surface de 20 ares (24 m × 80 m), au sein d'une parcelle de 6,5 ha. Le sol de cette parcelle est relativement homogène (cartographie par conductivité en 2017 complétée de sondages tarière) et de type CALCOSOL argileux caillouteux issu de marnes à bancs calcaires du Sinémurien (Lias). La granulométrie est très homogène. Les apports de matières organiques ont été réguliers sur cette parcelle avant 2018. Aucun apport n'a été réalisé depuis le début de l'expérimentation. Les analyses (tableau 2) montrent que les bandes 0PP sont légèrement plus calcaires et légèrement moins riches en Matières organiques que les bandes des deux autres systèmes en 2024 (ce qui a été observé aussi en 2022). En 2017, un état initial avant séparation en bandes, a montré que les compartiments des matières organiques étaient correctement équilibrés (84% de MO liée, 16% de MO libre) et leur C/N étaient optimaux (C/N de la MO liée = 8,5 ; C/N de la MO libre = 15,5). Le compartiment microbien était très développé (BM par fumigation = 967mgC/kg représentant 3.6 du Carbone organique).

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des parcelles en 2024 (certaines analyses ont été réalisées dans deux laboratoires différents)

	Teneur en A sans décarbonatation (g/100g) (Novasol)	pH (Novasol)	Teneur en Calcaire total (g/100g)	Teneur en P méthode Olsen (g/kg)	Teneur en C organique (g/100g) Novasol	Teneur en C organique (g/100g) Celesta (moyenne de 3 répétitions)	C/N Novasol	C/N Celesta
PIC blé	51,2	7,7	2,3	0,093	2,5	2,7	9,5	10,2
PIC colza	52,2	7,7	2,5	0,096	2,6		9,7	
AC blé	52,1	7,7	2,7	0,098	2,6	2,6	9,6	10,6
AC colza	50,6	7,6	2,7	0,074	2,6		9,9	
0PP blé	46,5	7,8	7,8	0,074	2,2	2,5	9,0	10,7
0PP colza	51,6	7,7	7,7	0,079	2,2		8,9	

3. Protocoles mis en œuvre pour évaluer la fertilité biologique du sol

Les indicateurs sélectionnés pour évaluer la fertilité biologique de la plateforme expérimentale sont de diverses natures : ponctuels ou sur la durée, de laboratoire ou de terrain, disposant de référentiels nationaux ou non, déjà utilisés par les conseillers ou non. Le principe était d'évaluer le statut biologique du sol dans son ensemble, tant sur la diversité des organismes, que sur leur activité et sur les fonctions associées. Toutes les mesures présentées dans cet article ont été réalisées en 2024 (tableau 3).

Les indicateurs issus de mesures de laboratoire (nématofaune, ADN Microbien, Biomasse Microbienne par fumigation) ont été obtenus sur des aliquotes des mêmes échantillons de sol composites constitués de 10 échantillons élémentaires prélevés sur les 0-20 cm de surface début février 2024. Les mesures ont été réalisées sur les parcelles de « blé précédent colza » de chaque système. Un indicateur d'activité biologique au champs (sachets de thé) et une mesure d'abondance et de type de population, en laboratoire (ADN Microbien) ont aussi été mesurés sur des parcelles de colza

En plus des indicateurs biologiques, une évaluation des fonctions « cycle du carbone » et « maintien de la structure » a été réalisée avec le protocole BIOFUNCTOOL® (Maillant et Munier, 2025).



Tableau 3 : Récapitulatif des mesures effectuées par système et par culture (BMF = Biomasse Microbienne par Fumigation) en 2024

	<i>Communautés lombriciennes</i>	<i>Populations de nématodes</i>	<i>ADN microbien</i>	<i>BMF</i>	<i>Sachets de thé</i>
AC blé	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
OPP blé	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
PIC blé	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
AC colza	Non	Non	Oui	Non	Oui
OPP colza	Non	Non	Oui	Non	Oui
PIC colza	Non	Non	Oui	Non	Oui

3.1. Indicateurs de biodiversité

3.1.1. Communautés lombriciennes

Les communautés lombriciennes ont été quantifiées avec le protocole « Test-bêche » (Université de Rennes, 2023) : Les blocs de terre ont été extraits début mars 2024, dans les conditions de température et d'humidité de sol recommandées par l'Observatoire Participatif des Vers de Terre. 5 blocs (pseudo-réplicats) ont été prélevés par parcelle. Tous les lombriciens extraits ont été fixés dans des flacons d'éthanol à 96%. Au laboratoire, les lombriciens ont été comptés, pesés et identifiés morphologiquement, au stéréomicroscope, au niveau taxonomique (Bouché, 1972). L'abondance et la biomasse lombriciennes ont été rapportées au mètre carré avec un facteur multiplicateur de 25 pour chaque bloc.

3.1.2. La nématofaune

Pour chaque échantillon, les communautés de nématodes ont été analysé selon la norme NF/ISO 23611-4. Entre 150 et 200 nématodes ont été identifiés par échantillon. Après identification, chaque nématode a été assigné à un groupe trophique (bactérovore, fongivore, prédateur, phytophage facultatif, phytoparasite) et à une guildes fonctionnelle en se reportant à Bongers and Bongers., 1998. Ces catégories permettent de définir des indicateurs fonctionnels : Indice de Diversité (Shannon), Indice de Structure (SI), Indice d'Enrichissement (EI) et Indice des Voies de Décomposition (IVD). Les indicateurs sont positionnés dans un Référentiel généré à partir de la base ELIPTO® du laboratoire ELISOL environnement.

3.1.3. Biomasse microbienne par fumigation et par analyse de l'ADN microbien

La mesure (BMF) a été réalisée selon la méthode NF EN ISO 14240-2 modifiée Chaussod en laboratoire, uniquement sur les parcelles en blé précédent colza, avec 3 répétitions pour chaque système.

L'analyse de l'ADN microbien a été réalisée selon les protocoles développés et standardisés par l'INRAE de Dijon, UMR Agroécologie (pour le détail, voir Karimi et al. 2018 et Djemiel et al. 2024). Pour le blé précédent colza, les réplicats choisis sont ceux dont les valeurs de BMF étaient les plus proches (entre 746 et 768mg/kg de BMF alors que l'ensemble de résultats varie de 602 à 826mg/kg). Pour les échantillons de colza, il n'y avait pas de mesures de BMF.

BMF et ADN microbien ont été déterminés sur les échantillons prélevés début février 2024.



3.2. Indicateurs d'activité biologique

3.2.1. Décomposition des Sachets de thé

Le Tea Bag Index (taux de décomposition de sachet de thé) est une méthode permettant d'estimer l'activité biologique in situ (Keuskamp et al., 2013) à partir de la perte de masse de sachets de thé incubés dans le sol pendant trois mois. Deux types de thé sont utilisés : thé vert et rooibos aussi appelé thé rouge. Le thé rouge étant plus récalcitrant que le thé vert, les mesures permettent d'évaluer à la fois la vitesse de décomposition de la matière organique et l'agressivité des organismes vis-à-vis des matières organiques.

5 sachets de chaque type ont été installés dans les bandes de blé de colza et bandes de colza de chacun des trois systèmes à 8cm de profondeur le 5 février et retirés le 2 mai 2024. En fin d'incubation, les sachets ont été pesés, puis leur contenu a été calciné pour quantifier la quantité de terre ayant adhéré aux particules de thé et la déduire du poids final. Des sachets n'ont pu être retrouvés ou ont été déchirés, mais il restait au moins 3 sachets par modalité.

Pendant la période d'incubation des sachets de thé, les trois systèmes ont reçu de la fertilisation azotée et soufrée ainsi qu'un fongicide (sauf sur OPP). Aucun travail du sol n'a été réalisé dans ce laps de temps.

4. Résultats

4.1. Indicateurs de biodiversité

4.1.1. Communautés lombriciennes

L'abondance, la biomasse et la richesse spécifique moyenne de lombriciens ne sont pas significativement différentes entre les 3 systèmes (tableau 4) du fait de fortes variabilités entre les pseudo-replicats et de l'absence de vraies répétitions. Selon le référentiel national de l'Observatoire Participatif des Vers de Terre, l'abondance et la biomasse sont qualifiées de faibles à moyennes. La quasi-totalité de la communauté lombricienne est représentée par les 4 espèces endogées suivantes : *Aporrectodea caliginosa*, *Allolobophora chlorotica*, *Murchieona muldali*, *Allolobophora* sp.

Tableau 4 : Résultats des indicateurs biologiques de sol hors nématofaune mesurés en 2024 dans les trois systèmes

		Blé de colza					Colza				
		PIC	OPP		AC		PIC	OPP		AC	
		Moyenne (ou valeur unique)	Écart- type	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type	Moyenne	Écart- type
Lombriciens	Abondance (nb/m²)	110	107,9	70	18,7	155	111,1				
	Biomasse (g/m²)	33,9	27,3	24,2	5,15	15,9	19,7				
	Richesse spécifique	1,2	0,8	1,2	0,4	2,6	1,0				
Micro-organismes	BM par fumigation (mg/kg)	717	28,6	686	76,7	823	52,4				
	BM/Corganique (%)	2,7	0,2	2,7	0,3	3,1	0,2				
	BM Moléculaire (µg/g)	67,5		77,6		57,4	58,2		62,3		52,5
	Équilibre champignons/bactéries	2,2		2		3	2,6		1,1		2,2

Sachets de thé	Diversité Bactérienne	1891	1771	1865	2000	1635	1741
	Diversité Fongique	1210	1453	1164	1696	985	1064
	Taux de décomposition du thé vert (%)	39,3	1,6 42,2	2 40,2	2,2 42,5	5 48,3	6,2 48,7
	Taux de décomposition du thé rouge (%)	5,7	2,7 12,5	3,5 6,1	3,8 11,6	3,1 20,1	3,6 17,2

4.1.2. Population de nématodes

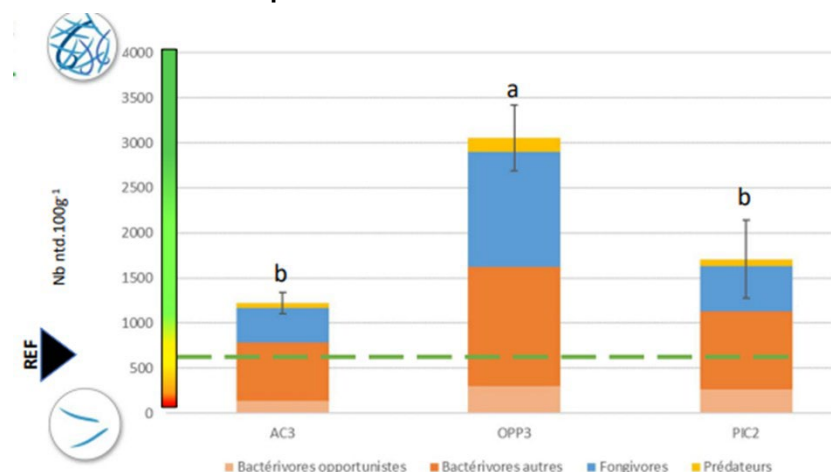


Figure 1 : Abondance des nématodes libres dans les trois systèmes (nb de nématodes / 100g de sol sec).

L'abondance des nématodes libres, indicatrice du niveau d'activité biologique des sols, est forte et satisfaisante pour les 3 modalités, au-dessus du niveau de référence national pour les grandes cultures (Figure 1). Cet indicateur est

significativement plus élevé en OPP. Les nématodes bactérivores et fongivores qui contribuent à la décomposition des matières organiques dominent dans ces communautés et indiquent un recyclage des nutriments dynamique dans ces sols. La population de nématodes prédateurs est plus abondante en OPP, indiquant des régulations biologiques plus fortes dans cette parcelle.

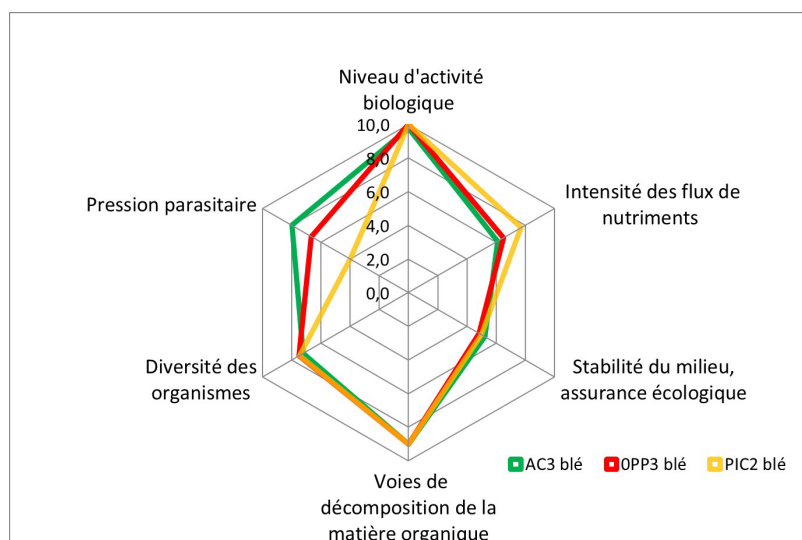


Figure 2 : Les différents indicateurs de l'analyse de la nématofaune du sol en 2024 ; Référentiel ELIPTO® Grandes Cultures.

Les 6 paramètres sont notés sur une échelle de 1 à 10, la note de 10 correspond à la valeur la plus satisfaisante y compris pour la « pression parasitaire ». Un score inférieur à 4 indique l'atteinte d'un seuil critique et le risque de dysfonctionnement, un score égal ou supérieur à 6 correspond à fonctionnement correct par rapport à l'usage du sol.



L'analyse de la nématofaune (figure 2) montre un bon état biologique des sols des trois systèmes de culture, caractérisé par : une très forte activité biologique, des flux de nutriments intenses (PIC) à modérés (AC et OPP), des caractéristiques d'un milieu perturbé à peu stable, générant une assurance écologique réduite (assez faible complexité du réseau trophique), une diversité des organismes satisfaisante, des voies de décomposition équilibrées et un état sanitaire moyen. Les systèmes se différencient essentiellement par rapport à la pression parasitaire (phytoparasites plus abondants dans le système PIC) et au niveau de l'intensité des flux de nutriments (plus intense en PIC).

Il est probable que la combinaison « cultures été et hiver + labour peu fréquent + absence de phytosanitaires » des trois systèmes a été favorable aux nématodes. Les nématicides sensu stricto sont interdits mais d'autres pesticides (fongicides et insecticides notamment) peuvent avoir un effet sur la faune du sol, dont les nématodes (Beaumelle et al., 2023) ou indirectement sur la ressource des nématodes (ex: champignon). L'absence complète de ces traitements dans la modalité OPP a pu participer à cet effet positif sur la nématofaune.

4.1.3. Biomasse Microbienne par Fumigation

Les biomasses microbiennes par fumigation (BMF) varient de 685mg/kg (OPP) à 822 mg/kg (AC). Elle est significativement plus élevée en AC que dans les systèmes PIC et 0 phyto (tableau 4). Ceci peut s'expliquer par les plus fortes restitutions de MO dues aux couverts dans le système AC. On peut noter que la population microbienne a baissé dans les trois systèmes depuis 2017 (967 mg/kg), ce qui peut être dû à l'arrêt des apports de fumier. Ces valeurs sont fortes à très fortes par rapport au référentiel national dans ce contexte pédoclimatique.

4.1.4. L'analyse de l'ADN microbien

Les biomasses microbiennes moléculaires (BMM) varient pour l'ensemble des mesures entre 52 µg/g et 77.6 µg/g (tableau 5), les plus élevées étant en OPP et en PIC. Les biomasses sont en tendance, plus élevées en blé qu'en colza le colza ayant un effet suppressif sur les populations microbiennes. Toutes les valeurs sont considérées comme très faibles par rapport au référentiel national qui prend en compte les caractéristiques du sol, la localisation géographique, l'usage du sol et la teneur en Carbone organique. L'équilibre champignons/bactéries est bon (tableau 4), au regard du référentiel national. La diversité bactérienne varie peu entre les systèmes (tableau 4) tandis que la diversité fongique varie de façon incohérente entre les parcelles (pas de tendance par rapport aux systèmes ni par rapport aux cultures). L'absence de répétition rend difficile l'interprétation de ces résultats.

4.2. Indicateur d'activité : décomposition de sachets de thé

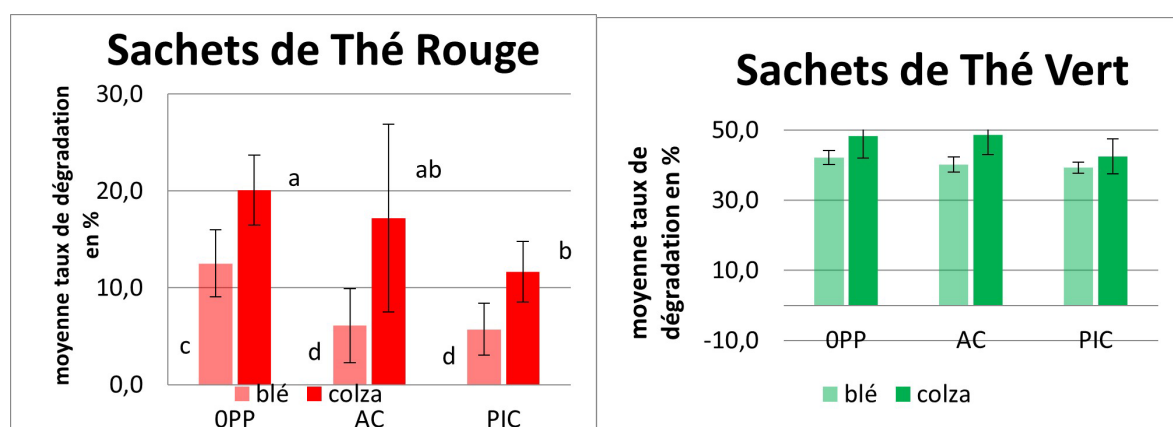


Figure 3a et 3b : Moyenne des taux de dégradation des sachets de thé dans les trois systèmes sous deux cultures



L'activité biologique des systèmes de culture a été évaluée dans deux cultures (blé et colza) pour chaque système. Les litières (thé vert et thé rouge) ont été davantage décomposées dans les parcelles de colza que dans le blé (figures 3a et 3b) mais cet écart n'est significatif que pour le thé rouge : thé rouge 11 à 20 % pour le colza et de 5 à 12 % pour le blé ; thé vert de 42 à 48 % pour le colza et de 39 à 42 % pour le blé)

La décomposition des sachets de thé vert est identique dans les 3 systèmes, même si l'on note une plus faible décomposition dans le système PIC en blé et en colza. La décomposition du thé rouge est significativement plus faible en PIC qu'en OPP, pour le blé et pour le colza. Le taux de décomposition du système AC est similaire à PIC en blé et très variable en colza.

5. Discussion

La publication de Cozim-Melges et al, (2024) fait un bilan de 196 publications étudiant l'effet de différentes pratiques (dont la réduction de produits phytosanitaires) sur quatre taxons : nématodes, vers de terre, bactéries et champignons. Outre le faible nombre de travaux étudiant les comparaisons de pratiques pour l'ensemble des taxons, les auteurs mettent en avant l'hétérogénéité des résultats selon les taxons et selon les contextes. Ils montrent que les pratiques alternatives (en particulier la suppression des produits phytosanitaires) ont généralement un effet positif sur la richesse spécifique et sur l'abondance des groupes fonctionnels des populations bactériennes, de la nématofaune et des lombriciens. La majeure partie des publications analysées montrée une absence d'effet ou un effet positif de la suppression des produits phytosanitaires sur ces quatre taxons mais la suppression de fongicides peut parfois être négatif pour certains organismes.

Les résultats de cette publication rejoignent le bilan de la plateforme en réduction de produits phytosanitaires, où il est difficile de trouver une tendance générale pour tous les taxons et indicateurs étudiés (tableau 5). Cette absence de tendance générale pourrait être due à la persistance de résidus de produits phytosanitaires dans le sol, qui pourraient encore impacter le fonctionnement biologique, mais aussi de différences dans les délais de réponse des différents taxons à la mise en place des systèmes (Froger et al., 2023):

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats tendanciels d'après les moyennes des indicateurs en vert foncé (« ++ ») les valeurs les plus élevées, en vert clair (« - »), les valeurs les plus basses et « ++ » est le niveau intermédiaire. « +++ » est indiqué lorsque le résultat est significatif (Mesure sur Blé)

	Indicateurs	PIC	OPP	AC
Lombriciens	Lombriciens (abondance)	+	-	++
Nématofaune	Nématodes libres (abondance)	+	+++	+
	Nématodes phytoparasites (abondance)	++	+	+
Micro-organismes	BM fumigation (abondance)	+	-	+++
microorganismes	BM moléculaire (abondance)	+	++	-
	Equilibre bactérie/champignon	+	+	++
	Diversité bactérienne	++	-	+
	Diversité fongique	+	++	-
	Taux de décomposition thé rouge	-	+++	+
	Taux de décomposition thé vert	-	++	+



5.1. Des systèmes assez ressemblants

Certains indicateurs montrent très peu de différences (ou des différences non significatives) entre les trois systèmes : communautés lombriciennes, indicateurs fonctionnels de la nématofaune (figure 2), taux de décomposition du thé vert. Ceci peut s'expliquer par la similarité, entre les systèmes, des principales pratiques agissant sur les organismes du sol : gestion des matières organiques (pas d'apports exogènes, exportation partielle des pailles), modalités de fertilisation (exclusivement minérale, différences faibles sur les doses et dates d'apport), travail du sol (majorité des interventions mécaniques sur les 5-7 cm dans tous les systèmes, mais différence sur la présence ou l'absence de labour et sur la fréquence des interventions), composition de la rotation (fréquence des céréales, présence de légumineuses, de colza). Certains indicateurs (lombriciens, nématofaune et populations microbiennes) indiquent un milieu peu stable et peu résilient, générant une assurance écologique modérée (réseau trophique peu complexe), qui peut s'expliquer par des facteurs pénalisants communs aux trois systèmes : prise en masse en raison de la texture argileuse, présence de colza dans les rotations, intensité et fréquence du travail du sol.

Les différences entre les trois systèmes portent d'abord sur la quantité et la fréquence des traitements phytosanitaires. D'après les travaux de Pelosi et al (2013), qui montrent un effet bénéfique de la réduction de produit phytosanitaire sur les communautés de vers de terre, on attendait de plus fortes abondances dans le système OPP.

Cependant le plus grand nombre d'interventions mécaniques couplé à la plus faible biomasse des cultures a probablement impacté de façon négative les communautés lombriciennes dans cette plateforme expérimentale davantage que la réduction de phyto, comme dans Diallo et al (2023).

Dans le contexte pédoclimatique de la plateforme, sur la période d'étude et dans des systèmes avec très peu de PP utilisés, ces indicateurs biologiques (communautés lombriciennes, indicateurs fonctionnels de la nématofaune (figure 2), taux de décomposition du thé vert) n'ont pas été sensibles aux différences entre les systèmes en 2024. Il est important de prendre en compte l'ensemble des pratiques agricoles pour évaluer les effets de la réduction des PP sur les organismes du sol et non le seul prisme de celle-ci..sur le

5.2. Des indicateurs plus sensibles au travail du sol, d'autres plus sensibles aux PP

En termes de santé du sol, plus il y a d'organismes vivants, plus le sol est considéré comme en bonne santé. Les travaux de Cozim-Melges et al, (2024) et de Christel et al, (2022) montrent que les pratiques et systèmes alternatifs (Agriculture Biologique, Biodynamie, Agriculture de conservation) sont généralement plus favorables aux organismes du sol que le système conventionnel, même si les réponses varient, probablement selon les conditions climatiques des prélèvements et selon les pratiques précédant les prélèvements. Puissant et al, (2021) montrent par exemple que c'est l'association des pratiques plus que le mode de production qui influencent l'effet des systèmes de cultures sur la nématofaune.

En 2024, la BMF montre en tendance que le sol le plus favorable est le système AC sans glyphosate (aussi indiqué par des activités enzymatiques NAcetylGlutamate synthase, Phosphatases Acide et alcaline, Aryl Sulfatase, Leucine AminoPeptidase et Carbone réactif « POXC », non présentés). Au contraire, les nématodes libres, la BMM et le taux de décomposition des sachets de thé rouges sont plus élevés en système OPP. Le résultat des sachets de thé est en contradiction avec les résultats obtenus sur des expérimentations long terme en Autriche (Gmach et al., 2024) où le taux de décomposition était plus élevé dans les parcelles recevant le plus de fertilisant azoté et celles en réduction du travail du sol.

. La différence de résultats entre BMF et BMM incite à répéter les mesures de BMM en intraparcellaire pour en vérifier la tendance. La variabilité peut aussi venir des dates d'interventions entre les parcelles



(travail du sol, traitement, fertilisation), mais aussi des stades de développement des cultures qui sont différents selon les systèmes (Résultats non présentés).

L'ensemble de ces résultats semble indiquer que certains indicateurs, dans le contexte de la plateforme, sont plus sensibles à la réduction du travail du sol, tandis que d'autres seraient plus sensibles à l'absence de PP.

5.3. Un effet de la culture

Les sachets de thé montrent une fonction de décomposition des matières organiques plus intense en colza qu'en blé, alors que la BMM montre de plus faibles populations et une plus faible diversité bactérienne en colza. Les mesures d'activité enzymatique n'ont pas montré de différence entre cultures, qui auraient pu expliquer la décomposition des sachets de thé. Soit les populations présentes dans le colza sont plus actives, soit elles ont tiré bénéfice des conditions température/humidité et des pratiques en s'activant après le prélèvement des échantillons de BMM et BMF (réalisé avant l'incubation des sachets).

5.4. Un bilan mitigé en comparaison des référentiels nationaux

Tableau 6 : Positionnement de quelques indicateurs dans les référentiels MICROBIOTERRE (Riah-Anglet et al, 2022), ELIPTO® OPVT et RMQS

Référentiel	Indicateur	PIC blé de colza	PIC colza	AC sans glypho blé de colza	AC sans glypho colza	OPP blé de colza	OPP colza
Microbioterre	Teneur en Carbone organique (g/100g)	Très élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé
	BMF	Très élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé
	LAP (nmol/min/g)	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible
	Beta-Glucosidase (nmol/min/g)	Moyen	Faible	Moyen	Faible	Très faible	Très faible
ELIPTO®	Nematode libres	satisfaisant		satisfaisant		satisfaisant	
	Diversité nématode	satisfaisant		satisfaisant		satisfaisant	
	Flux de nutriment	satisfaisant		Moyen		Moyen	
	Assurance écologique	Moyen		Moyen		Moyen	
	Pression parasitaire	Moyen		satisfaisante		satisfaisante	
OPVT (Observatoire Participatif des Vers de Terre)	Abondance/biomasse	faible		moyenne		faible	
	Diversité taxonomique	faible		faible		faible	
	Diversité fonctionnelle	faible		moyenne		faible	
RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des sols)	BMM	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible
	Richesse Bactérienne	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
	Richesse Fongique	faible	Moyen	faible	faible	Moyen	faible



ratio champignons/bacté- ries	équilibré	équilibré	équilibré	équilibré	équilibré	moyen
-------------------------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------

Le tableau 6 positionne les résultats dans des référentiels nationaux. Pour 6 indicateurs, ces référentiels permettent de distinguer les performances des 3 systèmes. Les indicateurs de la nématofaune et la BMF montrent que les systèmes sont assez, voire très satisfaisants (tableau 6), avec des organismes nombreux et actifs (Les référentiels de ces indicateurs prennent en compte les pratiques et la texture du sol. En revanche, lorsque l'on rapporte la population microbienne à la quantité de carbone présent (ratio BMF/Carbone organique (Tableau 4) et référentiel RMQS de l'ADN microbien), les performances ne sont pas si bonnes. Ceci pourrait indiquer la présence d'une contrainte commune aux trois systèmes (manque de couverts, travail du sol, absence d'apports organiques et/ou au contexte pédoclimatique (texture très argileuse, faible réserve en eau du fait de la faible profondeur et de la teneur en cailloux) qui freinerait le développement de ces populations.

Ce bilan mitigé sur le plan de l'activité biologique du sol peut être mis en regard des indicateurs agronomique, technico-économique et socio-économique : globalement, l'enherbement a été bien maîtrisé dans les systèmes avec utilisation de PP, un peu moins en système zéro phyto (sans dégrader le salissement des parcelles à long terme). Les autres bioagresseurs (maladies, insectes) ont été très peu préjudiciables quel que soit le système testé. Les rendements ont enregistré des pertes limitées (entre -7 et -16%), mais les marges brutes sont en retrait de 20-30% en comparaison des références locales. Cela s'explique notamment par davantage de cultures "à risque" et/ou à plus faible valeur ajoutée, mais aussi à l'apprentissage des expérimentateurs pour maîtriser les nouvelles pratiques (publications disponibles sur le portail Ecophytopic et sur le site de la Chambre d'Agriculture Régionale Grand Est). Les résultats de cette étude sur la santé des sols semblent indiquer que dans ce contexte, aucun des trois systèmes n'a été complètement préjudiciable et que les pratiques testées peuvent être prolongées sans risque majeur pour les organismes du sol.

6. Conclusion

Les résultats présentés ont la double originalité de regrouper plusieurs taxons (nématodes, lombriciens, bactéries et champignons) et d'étudier leur réponse dans des systèmes avec très faible utilisation de produits phytosanitaires. Les résultats montrent une diversité de réponses selon les indicateurs. Il ne semble qu'aucun des systèmes ne soit très mauvais ou très bon. Le peu de différences significatives entre les résultats montre que dans le contexte de cette plateforme les différents systèmes (notamment l'absence totale de produits phytosanitaires et l'absence de labour) n'ont pas eu d'impact significatif sur la santé du sol. Dans cette temporalité, les caractéristiques communes aux systèmes, le pédoclimat et parfois la culture impactent davantage les organismes du sol que l'utilisation des produits phytosanitaires, déjà très faible dans les systèmes PIC et AC qui en utilisent. Il serait intéressant de reconduire ces mesures sur des temps de différenciation plus long, ou dans d'autres pédo-climats pour confirmer ou infirmer la faible sensibilité de ces indicateurs dans ces systèmes.

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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



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

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

Contributions des auteurs

Sophie MAILLANT : conceptualisation, recherche, version originale. **Clément MUNIER** : conceptualisation, recherche, version originale. **Nathael LECLECH** : obtention du financement, administration du projet. **Camille CHAUVIN** : recherche, révisions et corrections. **Sarah GUILLOCHEAU** : recherche, révisions et corrections. **Battle KARIMI** : recherche, révisions et corrections. **Latounde MOYEDE** : visualisation, **Marie-Noelle PONS** : fournitures de ressources, révisions et corrections.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient les laboratoires qui ont réalisé les analyses biologiques pour leurs réflexions et échanges sur les résultats de cet article.

Déclaration de soutien financier

Les travaux ont bénéficié principalement du soutien financier de l'AERM, du programme ECOPHYTO, ainsi que de l'ADEME et la Région Grand Est dans le programme ACSE (Air Climat Sol Energie) 2023-2025, et de l'INRAe pour les analyses d'ADN microbien.

Références bibliographiques

Agreste 2017 : <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2009/detail/>

Beaumelle, L., Tison, L., Eisenhauer, N., Hines, J., Malladi, S., Pelosi, C., Phillips, H. R. 2023. Pesticide effects on soil fauna communities—A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 60(7), 1239-1253.

Bongers, T. & Bongers, M. 1998. Functional diversity of nematodes. *Applied soil ecology*, 10(3), 239-251.

Bouché, M. B. 1972. Lombriciens de France. *Ecologie et systématique* (Vol. 72, No. HS, pp. 671-p). Inra Editions.

Christel A., Maron P.-A. et L. Ranjard L., 2022 - Méta-analyse sur l'impact des modes de production agricole sur la qualité écologique du sol - *Étude et Gestion des Sols*, 29, 117-144

Cousin I., Desrousseaux M., Angers D., Augusto L., Ay JS. 2025 Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude. 780 p. INRAE

Cozim-Melges F., Ripoll-Bosch R., Oggiano P., van Zanten H. van der Putten W., Veen G. 2024, The effect of alternative agricultural practices on soil biodiversity of bacteria, fungi, nematodes and earthworms: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol 379

Diallo, A., Hoeffner, K., Guillocheau, S., Sorgniard, P., & Cluzeau, D. 2023. Combined effects of annual crop agricultural practices on earthworm communities. *Applied Soil Ecology*, 192, 105073.

Djemiel C., Terrat S., Dequiedt S., Jolivet C., Maron PA., Ranjard L. 2024 Atlas français des champignons du sol. Biotope, Mèze, MNHN, Paris, 304p

Froger, C., Jolivet, C., Budzinski, H., Pierdet, M., Caria, G., Saby, N. P., Bispo, A. 2023. Pesticide residues in French soils: occurrence, risks, and persistence. *Environmental Science & Technology*, 57(20), 7818-7827



Ecophyto PRO, 2024. https://www.ecophyto-pro.fr/actualites/lire/1012/pollution_des_eaux_de_surface_et_des_nappes_phreatiques_par_les_engrais_et_les_pesticides_l_agence_europeenne_de_l_environnement_publie_un_rapport_sur_l_etat_de_l_eau_en_europe/n:201

EEA 2024. Europe's state of water. 2024: the need for improved water resilience; EN PDF: TH-AL-24-008-EN-N - ISBN: 978-92-9480-653-6 - ISSN: 1977-8449 - doi: 10.2800/02236

Gmach, M. R., Bolinder, M. A., Menichetti, L., Kätterer, T., Spiegel, H., Åkesson, O., Friedel, J. K., Surböck, A., Schweinzer, A., and Sandén, T.: Evaluating the Tea Bag Index approach for different management practices in agroecosystems using long-term field experiments in Austria and Sweden, *SOIL*, 10, 407–423, <https://doi.org/10.5194/soil-10-407-2024>, 2024

Karimi B., Chemidlin Prévost—Bouré N., Dequiedt S., Terrat S., Ranjard L., 2018. Atlas français des bactéries du sol, Biotope, Mèze, MNHN, Paris, 192p

Keuskamp J., Dingemans B., Lehtinen T., Sarneel J., Hefting M. 2013. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*

Lehmann J., Bossio D., Kogel-Knaber I., Rillig M., 2020. The concept and future prospects for soil health. *Nat Rev Earth & Environ.* 1(10) 544-553

Maillant S., Munier C. 2025. Poster JES

Ministère de l'Aménagement du territoire et de la transition écologique, 2022. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-pollution-des-eaux-superficielles-et-souterraines-en-france-synthese-des-connaissances-en-2021>

Pelosi C, Toutous L., Chiron F, Dubs F, Hedde M, Muratet A, Ponge JF, Salmon S, Makowski D. 2013 Reduction of pesticide use can increase earthworm populations in wheat crops in a European temperate region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol 181.

Puissant, J., Villenave, C., Chauvin, C., Plassard, C., Blanchart, E., Trap, J. 2021. Quantification of the global impact of agricultural practices on soil nematodes: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 2021.108383. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108383>

Riah-Anglet W, Laurent N; Cusset E. Tscheiller R. 2022 ; Référencer des indicateurs de microbiologie des sols et les intégrer dans l'analyse de terre de routine, pour améliorer la gestion des restitutions organiques dans les systèmes de grandes cultures et polyculture élevage 2017-2021 Analyse de la sensibilité et de la pertinence des indicateurs vis-à-vis des fonctions.

Richelle, L., Brauman A. 2023 La santé des sols : une approche holistique et transdisciplinaire. Dans "science de la durabilité. Comprendre, co-construire, transformer, vol 2. IRD2023. pp70-73

Université de Rennes, 2023. <https://projets.ecobio.univ-rennes.fr/opvt/testb%C3%A0Acheversdeterre>

Pour citer cet article : Sophie Maillant, Clément Munier, Nathael Leclech, Camille Chauvin, Sarah Guillocheau, et al.. Little impact of farming practices on soil organisms within systems using very little pesticides.. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.151-164. [10.17180/ciag-2026-vol109-art12](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Systèmes de culture agroécologiques légumiers incluant la carotte, économiquement viables et économes en produits phytosanitaires

Emilie Casteil¹, Laëtitia Briache³, Corentin Chateau⁴, Olivier Favaron³, Gwénaëlle Le Bihan⁵,
Ludivine Quinet⁵, Franck Vial⁵, Vincent Faloya²

¹ Association Carottes de France, MIN de Brienne, 110 quai de Paludate, 33800 Bordeaux ; France

² INRAE, UMR1349 IGEPP, 35653 Le Rheu ; France

³ UNILET, Rue de l'alliance, 40160 Ychoux ; France

⁴ INVENIO, Rue de l'alliance, 40160 Ychoux ; France

⁵ SILEBAN, 19 route de Cherbourg, 50760 Gatteville-Phare ; France

Correspondance : emilie.casteil@carottes-de-france.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art13>

Résumé

Le projet AlterCarot visait à concevoir, tester et évaluer des systèmes de culture légumiers (nommés par la suite « systèmes ») incluant la carotte, économiquement viables et n'utilisant les produits phytosanitaires qu'en ultime recours. Les objectifs étaient (1) de réduire l'indice de traitement phytosanitaire (IFT) d'*a minima* 60 % sur l'ensemble des systèmes testés, et sur la carotte et le haricot vert en particulier ; (2) d'anticiper les retraits de substances actives à court et moyen termes. De 2019 à 2024, cinq systèmes innovants ont été expérimentés dans les deux principaux bassins de production français de carotte, mobilisant 88 règles de décision (RdD) combinant divers leviers agronomiques. Deux systèmes ont atteint, voire dépassé les objectifs de baisse d'IFT (jusqu'à 71 %). Néanmoins, l'absence de leviers suffisamment efficaces contre certains bioagresseurs s'est accompagnée d'une forte prise de risque, impactant significativement les résultats agronomiques et économiques des systèmes. Le projet souligne les progrès encore nécessaires, en particulier en matière de recherche et d'expérimentation, et met en avant l'importance de capitaliser les acquis et de faciliter le transfert des RdD pour atteindre des systèmes économiquement viables.

Mots-clés : IFT, règles de décision, système de culture, légumes, carotte, haricot vert

Abstract: Agroecological vegetable farming systems, including carrot, economically viable and use fewer plant protection products

The AlterCarot project aimed to design, test, and evaluate economically viable vegetable cropping systems—including carrot cultivation—with the use of plant protection products only as a last resort. The objectives were: (1) to reduce the Treatment Frequency Index (TFI) by at least 60 % across all tested cropping systems, particularly for carrot and green bean; and (2) to anticipate the short- and medium-term withdrawal of active substances. From 2019 to 2024, five innovative cropping systems were tested in the two main carrot-producing regions in France, applying 88 decision rules combining various agronomic levers. Two systems achieved or even exceeded the TFI reduction targets (up to 71 %). However, the lack of sufficiently effective alternatives for certain pests led to increased risk-taking, significantly impacting agronomic and economic outcomes. The project highlights the progress still needed—especially in research and experimentation—and emphasizes the importance of building on achievements and facilitating the transfer of decision rules.

Keywords: TFI, decision rules, cropping system, vegetable, carrot, green bean



1. Introduction

L'évolution des attentes sociétales depuis le début des années 2000 a conduit au renforcement de la réglementation européenne et nationale pour limiter le recours aux pesticides et en réduire les impacts. En France, le plan national **ECOPHYTO II+** s'est fixé un objectif ambitieux visant à promouvoir des changements de pratiques visant à diminuer de 50 % l'usage des pesticides d'ici 2025. Pour y parvenir, un réseau d'expérimentation, **DEPHY Expé**, conçoit, teste et évalue des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires.

Toutefois, les producteurs de légumes de plein champ font face à un défi majeur : concilier les exigences des législateurs et la demande des consommateurs pour une réduction importante de l'utilisation des pesticides tout en proposant des produits sans défaut visuel, avec une bonne tenue sur les points de vente et à un prix accessible. Cette exigence est particulièrement forte pour les légumes lavés, comme les carottes, où la moindre trace de parasite ou d'altération due aux bioagresseurs est immédiatement visible et peut entraîner le rejet du produit.

La France produit 629 626 tonnes de carottes, dont 61 % sont destinées au marché du frais sur 10 539 hectares (Agreste, 2023). À l'échelle européenne, elle se classe **deuxième productrice** après l'Allemagne (Eurostat, 2023). Les principales régions productrices pour le marché du frais sont la **Nouvelle-Aquitaine** (47 % de la production nationale) et la **Normandie** (17 %). Chacune a structuré une véritable filière, intégrant l'ensemble de la chaîne, de la production à la commercialisation. La carotte y occupe une place centrale au sein des productions régionales et du fonctionnement des exploitations.

Concernant les légumes destinés à la conserve et au surgelé, la France est le 1^{er} producteur européen de haricots et de pois, 1^{er} fabricant de légumes en conserve et 4^{ème} fabricant de légumes surgelés (Eurostat, 2018). La filière est composée de 24 usines et 16 Organisations de Producteurs représentant 4 500 agriculteurs. En 2024, 23 887 ha de haricot ont été implantés en France (Cenaldi, 2024), dont 45 % dans le Sud-Ouest.

Le projet AlterCarot (2019-2024), mené dans le cadre du réseau **DEPHY Expé** et porté par **Carottes de France** en collaboration avec **INRAE**, **INVENIO**, **SILEBAN** et **UNILET**, vise une **réduction de 60 % de l'Indicateur de Fréquence des Traitements phytosanitaires (IFT)**, en référence aux enquêtes « Pratiques culturales » d'Agreste et de l'Unilet. Cette diminution concerne **tous les pesticides** (herbicides, fongicides, insecticides et nématicides) et s'applique à **l'ensemble du système de culture** ainsi qu'aux cultures de carotte et haricot. Au-delà de sa contribution aux objectifs du plan Ecophyto, AlterCarot répond à un défi crucial : assurer la pérennité des exploitations légumières. En effet, les récentes interdictions de substances actives fragilisent la production et créent des impasses techniques susceptibles de mettre en péril la pérennité des exploitations. Pour anticiper ce risque, les produits phytosanitaires menacés de retrait ou de fortes restrictions d'usage sont exclus ou limités dans le projet.

2. Matériel et méthodes

2.1. Le réseau d'expérimentation

Un réseau d'expérimentation a été mis en place en Nouvelle-Aquitaine et en Normandie ; les deux principales régions de production de carottes destinées au marché du frais en France (figure 1).

2.1.1. Les expérimentations en Nouvelle-Aquitaine

En **Nouvelle-Aquitaine**, trois systèmes de culture ont été testés : ECO3PAP, ECO3B4 et ECO3E3 (voir figure 2). Cette région présente une relative homogénéité sur le plan des conditions pédoclimatiques et des systèmes de culture. Son climat océanique se caractérise par une tendance à la sécheresse

estivale, nécessitant l'irrigation des cultures d'été, comme la carotte. Les sols sont constitués de sables humifères acides, riches en matière organique (M.O.) (2,5 à 3 % de M.O., pH 6). Leur drainage naturel efficace permet un travail du sol toute l'année, offrant ainsi une grande souplesse dans la conduite des cultures.

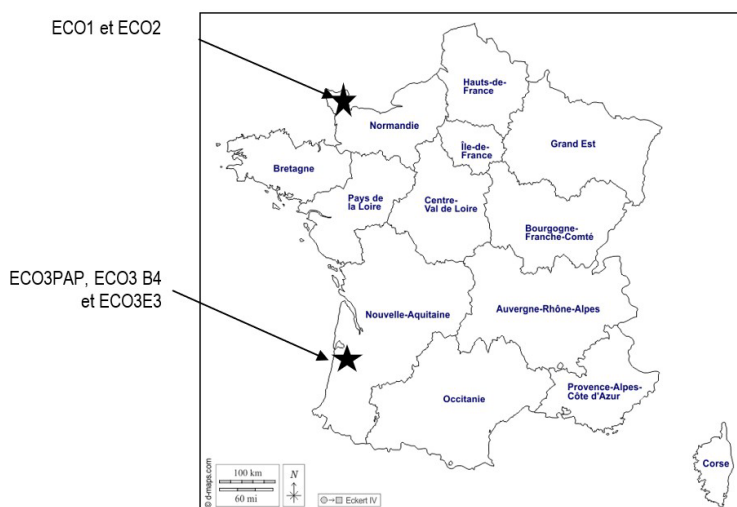


Figure 1 : Localisation des expérimentations

Les exploitations sont de grande taille (environ 600 ha) avec de très grandes parcelles agricoles de 20 ha en moyenne. La gestion des cultures, y compris celle des carottes et des haricots verts, est fortement mécanisée. Les carottes sont cultivées en rotation (une carotte tous les 5 ou 6 ans), en alternance avec du maïs grain, du maïs semence et d'autres légumes sous contrat pour l'industrie (haricots ou

maïs doux). Généralement, deux cultures de carottes se succèdent : une carotte primeur récoltée de mai à juillet, suivie d'une carotte d'automne ou d'hiver récoltée d'août à fin mars de l'année suivante et pouvant être conservée au champ. Les producteurs possèdent souvent leur propre usine de conditionnement, leur permettant de maîtriser l'ensemble de la chaîne de production. Les cultures de légumes destinés à la transformation sont contractualisées entre l'agriculteur et un industriel. La majorité des parcelles accueille une double culture de légume sur l'année : pois / maïs doux, pois / haricot ou double haricot.

En Nouvelle-Aquitaine, les expérimentations ont été implantées sur 1 ha d'une parcelle plus grande (environ 30 ha) exploitée par un producteur. La succession culturale comprenait une double culture de carottes, du maïs grain, maïs ensilage, maïs semence, une double culture de haricots verts et éventuellement du poireau ou de la pomme de terre.

2.1.2. Les expérimentations en Normandie

Deux systèmes de culture, ECO1 et ECO2 (voir tableau 1) ont été conduits en Normandie et plus particulièrement dans le Val de Saire. Cette région se caractérise par un climat océanique tempéré doux, avec un risque de gel quasi inexistant. Les sols sont sablo-limoneux, basiques et relativement pauvres en matière organique (suivant les secteurs, pH entre 6,5 et 8 et M.O. entre 1 % et 2 %). Bien qu'ils soient relativement drainants, ils sont sensibles à la battance et au compactage, ce qui peut entraîner une stagnation de l'eau en hiver et au printemps et limiter certaines cultures sur ces périodes. Cette région est un bassin majeur de production légumière, notamment pour les carottes destinées au marché du frais. Les récoltes s'étalent de septembre à fin avril de l'année suivante, avec une forte proportion de légumes conservés en champ durant l'hiver. Les systèmes locaux s'articulent autour de quatre cultures légumières principales (carotte, poireau, choux, laitue), ainsi que de céréales à paille et de maïs grain. D'autres cultures sont également présentes, comme le navet, la pomme de terre, le céleri-branché, les jeunes pousses, la mâche et le persil.

Les expérimentations ont été menées sur des parcelles d'environ 600 m², au sein de la station expérimentale du SILEBAN. La rotation culturale inclut carotte, maïs ensilage, poireau, chou-fleur et blé ou sorgho. Les deux systèmes de culture, ECO1 et ECO2, ont été répétés trois fois avec un décalage temporel afin de limiter l'effet année. Leurs objectifs étaient distincts : ECO1 était principalement orienté vers la gestion des adventices avec mobilisation des herbicides en dernier recours ; le système ECO2



donnait la priorité à la gestion des ravageurs du sol avec utilisation des insecticides/fongicides en dernier recours.

Tableau 1 : Caractéristiques des cinq systèmes étudiés¹⁵

	ECO1	ECO2	ECO3E3	ECO3B4	ECO3PAP
Bassin de production	Normandie	Normandie	Aquitaine	Aquitaine	Aquitaine
Localisation	Station d'expérimentation	Station d'expérimentation	Producteur	Producteur	Producteur
Rotation	Maïs < Blé < Carotte < Chou-fleur < Poireau	Sorgho < Carotte < Maïs < Poireau < Orge < Chou-fleur	Haricot vert < Maïs semence < Pomme de terre < Maïs semence < Maïs semence < 2 x Carotte	2 x Carotte < Maïs semence < 2 x Haricot vert < Orge < Maïs semence	Maïs doux < 2 x Carotte < Pois < 2 x Haricot vert
Priorité	Gestion des adventices	Bioagresseurs du sol	Tous bioagresseurs	Tous bioagresseurs	Tous bioagresseurs
Répétitions	Trois	Trois	/	/	/
Référence	A dire d'expert	A dire d'expert	Producteur	Producteur	Producteur

2.1.3. Les principaux bioagresseurs rencontrés sur les deux bassins de production

Les principales problématiques techniques rencontrées en production de carotte sur ces deux bassins de production sont la gestion des adventices (*Chenopodium album* L., *Datura stramonium* L., *Digitaria sanguinalis* L., *Matricaria chamomilla* L., *Poa annua* L., *Portulaca oleracea* L., *Senecio vulgaris* L., *Solanum nigrum* L. et *Stellaria media* (L.) Vill.), la mouche de la carotte (*Psila rosae* F.), les nématodes et les champignons du sol (*Pythium* spp., *Phytophthora* spp., *Rhizoctonia solani* Kühn, et *Rhizoctonia violacea* Tul. & Tul.). En culture de légumes destinés à la conserve et au surgelé, les deux problématiques principales dans le bassin Sud-Ouest sont le désherbage, notamment la gestion des adventices toxiques (*Datura stramonium* L., et *Solanum nigrum* L.) qui est un enjeu de santé publique, ainsi que la gestion des chenilles phytophages *Helicoverpa armigera*.

2.2. Formalisation des systèmes de culture et rédaction de règles de décision

Face aux nouvelles préoccupations sociétales, l'expérimentation de systèmes de culture constitue un outil essentiel pour relever les défis du développement durable (Deytieux et al., 2012). Ce type d'expérimentation vise à tester un ensemble de stratégies et de techniques, combinées de manière cohérente, afin d'atteindre des objectifs agroécologiques, économiques et sociaux. Selon Sebillotte (1990), un système de culture se définit comme « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une ou plusieurs parcelles conduites de manière identique au fil des années ». Il se caractérise par la nature des cultures, leur succession, les itinéraires techniques appliqués et par certains éléments structurants (matériel végétal, densité, équipements spécifiques, etc.) (Havard et al., 2017).

Dans le cadre du projet **AlterCarot**, la première étape a consisté à **formaliser les systèmes de culture** en définissant : leurs objectifs hiérarchisés et leurs contraintes, les cultures et leurs successions, les principaux bioagresseurs, les techniques culturales (leviers) à mobiliser et les indicateurs d'évaluation des systèmes. Pour cela, plusieurs ateliers ont été organisés : un atelier national axé sur la production de carottes et plusieurs ateliers régionaux centrés sur une culture de la rotation. Ces ateliers ont réuni partenaires du projet, producteurs, techniciens, chercheurs et experts.

¹⁵ Plus de précisions disponibles sur le site EcophytoPIC : <https://ecophytopic.fr/dephy/conception-de-systeme-de-culture/projet-altercarot>



L'animation a été confiée à un facilitateur externe, garantissant prise de recul et optimisation des échanges.

La seconde étape a consisté à rédiger des règles de décision (RdD) pour chaque couple bioagresseur/culture. Ces règles établissent des liens logiques entre une technique et les pratiques qu'elle génère, dans un contexte donné, afin d'atteindre un résultat souhaité. Elles constituent un outil de pilotage des systèmes (Plénet et Simon, 2015). Pour les expérimentateurs, ces règles sont un support précieux pour le transfert des résultats et l'application des techniques issues de la recherche aux pratiques opérationnelles. Elles créent un pont entre l'agriculture, le conseil et la recherche (Meynard, 2012). La formalisation des RdD de manière opérationnelle repose sur trois composantes :

- la finalité (« Pour quoi faire ? ») en lien avec les objectifs et les contraintes du système de culture ;
- le processus décisionnel (« Comment faire ? ») sous forme conditionnelle avec une succession de « si..., alors..., sinon... ; si non..., alors..., sinon... » ;
- l'évaluation (« l'avons-nous fait ? », « avons-nous obtenu le résultat attendu ? ») nécessitant des attentes précisées, si possible chiffrées, afin de valider l'atteinte des attentes (Paugam, 2018).

Dans le cadre du projet AlterCarot, les RdD ont été formalisées sous deux formes : graphique et textuelle. Dans les deux cas, la structuration est identique, avec une formulation claire et détaillée des exigences en matière de maîtrise des bioagresseurs (par exemple, « Maximum 2 % de carottes avec des dégâts de larves »). Cette précision permet aux partenaires du projet d'ajuster les leviers mobilisés et la prise de risque en fonction des exigences attendues, et d'évaluer au mieux l'efficacité de la règle de décision. Tout au long du cycle cultural, plusieurs types d'interventions peuvent être définis : systématiques (par exemple : « placement d'un répulsif entre le stade deux feuilles et la mi-juillet ») ou conditionnées par l'observation (« si des mouches sont piégées pendant deux semaines consécutives, alors appliquer un insecticide »). L'application de ces règles est systématiquement contrôlée en fin d'année et peut aboutir, si nécessaire, à des modifications pour l'année suivante.

2.3. Evaluation des règles de décision

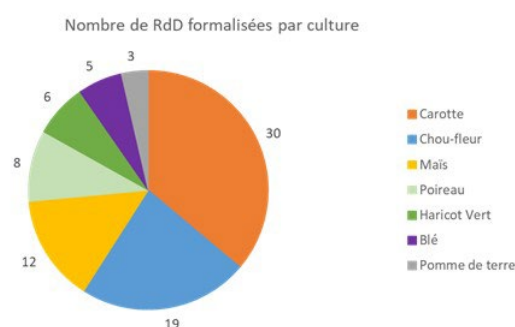
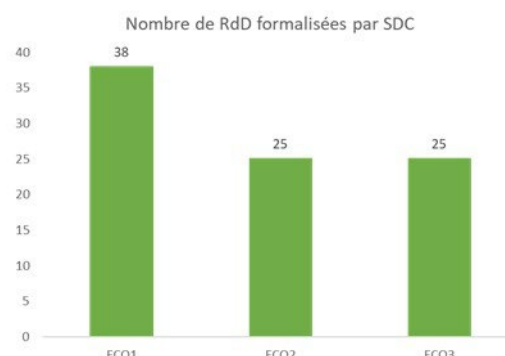


Figure 3 : Nombre de RdD formalisées par système.

À l'issue du projet, le *corpus* de règles de décision constitue le principal livrable. Les plus pertinentes seront transférées aux conseillers, techniciens et producteurs, garantissant ainsi un impact direct sur les pratiques agricoles. Pour ce faire, une méthode d'évaluation originale a été créée (Affian, 2022). Celle-ci

En tout, 88 règles de décision ont été formalisées, dont 30 sur culture de carotte et 6 sur culture de haricot vert (voir figures 2 et 3).

Figure 2 : Nombre de RdD formalisées par culture.





repose sur 7 critères (voir figure 4) évalués dans l'ordre suivant :

1. **Claire** : la RdD est suffisamment explicite pour être appliquée par une personne extérieure au projet.
2. **Cohérente** : absence de contradictions entre interventions ou observations demandées par la RdD.
3. **Applicable** : la RdD a pu être mise en œuvre dans les conditions prévues initialement.
4. **Stable** : la RdD, après application, n'a pas fait l'objet de changements conséquents.
5. **Réalisable** : la RdD nécessite des ressources facilement mobilisables.
6. **Efficace** : la RdD permet l'atteinte des attentes.
7. **Pérenne** : la RdD est peu ou pas susceptible d'être perturbée par des changements externes au système (réglementation, coût de l'énergie/des intrants, difficultés de recrutement...).

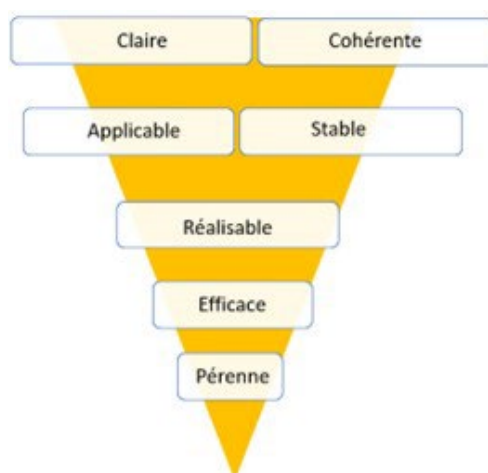
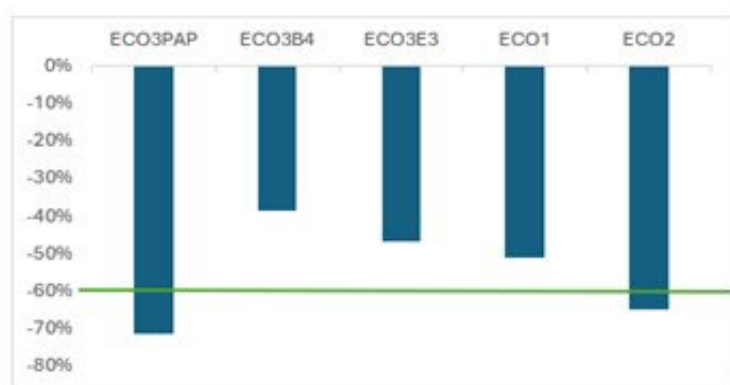


Figure 4 : Critères d'évaluation des RdD.

3. Résultats et discussions

3.1. Réduction de l'IFT

AlterCarot visait, sur les systèmes testés, une réduction de 60 % de l'IFT total hors biocontrôle, par rapport aux dernières enquêtes « Pratiques culturales » d'Agreste et Unilet, sur l'ensemble du système avec un focus sur les cultures de carotte et haricot vert.



Parmi les cinq systèmes étudiés (Figure 5), ECO3PAP et ECO2 ont dépassé cet objectif, enregistrant des baisses respectives de 71 % et 65 %. Les autres systèmes ont également montré des réductions significatives, bien que restant en deçà de l'objectif (38 % pour ECO3B4, 47 % pour ECO3E3 et 51 % pour ECO1).

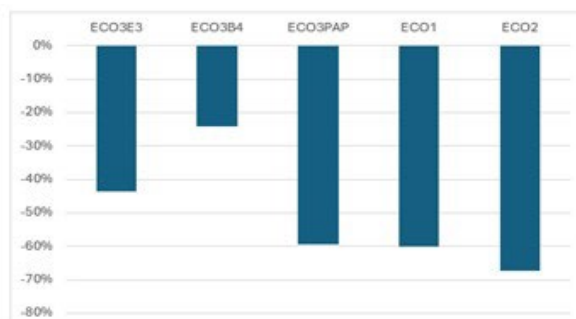
Figure 5 : Baisse d'IFT total sur les systèmes testés

En Nouvelle-Aquitaine, la réduction d'IFT a été particulièrement marquée pour les fongicides et insecticides (figure 6) par rapport aux herbicides.

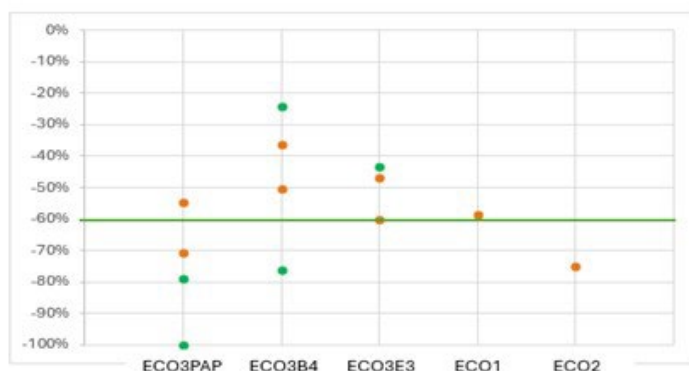
Cette différence s'explique par le manque de leviers efficaces pour contrôler l'enherbement sur le rang dans les cultures denses (carotte et haricot) et à développement lent (carotte).

En Normandie, la forte diminution d'IFT herbicide s'est accompagnée d'une prise de risque importante, nécessitant une compensation par un recours intensif au sarclage manuel, difficile à soutenir à long terme et sur la totalité d'une exploitation agricole.

Figure 6 : Baisse d'IFT herbicide sur les systèmes testés



L'objectif de réduction de 60 % a été pleinement atteint sur trois des huit cultures de carotte expérimentées : la carotte primeur d'ECO3PAP ainsi que les carottes de saison d'ECO3E3 et ECO2.



De même, trois des cinq cultures de haricot vert ont atteint cet objectif (voir Figure 7). Deux autres cultures de carotte se rapprochent fortement de la cible, avec des réductions de 58,7 % pour ECO1 et de 54,8 % pour la carotte de saison d'ECO3PAP.

Figure 7 : Baisse d'IFT sur les cultures de carotte et haricot vert

En revanche, l'IFT des cultures de carotte d'ECO3B4 a été impacté négativement par une forte pression fongique (*alternaria* et *oïdium*) ainsi que par des attaques de chenilles phytophages sur la période primeur. À cela s'est ajoutée une erreur de communication avec le producteur concernant la carotte de saison, entraînant l'application non prévue d'un insecticide ciblant la mouche de la carotte.

Les secondes cultures de haricot vert d'ECO3B4 et ECO3E3 ont été pénalisées par une forte infestation d'adventices (notamment morelle et graminées), nécessitant plusieurs traitements herbicides. Le haricot d'ECO3E3 a également subi une forte pression de noctuelles défoliatrices.

3.2. Anticipation des retraits de substances actives

AlterCarot visait à anticiper les futurs retraits de substances actives en classant celles autorisées sur les cultures concernées en trois catégories : rouge - substances susceptibles de disparaître à court terme, interdites dans le cadre du projet ; jaune - substances menacées à moyen terme, dont l'usage devait être limité ; verte - substances sans restriction supplémentaire au-delà de la réglementation en vigueur. Sur l'ensemble des six années d'expérimentation (figure 8), entre une et sept substances actives rouges ont néanmoins été utilisées dans les systèmes de culture testés. Cela s'explique par : l'absence d'alternative viable, notamment pour le traitement des semences ; des conditions sanitaires rendant indispensables l'usage d'une substance rouge (ex. traitement fongicide après des dégâts de grêle ou forte pression d'*Héliothis* sur haricot vert) ; des erreurs de communication avec les producteurs.

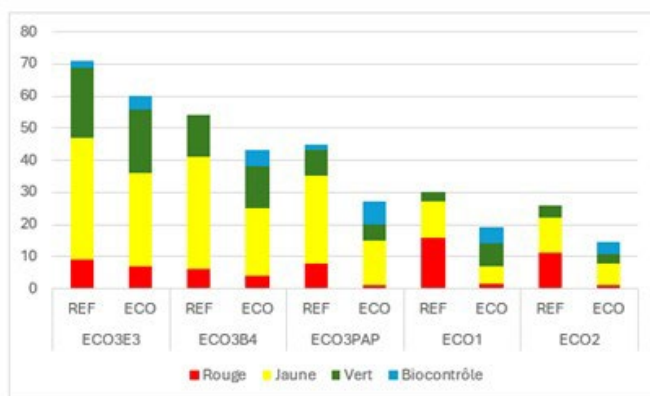


Figure 8 : Utilisation des substances actives selon leur classement

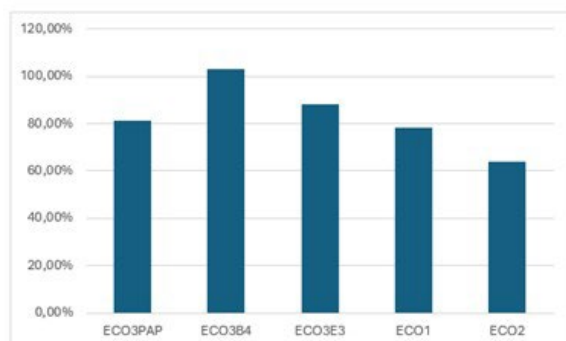
La réduction des substances jaunes utilisées est significative, avec une baisse comprise entre 24 % (ECO3E3) et 48 % (ECO3PAP et ECO1) par rapport à la référence. Par ailleurs, l'emploi de produits de biocontrôle a fortement progressé dans les systèmes testés (4 à 7 substances actives par système) par rapport à la référence (0 à 2 substances actives). Ces

produits étaient principalement des micro-organismes (*Trichoderma* sp., *Bacillus* sp., *Coniothyrium* sp.) utilisés pour lutter contre les bioagresseurs aériens et telluriques.

3.3. Impact des baisses d'IFT sur les performances agronomiques

3.3.1. Impact sur les rendements

Les rendements obtenus varient fortement selon les systèmes et les répétitions. Ils sont comparés à un rendement de référence, défini par bassin de production et par culture, à partir des parcelles de référence (ECO3E3, ECOB4 et ECO3PAP) ou à dire d'expert (ECO1 et ECO2). Toutefois, une tendance générale à la baisse du rendement cumulé est observée sur la majorité des systèmes (Figure 10), excepté ECO3B4, avec des niveaux de production allant de 88 % à 64 % du rendement de référence. Cette diminution est principalement due à une maîtrise insuffisante des bioagresseurs, pouvant conduire à des pertes totales.



Par exemple, la première culture de haricot vert d'ECO3PAP n'a pas pu être récoltée en raison d'une attaque sévère d'*Héliothis*, non maîtrisée malgré les leviers mobilisés (monitoring, observations et applications de biocontrôle...) ; deux cultures de maïs ont dû être détruites sur ECO2 en raison de difficultés de désherbage ; une perte de rendement de plus de 21 % a été mesurée sur la carotte de saison d'ECO3PAP en lien avec une forte pression de bioagresseurs telluriques.

Figure 9 : Rendement des Systèmes de Culture testés par rapport au rendement de référence

On observe que les systèmes ayant enregistré une forte réduction d'IFT sont également ceux qui subissent les baisses de rendement les plus marquées. L'application des RdD dans ces systèmes s'est accompagnée d'une prise de risque plus élevée, compromettant la maîtrise des bioagresseurs en raison d'un manque de leviers suffisamment efficaces.

3.3.2. Impact sur le salissement des parcelles

Afin d'évaluer l'évolution du salissement des parcelles, des comptages d'adventices ont été réalisés au semis et à la récolte sur l'ensemble de la rotation culturale. En Nouvelle-Aquitaine, les résultats montrent une situation hétérogène selon les systèmes de culture, ECO3PAP étant le plus sujet au salissement (Figure 10).



Figure 10 : Evolution de la flore adventice 2020-2024 – ECO3PAP (Nouvelle-Aquitaine)

En Normandie, ECO1 et ECO2 ont pu être maintenus relativement propres. Toutefois, en l'absence de leviers de désherbage suffisamment efficaces, la gestion des adventices a nécessité un recours intensif au sarclage manuel, atteignant des niveaux non viables économiquement : 52,1 jours par ha sur ECO1 et 25,3 jours par ha sur ECO2. À l'échelle d'une exploitation-type du Val de Saire, d'une surface de 60 ha, cela représenterait un besoin respectif de 625 et de 304 jours de travail manuel par an, un niveau difficilement soutenable pour les producteurs en raison de l'impact économique et des difficultés de recrutement de la main-d'œuvre. Les adventices les plus complexes à maîtriser, sur l'ensemble des systèmes testés, ont été en premier lieu la morelle, et en second lieu la stellaire et le paturin. De même, les leviers mobilisés n'ont pas toujours permis d'aboutir à une gestion satisfaisante de la capsule sur les systèmes Normands ; du panic, de l'amarante et de la digitale sur les systèmes aquitains.

3.4. Résultats économiques

Les performances économiques des systèmes testés sont évaluées à partir de coûts réels fournis par les producteurs du bassin de production concerné, lorsque disponibles, ou de données standardisées issues de différentes sources (Chambres d'agriculture, Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole...). La référence est à dire d'expert pour les systèmes ECO1 et ECO2, « producteur » pour ECO3. Les charges de structure ne sont pas prises en compte ; seules les marges semi-nettes sont calculées [Produits bruts – Σ (charges d'approvisionnement, charges de mécanisation, charges de main-d'œuvre)]. Pour ECO1 et ECO2, les résultats de la parcelle d'expérimentation ont été transposés à l'échelle d'une exploitation type du Val de Saire (60 ha). Pour les systèmes ECO3, l'analyse a été menée à l'échelle du système.

En Aquitaine, ECO3B4 affiche une légère hausse de marge semi-nette par rapport à la référence (+3 %), grâce aux excellents rendements de la carotte de saison (+23 %). En revanche, ECO3PAP et ECO3E3 enregistrent des baisses respectives de 22 % et 19 % de la marge semi-nette. Pour ECO3E3, cette diminution est exclusivement due à la double culture de carotte, affectée par la hausse des charges – notamment le coût des bâches occultantes, 2,45 fois plus élevé que celui des bâches classiques – ainsi que par des pertes de rendement significatives (-13 % pour la carotte primeur et -34 % pour la carotte de saison). Concernant ECO3PAP, la baisse s'explique principalement par les pertes de rendement sur la carotte de saison (-21 %) et sur la première culture de haricot vert (-100 %).

En Normandie, les systèmes testés subissent une baisse de la marge semi-nette comprise entre 26 % et 5 000 % par rapport au système de référence, en fonction des prix de vente retenus. Cette chute des performances économiques des systèmes ECO1 et ECO2 s'explique par des pertes de rendement affectant l'ensemble des cultures (à l'exception du chou d'ECO1) et par une forte augmentation des charges, notamment celles liées au sarclage manuel. Ce dernier représente respectivement 13 % et 5 % du total des charges, et 39 % et 14 % des coûts imputables à la culture de carotte.



Les systèmes affichant la plus forte baisse d'IFT (ECO3PAP, ECO2 et ECO1) sont ceux subissant la plus forte dégradation de leurs performances économiques en raison, principalement, du manque de leviers efficaces pour lutter contre les bioagresseurs.

L'évaluation économique des systèmes testés dans AlterCarot présente plusieurs limites méthodologiques qui en affectent la robustesse : faible nombre, voire absence, de répétitions ; variabilité interannuelle marquée liée aux conditions météorologiques ou aux pressions biotiques (bioagresseurs, maladies...). En outre, l'extrapolation de résultats issus d'essais conduits en station expérimentale ou sur petites parcelles vers des situations réelles d'exploitation peut introduire des biais, limitant la représentativité et la transférabilité des conclusions.

3.5. Evaluation et transfert des règles de décision

A l'issue du projet, l'ensemble des 88 RdD formalisées sont considérées comme étant claires, cohérentes, applicables et stables. En revanche, l'évaluation des critères de réalisabilité, d'efficacité et de pérennité est plus complexe et nécessiterait une expérimentation prolongée dans divers contextes (météorologie, pression des bioagresseurs, historique de la parcelle...). Certaines RdD ont d'ores et déjà été identifiées comme trop complexes pour être réalisables par des producteurs (ex. comptage des œufs d'*Héliothis*), insuffisamment efficaces (ex. *Pythium* sur carotte) ou peu pérennes (ex. recours intensif au désherbage manuel ou à des substances actives à risque de retrait pour le désherbage de la carotte). Ces RdD seront retravaillées dans le cadre du projet ESCaLE.

Le transfert des RdD les plus robustes d'AlterCarot a démarré et se poursuivra dans le cadre d'ESCaLE. Deux RdD, dédiées aux cultures de haricot vert, ont été publiées sur l'outil en ligne GECCO, accessible publiquement. Les temps d'échange entre pairs, organisés dans le projet (visites de parcelles, ateliers de co-conception...), ont favorisé le transfert de certaines RdD et l'adoption de pratiques par les producteurs.

Dans le cadre d'AlterCarot, les partenaires ont choisi d'évaluer des systèmes et des combinaisons de leviers formalisées sous la forme de RdD. Les leviers mobilisés n'ont pas été évalués individuellement.

4. Conclusion

Le projet AlterCarot met en lumière les opportunités et les limites actuelles de la transition agroécologique dans les filières légumières spécialisées, comme la carotte et le haricot vert.

Certains systèmes de culture expérimentés ont permis d'atteindre ou dépasser l'objectif de réduction de 60 % de l'IFT, attestant de la faisabilité technique de cette transition. Toutefois, les leviers mobilisés dans le projet, et les RdD combinant ces leviers, n'ont pas permis une gestion suffisante des bioagresseurs, entraînant des pertes de rendement, voire des pertes complètes de cultures. La réduction d'IFT s'accompagne donc d'une prise de risque accrue pouvant entraîner une dégradation, parfois très forte, des performances économiques (augmentation des charges, diminution des produits et de la marge semi-nette). Supportées intégralement par les producteurs, ces pertes représentent un obstacle majeur à l'adoption de nouvelles pratiques et à la baisse de l'IFT dans les exploitations légumières.

L'expérimentation a révélé la difficile anticipation des retraits de substances actives face au déficit de solutions alternatives, soulignant la nécessité de poursuivre la recherche et l'expérimentation pour concilier durabilité, compétitivité et attentes sociétales. De nombreuses impasses sont à craindre dans l'avenir, en particulier pour les bioagresseurs telluriques (nématodes, pythiacées...), la gestion des adventices (morelles, datura...) et certains ravageurs aériens en cas de forte pression (*Héliothis*...).

Certaines RdD formalisées dans le cadre d'AlterCarot ont néanmoins démontré leur pertinence agronomique. Leur transfert vers les techniciens, conseillers et producteurs a été mis en place via des



outils formalisés tels que GECO ou des méthodes plus informelles et orales (visites de parcelle, réunions d'échanges...). Une part importante des RdD formalisées dans le cadre du projet AlterCarot nécessite toutefois d'être remaniées pour améliorer leur performance, réalisabilité et applicabilité, conditions indispensables à une bonne appropriation par les producteurs. La poursuite de ce travail et le transfert des RdD vers les acteurs de terrain constituent désormais un objectif central pour les partenaires du projet. Les acquis d'AlterCarot seront valorisés dans le cadre du projet ESCaLE, lancé en 2025, qui vise à identifier de nouveaux leviers innovants (notamment à partir de travaux menés dans le PARSADA ou de PAUPFL), à mieux quantifier la prise de risque liée à la réduction des IFT et son impact économique, et à favoriser la transférabilité des outils d'aide à la décision.

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

Contributions des auteurs

E. Casteil : Project administration, methodology, supervision, writing – original draft

L. Briache, C. Chateau, O.Favaron, G. Le Bihan, L. Quinet, F. Vial : Formal analysis, investigation, methodology

V. Faloya : Conceptualization, methodology, validation

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier chaleureusement l'ensemble des membres de Carottes de France, de l'UNILET, d'INVENIO et de SILEBAN pour leur participation au projet, et plus particulièrement celles et ceux ayant contribué aux ateliers et à la rédaction des règles de décision. Les auteurs remercient tout particulièrement les producteurs pleinement investis dans le projet, en mettant à disposition leurs parcelles et leur temps, et notamment Vincent Schieber et Clément Letierce. Les auteurs adressent également leurs vifs remerciements à Assandoa Dorcas Affian pour son engagement et sa contribution à l'élaboration d'une méthode d'évaluation des règles de décision. Un grand merci au réseau DEPHY Expé, dont fait partie AlterCarot, et en particulier à Cathy Eckert pour son suivi et son expertise précieuse ; ainsi qu'au projet DECILèg pour son soutien.



Déclaration de soutien financier

AlterCarot est une action du plan Ecophyto, pilotée par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec le soutien technique et financier de l'Office français de la biodiversité.

Références bibliographiques

Affian D.A., 2022. Analyse des performances de systèmes de cultures légumiers innovants Projet DEPHY Expé AlterCarot. 78p.

Agreste, Statistique Agricole 2023.

Cenaldi, 2024. Résultats cumulés de fin de campagne, Haricot vert et beurre. Document confidentiel.

Deytieux V., Vivier C., Minette S., Nolot J-M., Piaud S., Schaub A., Lande N., Petit M-S., Reau R., Fourrié L., et al. (2012). Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. *Innovations Agronomiques* 20. 49-78p

Eurostat (2018 et 2023). Database, Vegetable production. <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/data/database>

Havard, M., Alaphilippe, A., Deytieux, V., Estorgues, V., Labeyrie, B., Lafond, D., Meynard, J.-M., Petit M.S., Plénet, D., Picault, S., et al., (2017). Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation « système » pour les cultures assolées et pérennes. GIS (Groupement d'Intérêt Scientifique) PIClég, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT (Réseau Mixte Technologique) Systèmes de culture innovante, GIS Relance Agronomique. 119 p.

Meynard J.M., (2012). La reconception est en marche ! - Conclusion au Colloque « Vers des systèmes de culture innovants et performants : De la théorie à la pratique pour concevoir, piloter, évaluer, conseiller et former ». *Innovations Agronomiques* (20). 143-153p

Paugam L., (2018). Evaluation multicritère de la durabilité de trois systèmes de culture innovants en grande culture dans un contexte Breton. 133p

Plénet D., and Simon S. (2015). Une démarche de conception et d'évaluation de systèmes de culture pour des vergers plus durables. Institut de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) « Sciences, Eaux & Territoire ». <https://www.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2015-1-page-58.htm> . 58-63p

Sebillotte M. (1990). Système de culture : un concept opératoire pour les agronomes. In : Les systèmes de culture, Combe L. et Picard D. (éds.), INRA Editions. 165-196p

Pour citer cet article : Emilie Casteil, Laëticia Briache, Corentin Chateau, Olivier Favaron, Gwénaëlle Le Bihan, et al.. Systèmes de culture agroécologiques légumiers incluant la carotte, économiquement viables et économes en produits phytosanitaires. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.165-176. [10.17180/ciag-2026-vol109-art13](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Minimisation de l'utilisation des pesticides en systèmes de grandes cultures et cultures légumières en Hauts-de-France

Bruno POTTIEZ¹, Samuel ALEXANDRE², Stéphane HERVIEU³, Maxime DERBECOURT³, Marie BERNARD⁴, Sandrine OSTE⁴, Olivier BARLET⁵, Olivier LEY⁵, Hélène BAUDET⁶, Maryline MAGNIN-ROBERT⁷, Rémi PLATEL⁸, Brice LOUVEL⁸, Ali SIAH⁸

¹ Chambre d'agriculture Nord-Pas de Calais, 56 Avenue Roger Salengro, 62223 Saint-Laurent-Blangy

² Pôle Légumes Région Nord, route d'Estaires, 62840 Lorgies

³ EPLEFPA du Pas de Calais, site d'Arras, route de Cambrai, 62217 Tilloy-lès-Mofflaines

⁴ FREDON Hauts-de-France, 265 rue Becquerel, BP 74, 62750 Loos-en-Gohelle

⁵ ITB Nord-Pas de Calais, 60 avenue Roger Salengro, BP 80074, 62052 Saint Laurent Blangy

⁶ UNILET Hauts-de-France, 45, avenue Paul Claudel, 80480 Dury.

⁷ Université du Littoral Côte d'Opale, UCEIV-EA 4492, CS 80699, 62228 Calais

⁸ JUNIA, UMR 1158 BioEcoAgro, 59014 Lille

Correspondance : bruno.pottiez@npdc.chambagri.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art14>

Résumé

Le projet Minipest, conduit sur une durée de six ans, vise à combiner plusieurs leviers agroécologiques afin de réduire au maximum la dépendance de deux systèmes de culture de la Région Hauts-de-France (grandes cultures et cultures légumières) aux produits phytosanitaires conventionnels. Après cinq années d'expérimentation, la majorité des règles de décision ont été appliquées avec succès et la faisabilité des leviers a été analysée. Dans l'ensemble, la performance technique et agronomique des leviers actionnés et les résultats relatifs aux rendements et à la marge brute sont satisfaisants et prometteurs. Toutefois, certains problèmes constatés ne sont totalement pas solutionnés avec la technicité disponible, comme le désherbage de l'oignon et la modulation des seuils de nuisibilité des insectes ravageurs selon les niveaux de populations des auxiliaires. Les indicateurs technico-économiques encourageants obtenus permettront le transfert des connaissances vers les producteurs et les apprenants.

Mots-clés : Ecophyto, agroécologie, réduction d'intrants, leviers agronomiques, approche système.

Abstract: Minimising the use of pesticides in arable and vegetable farming systems in Hauts-de-France.

Minipest project, conducted over six years, aims at combining several agroecological levers in order to reduce as far as possible the dependence of two cropping systems in the Hauts-de-France region (field crops and vegetable crops) on conventional plant protection products. After five years of experimentation, most of the decision rules have been successfully applied, and the feasibility of the levers has been analyzed. Overall, the technical and agronomic performance of the levers applied and the results in terms of yield and gross margin are satisfactory and promising. However, some of the problems identified are not totally solved with the available technicity, such as onion weed control and the modulation of pest nuisance thresholds according to beneficiary population levels. The encouraging agro-economic indicators found will allow the transfer of knowledge to producers and trainees.



Keywords: Ecophyto, agroecology, input reduction, agronomic levers, systems approach.

1. Introduction

Les cultures agricoles sont en permanence soumises à des attaques de bioagresseurs (agents phytopathogènes, ravageurs, adventices), provoquant de fortes pertes de rendement pour les producteurs, mais aussi menaçant la sécurité alimentaire nationale et mondiale. A ce jour encore, la lutte contre les agro-bioagresseurs repose essentiellement sur l'utilisation des intrants phytosanitaires chimiques (pesticides), mais leur utilisation est de plus en plus controversée pour leurs effets négatifs potentiels sur l'environnement et la santé humaine (<https://www.inserm.fr/expertise-collective/pesticides-et-sante-nouvelles-donnees-2021>). La recherche de méthodes alternatives pour réduire la dépendance des systèmes agricoles aux pesticides conventionnels est ainsi encouragée depuis le lancement du plan national Ecophyto en 2008 et la directive cadre européenne 2009/128/CE imposant un plan d'action national à chaque pays membre.

La région Hauts de France est l'un des piliers de l'agriculture française, reconnue pour sa diversité de cultures. En effet, deux pommes de terre sur trois, une betterave sur deux, une tonne de blé sur cinq et 20% des cultures légumières françaises sont produites dans cette région. Toutefois, les évolutions réglementaires récentes incitant à réduire massivement les produits phytosanitaires de synthèse chimique en agriculture (pour développer des systèmes agricoles plus durables) nécessitent d'éprouver des innovations agronomiques pour mieux accompagner les producteurs à faire face à ces contraintes. Certaines cultures régionales à forte valeur ajoutée et très consommatrices en produits phytosanitaires, comme la pomme de terre, le chou-fleur d'été et l'oignon, sont de plus en plus sujettes à des nuisibilités permanentes provoquées par les bioagresseurs, dont les attaques sont accentuées ces dernières années par le réchauffement climatique. En l'absence de moyens de lutte appropriés, ces stress biotiques sur les cultures peuvent provoquer de fortes baisses de rendement (en quantité et en qualité) et de marge brute pour les producteurs.

Aujourd'hui encore, très peu de références techniques et scientifiques sont disponibles sur la réduction des pesticides et sur la gestion durable des bioagresseurs dans la région Hauts-de-France dont le climat est propice au développement de ces derniers, bien que la recherche de méthodes alternatives soit assez recommandée par les acteurs scientifiques (e.g. Karlsson-Green *et al.* 2020) et sociétaux (e.g. Ebitu *et al.* 2021). En outre, les références expérimentales agronomiques sont limitées sur les pratiques culturales et les leviers permettant de compenser une réduction d'au-delà de 50% des produits phytosanitaires dans les systèmes de culture en France. Il est ainsi nécessaire de mettre en place des expérimentations à l'échelle du système de culture pour explorer la compensation de cette baisse d'intrants chimiques, *via* le déploiement de leviers agroécologiques. Les travaux expérimentaux pluriannuels réalisés dans le cadre du projet Minipest (2018-2024) se situent dans ce contexte et visent à réduire l'usage des pesticides chimiques d'au moins de 50 % à l'échelle du système, sur des cultures majeures de la Région Hauts-de-France (blé, pomme de terre, betterave, colza, pois de conserve, oignon, chou-fleur). Les travaux consistent à développer des systèmes de culture moins dépendant en intrants chimiques, *via* la combinaison de plusieurs leviers agroécologiques.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Dispositifs expérimentaux

Les expérimentations sont réalisées dans deux sites expérimentaux (Lorgies et Tilloy-lès-Mofflaines), distants d'une quarantaine de kilomètres et situés en Hauts-de-France (Figure 1A). Chaque site expérimental comporte 12 micro-parcelles de 540 m² (18 m x 30 m) chacune. Ces micro-parcelles sont séparées par une bande enherbée de 3 m et comportent à chaque extrémité une bande enherbée de

15 m afin de permettre notamment aux matériels de désherbage mécanique d'évoluer correctement et surtout d'être suffisamment lancés pour une efficacité optimale (Figure 1B).

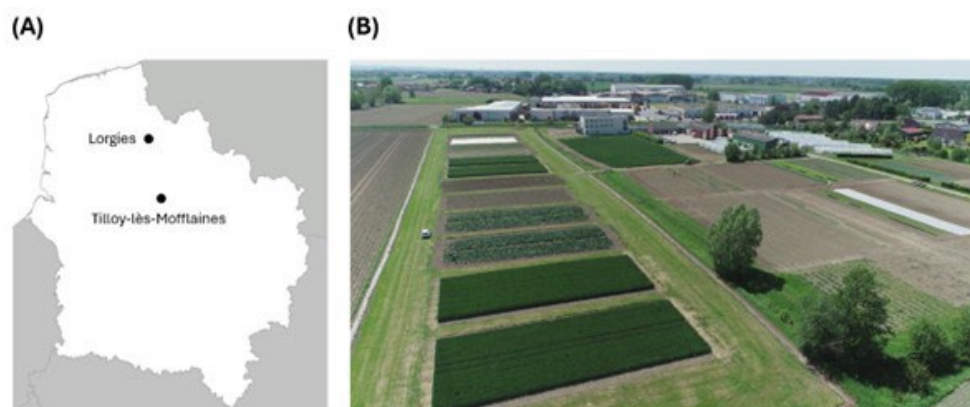


Figure 1 : Situation géographique des deux sites expérimentaux dans la Région Hauts-de-France (A) et illustration du site de Lorgies (B).

2.2. Assolements et rotations

L'assolement dans chaque site est construit avec les cultures pratiquées dans le bassin correspondant, en particulier la plaine de la Lys Pévèle pour le site de Lorgies et la plaine de l'Artois pour le site de Tilloy-lès-Mofflaines. Au total, six cultures sont mises en place dans chaque site expérimental, avec le blé qui est expérimenté en deux répétitions expérimentales dans chaque site (Figure 2). Pour le chou-fleur, deux types de culture sont retenues : une culture de chou-fleur avec une seule plantation (Chou-fleur 1) et une culture de chou-fleur avec deux plantations (Chou-fleur 2). Pour la culture Chou-fleur 2, deux plantations sont mises en place : Chou-fleur 2 1^{ère} plantation (Chou-fleur 2.1), dont le repiquage est effectué vers mi-mars et Chou-fleur 2 2^{ème} plantation (Chou-fleur 2.2), dont le repiquage est réalisé début juillet.

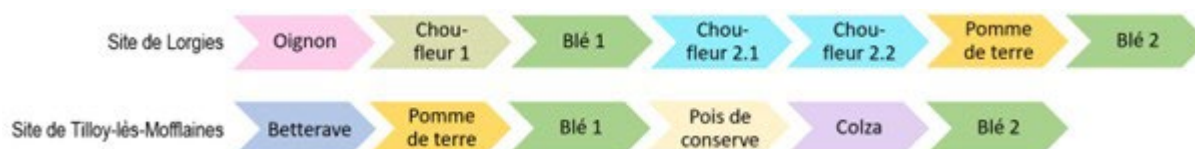


Figure 2 : Rotations des cultures mises en place dans les sites de Lorgies et de Tilloy-lès-Mofflaines. Pour des difficultés techniques, le pois de conserve a été remplacé par le haricot écossé frais (flageolet) en 2021-2022 et par le pois écossé en 2021-2022.

2.3. Démarches IFT100 et IFT Réduit

Pour chaque culture, deux conduites (IFT100 et IFT Réduit) sont mises en place. L'IFT100 correspond à la moyenne de l'IFT pratiqué à l'échelle régionale. L'IFT Réduit correspond à au moins 50 % de réduction par rapport à l'IFT100 à l'échelle du système. L'IFT relatif aux produits de biocontrôle n'est pas pris en compte dans le calcul de ces IFT. Le dispositif expérimental mis en place permet de comparer, pour une même rotation et pour chaque culture, les itinéraires IFT100 et IFT Réduit. Pour l'IFT100, il n'y a pas d'IFT de référence pour les légumes ; les interventions s'appuient sur les préconisations des prescripteurs (distributeurs, instituts techniques et chambre d'agriculture). La justification des interventions est consignée pour chacune d'elles et récapitulée au fur et à mesure de la saison, ce qui conditionne le nombre de traitements disponibles pour l'itinéraire IFT Réduit. La réduction des produits phytosanitaires sur la conduite IFT Réduit a été répartie sur les différentes cultures, en tenant compte des leviers disponibles et de la valorisation des cultures.



2.4. Leviers déployés dans la conduite IFT Réduit

Pour pallier la diminution des traitements dans la conduite IFT Réduit, plusieurs leviers agroécologiques sont utilisés, comme l'utilisation de produits de biocontrôle (blé, pois de conserve, colza et chou-fleur, pommes de terre), du désherbage mécanique (pomme de terre, colza, betterave, pois de conserve, oignon et chou-fleur) et manuel (oignon et chou-fleur), de variétés résistantes ou tolérantes (toutes les cultures sauf le pois de conserve et chou-fleur), du mélange variétal (blé, colza) (Tableau 1), de seuils d'intervention, du BSV, d'outils d'aide à la décision (OAD) comme Mileos® (pomme de terre), Miloni® (oignon), Kit pétale (Colza), SeptoLIS® (blé) et IPM (betterave), de faux semis (blé, pomme de terre et chou-fleur à une seule plantation), décalage de date de semis (blé) et enfin du rôle des auxiliaires des cultures dans le contrôle des ravageurs (Figure 3).



Figure 3 : Illustration des leviers agroécologiques déployés dans la conduite IFT Réduit.

Tableau 1 : Synthèse des variétés utilisées en conduites IFT100 et IFT Réduit dans les deux sites expérimentaux.

	2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022		2022-2023	
LORGIES	IFT100	IFT Réduit	IFT 100	IFT Réduit	IFT 100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT 100	IFT Réduit
Blé	Bergamo	Mélange variétal (Fructidor, Altamont, Bergamo, Mutic, Dakotana, Chevignon)	Bergamo	Mélange variétal (Fructidor, Altamont, Bergamo, Mutic, Dakotana, Chevignon)	Chevignon	Mélange variétal (Chambre, Chevignon, Garfield, Perkusio)	Chevignon	Mélange variétal (Junior, Chevignon, Garfield, Extase)	Chevignon	Mélange variétal (Chevignon, Sanremo, Addiction)
Pomme de terre	Fontane	Jelly	Fontane	Jelly	Fontane	Acoustic	Fontane	Kelly	Fontane	Lady Jane
Oignon	Hybelle	Santero	Hybelle	Restora	Hybelle	Powell	Hybelle	Restora	Hybelle	Restora
Chou-fleur 2 plantations	Prudencia (1 ^{ère} plantation) puis Dexter (2 ^{ème} plantation)	Prudencia (1 ^{ère} plantation) puis Dexter (2 ^{ème} plantation)	Easytop (1 ^{ère} plantation) puis Mendel (2 ^{ème} plantation)	Easytop (1 ^{ère} plantation) puis Mendel (2 ^{ème} plantation)	Easytop (1 ^{ère} plantation) puis Ansari (2 ^{ème} plantation)	Easytop (1 ^{ère} plantation) puis Ansari (2 ^{ème} plantation)	Easytop (1 ^{ère} plantation) puis Ansari (2 ^{ème} plantation)	Easytop (1 ^{ère} plantation) puis Ansari (2 ^{ème} plantation)	Mendel (1 ^{ère} plantation) puis Alcalá (2 ^{ème} plantation)	Mendel (1 ^{ère} plantation) puis Alcalá (2 ^{ème} plantation)
Chou-fleur 1 plantation	Mendel	Mendel	Mendel	Mendel	Mendel	Mendel	Mendel	Mendel	Mendel	Mendel
TILLOY-LES-M.	IFT100	IFT Réduit	IFT 100	IFT Réduit	IFT 100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT 100	IFT Réduit
Blé	Bergamo	Mélange variétal (Fructidor, Altamont, Bergamo, Mutic, Dakotana, Chevignon)	Bergamo	Mélange variétal (Fructidor, Altamont, Bergamo, Mutic, Dakotana, Chevignon)	Chevignon	Mélange variétal (Chambre, Chevignon, Garfield, Perkusio)	Chevignon	Mélange variétal (Junior, Chevignon, Garfield, Extase)	Chevignon	Mélange variétal (Chevignon, Sanremo, Addiction)
Pomme de terre	Fontane	Jelly	Fontane	Jelly	Fontane	Acoustic	Fontane	Kelly	Fontane	Lady Jane



Colza	DK Expansion n	DK Expansion + 10% ES Alicia	DK Expansion n	DK Expansion + 10% ES Alicia	DK Expansion n	DK Expansion + 7% ES Alicia	DK Expansion n	DK Expansion + 7% ES Alicia	Dingos + 7% ES Alicia	Dingos + 7% ES Alicia
Betterave sucrière	Frisbee	Chloelia	Origan	Vulcania	Frisbee	Compétita	Frisbee	Compétita	Frisbee	Jellera
Pois de conserves	Avocette	Avocette	Avocette	Avocette	Avocette	Avocette	Haricot écosé frais (flageolet) , variété Flagrano	Haricot écosé frais (flageolet), variété Flagrano	Pois écosé frais, variété Zonvert	Pois écosé frais, variété Trivert

2.5. Paramètres mesurés

L'évolution de la pression des bioagresseurs (ravageurs, adventices et maladies) et des auxiliaires de culture a été suivie sur toutes les micro-parcelles. Pour les maladies, la fréquence (nombre de plantes malades) et l'intensité (pourcentage de surface foliaire avec symptômes) ont été notées sur les deux sites. L'effet sur la biologie du sol a été mesuré pour chaque culture et dans les deux conduites. Le rendement de chaque culture a été mesuré pour chaque micro-parcelle, soit en réalisant des prélèvements (pomme de terre, oignon, chou-fleur, betterave et pois de conserve), soit en récoltant totalement la micro-parcelle (blé et colza). Une station météo du réseau agrométéorologique Hauts-de-France (association Avers'Météo) est présente sur chaque site. Les données recueillies sur ces deux stations permettent d'alimenter les modèles OAD utilisés dans l'expérimentation. Les indicateurs économiques et environnementaux dans chaque site expérimental sont calculés à l'aide de l'outil SYSTERRE[®]. Le système expérimental a été extrapolé à un système d'exploitation courant dans la Région Hauts-de-France (60 ha avec main œuvre familiale et salariés occasionnels pour le système à dominance culture légumière de Lorgies et 90 hectares avec un UTH pour le système à dominance grande culture de Tilloy-lès-Mofflaines). Les analyses statistiques des données sont réalisées avec le logiciel GraphPad Prism 8.

3. Résultats et discussion

3.1. Contexte climatique et pression des bioagresseurs

Les cinq années de l'expérimentation sont marquées par des saisons relativement contrastées en termes de conditions météorologiques (Tableau 2), avec une tendance à une augmentation des températures moyennes globales et une prépondérance d'épisodes de sécheresse, due probablement au changement climatique. Ces conditions météorologiques ont joué un rôle important sur la pression des bioagresseurs. A cause des conditions très sèches de l'été, la pression maladies a été faible en 2018-2019 (Tableau 2). En revanche, la pression ravageurs a été très forte, en particulier sur les cultures légumières (chou-fleur), avec une apparition de nouveaux ravageurs, notamment les doryphores sur pomme de terre, ainsi que les aleurodes et les altises sur chou-fleur. En 2019-2020, la pression maladies était très faible, mais les insectes ravageurs étaient plus prépondérants, en particulier les altises, les aleurodes, les pucerons et les chenilles sur chou-fleur. La saison 2020-2021 a été caractérisée par une très forte pression des bioagresseurs, à cause de l'été pluvieux favorable au développement des maladies, en particulier au mildiou de la pomme de terre et de l'oignon, ainsi que la cercosporiose de la betterave. En 2021-2022, la pression maladies a été relativement faible due aux conditions climatiques sèches du printemps et de l'été. Enfin, l'année 2022-2023 a été marquée par une pression maladies relativement élevée dues aux conditions climatiques pluvieuses du début de printemps et de l'été.

Tableau 2 : Synthèse des conditions météorologiques et de la pression des bioagresseurs dans les deux sites expérimentaux.



	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022	2022-2023
Conditions météorologiques	Automne doux, printemps très chaud et sec, automne pluvieux	Automne-hiver très pluvieux et doux, printemps-été chaud et très sec, automne pluvieux	Automne très pluvieux et froid, avec des gelées au mois de février, printemps-été très pluvieux et doux	Automne très pluvieux et doux, hiver doux et relativement sec, printemps-été très chaud et très sec	Automne pluvieux et doux, hiver pluvieux et doux, été chaud et sec
Maladies	+	+	+++	+	++
Insectes ravageurs	+++	+++	++	+++	++
Adventices	++	++	+++	++	++

+, pression faible ; ++ pression moyenne ; +++, pression forte.

3.2. Bilan des IFT appliqués et des leviers actionnés

Les IFT appliqués lors des cinq campagnes expérimentales sont dans l'ensemble conformes aux prévisions définies au démarrage du projet. La réduction moyenne des traitements hors biocontrôle sur les cinq ans a été de -59% sur le site de Lorgies et de -49% sur le site de Tilloy-lès-Mofflaines, traitement de semence compris (Figure 4). Le seuil de réduction de l'IFT d'au-delà de 50% à l'échelle du système a été respecté dans le site de Lorgies, mais ce seuil n'a pas été atteint dans le site de Tilloy-lès-Mofflaines en 2019-2020 (-49%), 2020-2021 (-40%) et 2022-2023 (-41%), bien qu'il ait été dépassé en 2018-2019 (-71%) et 2021-2022 (-51%). Cette difficulté à baisser l'IFT d'au-delà de 50% à l'échelle du système à Tilloy-lès-Mofflaines pourrait s'expliquer par (i) l'abandon de la culture de pois de conserve à la floraison en 2020-2021 et 2022-2023 en raison de contraintes techniques, ce qui a généré une augmentation automatique de l'IFT dans la modalité IFT Réduit (non-application de traitements fongicides dans l'IFT100 contre les maladies de fin de cycle du pois, comme l'anthracnose), (ii) une forte pression de vulpin sur colza et blé, ce qui a nécessité des interventions herbicides supplémentaires dans l'IFT Réduit et (iii) des conditions météorologiques défavorables qui ont fortement limité la baisse des traitements sur la culture de pomme de terre, dont l'IFT est, de loin, le plus élevé du système.

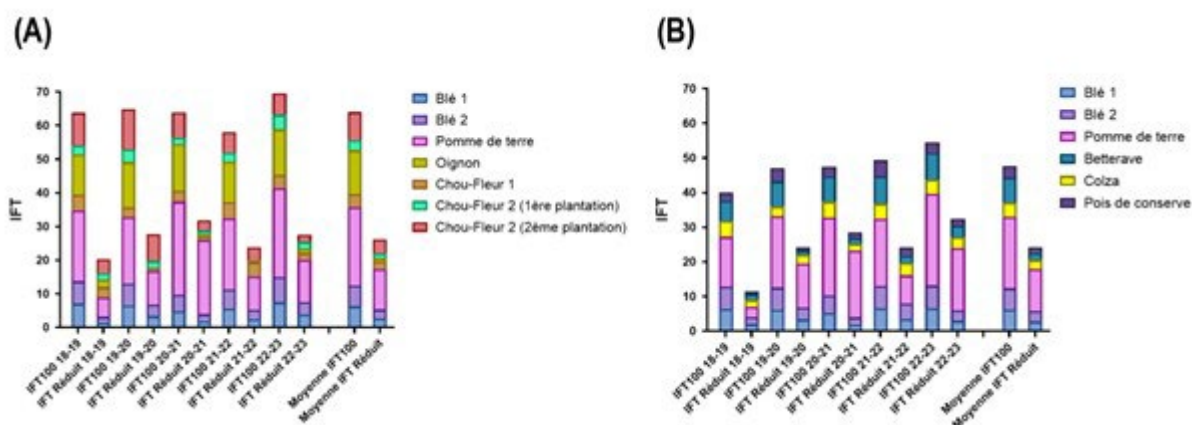


Figure 4 : Bilan des IFT appliqués à Lorgies (A) et Tilloy-lès-Mofflaines (B) dans les conduites IFT100 et IFT Réduit hors biocontrôle.

Les campagnes avec les réductions de l'IFT les plus importantes à l'échelle du système sont 2018-2019 (-68%) et 2022-2023 (-60%) à Lorgies et 2018-2019 (-71%) et 2021-2022 (-51%) à Tilloy-lès-Mofflaines. À l'inverse, les campagnes où les réductions sont les plus faibles sont 2020-2021 (-50%) à Lorgies et 2020-2021 (-40%), 2022-2023 (-41%) et 2019-2020 (-49%) à Tilloy-lès-Mofflaines. Ces différences sont



essentiellement liées aux conditions météorologiques de l'année, qui peuvent être favorables ou défavorables au développement des bioagresseurs. Concernant les cultures, les réductions moyennes de l'IFT les plus importantes sur les cinq années de l'expérimentation sont observées sur l'oignon (-92%), la betterave (-71%) et le blé (-58% à Lorgies et -55% à Tilloy-lès-Mofflaines), car d'une part, les leviers techniques disponibles sur ces cultures ont été efficaces et d'autre part, le risque de perte totale de la récolte est plus faible comparativement à d'autres cultures comme la pomme de terre et les cultures légumières. Les réductions d'IFT les moins élevées sont notées pour le colza (-36%) et la pomme de terre (-41% à Tilloy-lès-Mofflaines et -48% à Lorgies) à cause de la vulnérabilité de ces cultures aux bioagresseurs.

La réduction des IFT a été possible grâce à l'introduction de plusieurs leviers agroécologiques dans la conduite IFT Réduit. Concernant la gestion des maladies, le principal levier utilisé est le choix variétal. Des variétés tolérantes ou résistantes, ayant des potentiels de production similaires à celles de l'itinéraire de référence IFT100, ont été choisies pour la conduite IFT Réduit (Tableau 1). Les OAD se sont également révélés efficaces sur certaines cultures, comme Miléos® sur pomme de terre, qui a permis de réduire notablement les traitements lorsque les conditions météorologiques ne sont pas favorables au développement du mildiou. Les seuils BSV ont également permis d'affiner les décisions concernant le traitement des cultures dans la conduite IFT Réduit.

Pour la gestion des adventices, la rotation est utilisée comme levier sur les deux conduites. Pour la modalité IFT Réduit, la stratégie a mobilisé, en complément, le désherbage mécanique et manuel, l'alternance labour et non labour, les faux semis, la réduction des doses de produits phytosanitaires conventionnels et le désherbage localisé. Le désherbage mécanique a montré une bonne efficacité sur pomme de terre, betterave et chou-fleur. Pour l'oignon, la maîtrise de l'enherbement avec le désherbage mécanique est plus difficile car l'oignon est une culture qui ne couvre jamais le sol et qui laisse la possibilité aux adventices de se développer. Aucune dérive de l'enherbement global n'a été observée sur les parcelles de la modalité IFT Réduit.

Concernant la gestion des insectes ravageurs, des leviers d'évitement ont été mis en place dans la conduite IFT Réduit. Par exemple, la date de semis du colza a été avancée afin de permettre à la culture d'être plus développée (donc moins sensible) au moment de l'arrivée des altises. Sur la culture du colza, une variété précoce est également mélangée à la variété principale afin de pallier les attaques de méligèthes au moment de la floraison. Sur chou-fleur, la mise en place d'un voile P17 sur les plantations du mois de mars et d'un filet insecte proof sur les plantations du mois de mai a permis une bonne gestion des altises, thrips et chenilles. Sur oignon, l'utilisation de l'irrigation a permis une bonne gestion des thrips. Globalement, les prises de décision dans la conduite IFT Réduit sur les interventions contre les insectes ravageurs ont reposé sur les seuils BSV.

3.3. Rendements

Les rendements obtenus sont globalement satisfaisants pour les deux sites expérimentaux, sauf pour la culture de pois de conserve qui n'a pas été récoltée en 2020-2021 et 2022-2023, le colza en 2019-2020 et le chou-fleur 2 plantations en 2022-2023, pour des raisons techniques (dégâts de gibier et désherbage mécanique causant des pertes de pieds, etc.). Globalement, les rendements dans la conduite IFT Réduit sont inférieurs à la conduite IFT100 (Figure 5, Figure 6), mais les baisses enregistrées ne sont pas proportionnelles à la réduction des IFT appliqués (Figure 4). Les analyses statistiques appliquées sur les moyennes multi-annuelles n'ont montré aucune différence significative entre les rendements obtenus dans la conduite IFT Réduit comparativement à ceux obtenus dans la conduite IFT100 sur les cinq années de l'expérimentation (Figure 6), montrant ainsi qu'une forte réduction de l'IFT à l'échelle du système (au-delà de 50%) ne se traduit forcément pas par une baisse significative des rendements sur les cultures.



En analysant les résultats sans la prise en compte des analyses statistiques, sur les cinq années de l'expérimentation, les cultures ayant subi les baisses de rendement les plus importantes sont l'oignon (-16%) et le chou-fleur 2 plantations-1^{ère} plantation (-13%) à Lorgies et la betterave (-7%) à Tilloy-lès-Mofflaines. Pour la culture de blé, une baisse de -10% est observée sur les deux parcelles à Tilloy-lès-Mofflaines, mais celle-ci est expliquée par l'année 2019-2020 suite à un accident technique survenu sur l'une des deux micro-parcelles de blé en conduite IFT Réduit. De manière intéressante, des augmentations de rendement sont observées pour certaines cultures, comme la pomme de terre (+10% à Tilloy-lès-Mofflaines et +5% à Lorgies) et le chou-fleur 1 plantation à Lorgies, expliquées essentiellement par les variétés utilisées, plus productives, et par un binage efficace sur chou-fleur. Pour les autres cultures, des baisses ou augmentations très légères (proches d'une stabilisation) sont notées selon les années (Figure 5). Pour des raisons de fiabilité (absences ou mauvaises récoltes), la culture de pois de conserve a été éliminée des analyses de rendement

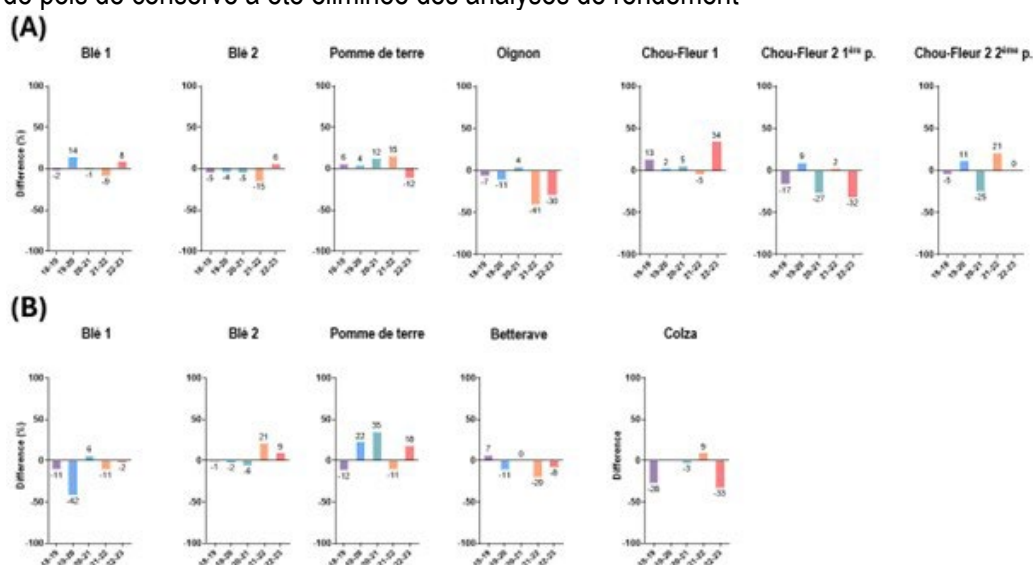


Figure 5 : Bilan des rendements obtenus par année à Lorgies (A) et Tilloy-lès-Mofflaines (B) pour les conduites IFT100 et IFT Réduit. Les valeurs indiquent le pourcentage de baisse ou d'augmentation dans l'IFT Réduit par rapport à l'IFT100.

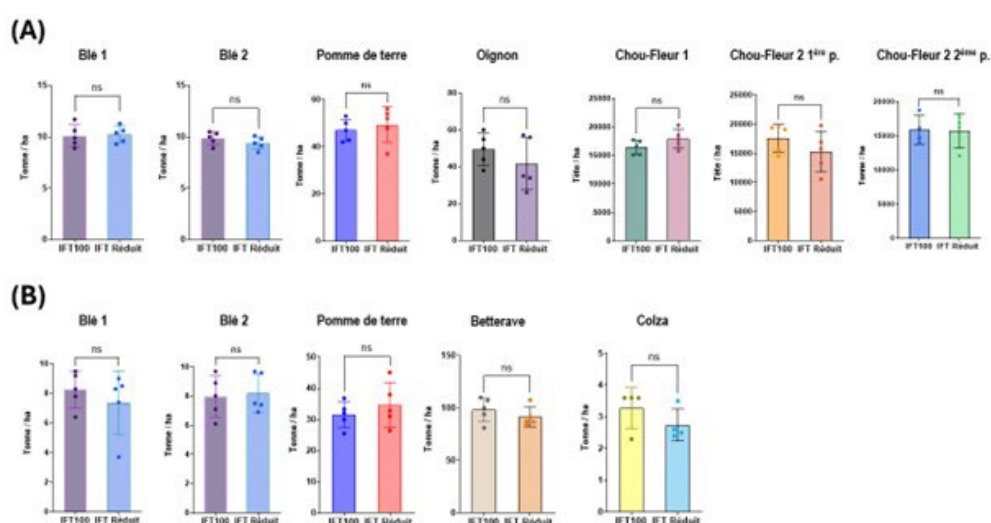


Figure 6 : Moyennes des rendements, sur les cinq années, obtenues à Lorgies (A) et Tilloy-lès-Mofflaines (B) pour les conduites IFT100 et IFT Réduit. Les rendements du pois de conserve ne sont pas présentés dans le site de Tilloy-lès-Mofflaines en raison de données insuffisantes (uniquement).



deux années réussies). La comparaison statistique entre la moyenne IFT100 et IFT Réduit a été réalisée à l'aide du test de Student à $P=0.05$. ns = non significatif.

3.4. Indicateurs économiques

Sur les cinq années de l'expérimentation, le produit brut dans la conduite IFT Réduit a baissé en moyenne de -5% sur le site de Lorgies et de -1% sur le site de Tilloy-lès-Mofflaines comparativement à la conduite IFT100 (Tableau 3). Cette différence, qui semble relativement limitée par rapport à la forte réduction des IFT, s'explique par les rendements généralement plus faibles sur certaines cultures dans l'itinéraire IFT Réduit.

Les charges d'intrants ont globalement été stables entre les deux conduites sur le site de Lorgies (-0%) et ont montré une baisse de -12% sur le site de Tilloy-lès-Mofflaines par rapport à la conduite IFT100. La stabilisation des charges d'intrants sur le site de Lorgies s'explique par une baisse de la charge en phytosanitaires et une augmentation de la charge des semences (coût élevé des semences des variétés résistantes) et des produits de biocontrôle utilisés uniquement dans la conduite IFT Réduit.

Les charges de mécanisation et de carburant sont supérieures dans la conduite IFT Réduit à Tilloy-lès-Mofflaines due aux opérations de désherbage mécanique, plus chronophages et plus consommatrices en carburant comparativement aux interventions chimiques. Par ailleurs, le coût du désherbage mécanique dans la conduite IFT Réduit est compensé par un nombre de passages de pulvérisateur plus élevé sur l'itinéraire IFT100. Enfin, le temps de travail est plus élevé sur le site de Lorgies comparativement au site de Tilloy-lès-Mofflaines, due à la récolte des trois plantations de chou-fleur effectuée à la main. De plus, le désherbage manuel de la culture de l'oignon et du chou-fleur a généré une augmentation considérable du temps de travail dans la conduite IFT Réduit. En effet, à Lorgies, le temps de travail est supérieur de 24 % dans la conduite IFT Réduit comparativement à la conduite IFT100. De manière globale, la réduction du produit brut et les coûts supplémentaires (mécanisation et charges salariales) peuvent expliquer la réduction de la marge brute hors aide dans les deux sites expérimentaux.

Tableau 3 : Evaluation multicritères des deux conduites IFT100 et IFT Réduit à Lorgies et Tilloy-lès-Mofflaines. ND = non déterminé.

	2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022		2022-2023		Moyenne	
Lorgies	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit
Produit brut hors aide (€/ha)	10 310	- 3%	9 526	+ 3%	8 252	- 6%	12 121	- 2%	9 521	- 16%	9 946	- 5%
Marge brute hors aides (€/ha)	7 172	- 3%	7 943	+ 3%	6 269	- 8%	10 074	- 3%	7 665	- 21%	7 825	- 6%
Charges intrants (€/ha)	3 139	- 5%	1 583	+ 2%	1 983	0%	2 047	+ 2%	1 856	+ 1%	2 122	0%
Charges de mécanisation (€/ha)	990	+ 6%	1 167	+ 1%	1 038	+ 1%	2 175	+ 9%	1 898	+ 1%	1 454	+ 3%
Carburant (€/ha)	120	- 12%	140	0%	141	- 1%	144	+ 1%	200	+ 3%	149	- 2%
Emissions de gaz à effet de serre totales (kgéqCO ₂ /ha)	20 012	- 1%	21 099	0%	19 782	0%	19 827	- 1%	19 677	0%	20 079	0%
Temps de travail (h/ha)	116	+ 59%	145	+ 3%	118	+ 14%	199	+ 24%	143	+ 22%	144	+ 24%
Tilloy-lès-Mofflaines	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit	IFT100	IFT Réduit
Produit brut hors aides (€/ha)	1 978	- 7%	1 641	- 3%	2 336	+ 1%	2 252	- 6%	3 930	- 3%	2 427	- 4%
Marge brute hors aides (€/ha)	1 418	- 1%	1 000	+ 3%	1 778	+ 4%	1 412	- 4%	2 442	- 5%	1 610	- 1%



Charges intrants (€/ha)	560	- 26%	641	- 15%	558	- 9%	840	- 12%	1 488	0%	817	- 12%
Charges de mécanisation (€/ha)	439	+ 4%	445	+ 8%		ND	432	+ 12%	722	+ 4%	510	+ 7%
Carburant (€/ha)	63	+ 8%	57	+ 28%		ND	68	+ 15%	336	+ 6%	131	+ 14%
Emissions de gaz à effet de serre totales (kgéqCO ₂ /ha)	15	- 1%	15	- 1%	14	- 1%	13	- 2%	93	- 10%	30	- 3%
Temps de travail (h/ha)	6	+ 7%	6	+ 6%	6	- 2%	6	+ 8%	7	0%	6	+ 4%

4. Conclusion

Cette expérimentation a permis d'acquérir de nouvelles connaissances et apprentissages sur l'introduction de leviers agroécologiques visant à compenser une réduction d'au-delà de 50% de l'IFT sur deux systèmes de culture de la Région Hauts-de-France. Tous les leviers pilotés dans des règles de décision ont été appliqués avec succès, avec une amélioration notable dans l'utilisation de certains d'entre eux, tels que le désherbage mécanique de l'oignon. Toutefois, certains leviers sont difficiles à mettre en place, comme le désherbage mécanique du blé, très dépendant des conditions météorologiques. Bien que des variations de rendement soient observées entre les deux conduites IFT100 et IFT Réduit, les analyses statistiques n'ont montré aucune différence significative entre les rendements des deux modalités obtenues sur les cinq années de l'expérimentation. Ce résultat suggère ainsi qu'une forte réduction de l'IFT ne se traduit obligatoirement pas par une perte significative de rendement et de marge brute à l'échelle du système. Cette tendance est encourageante pour le transfert des leviers actionnés vers les producteurs, à condition de considérer davantage la prise de risque et la disponibilité du matériel dans les exploitations agricoles, mais aussi la main d'œuvre pour certaines cultures comme l'oignon. Enfin, le réchauffement climatique a généré de nouvelles problématiques par certains bioagresseurs, comme les aleurodes sur chou-fleur et les doryphores sur pomme de terre. Il faudra donc poursuivre les innovations agronomiques afin de gérer au mieux ces risques à venir, dans les décennies futures chez les producteurs.

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

Contributions des auteurs

S. Alexandre a coordonné le dispositif expérimental à Lorgies, S. Hervieu et M. Derbecourt ont coordonné le dispositif expérimental à Tilloy-lès-Mofflaines, H. Baudet a géré la culture de pois de conserve, O. Barlet et O. Ley ont géré la culture de betterave, M. Bernard et S. Oste ont réalisé le suivi des auxiliaires sur les cultures, M. Magnin-Robert et B. Louvel ont réalisé les analyses microbiologiques du sol, R. Platel a réalisé l'analyse statistiques des données, B. Pottiez a coordonné le projet au niveau technique, A. Siah a coordonné le projet au niveau scientifique et a réalisé le suivi des maladies sur la culture de blé.



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 l'Office Français pour la Biodiversité (OFB) et la Région Hauts-de-France pour leur soutien financier, ainsi que la Cellule d'Animation Nationale (CAN) du dispositif Dephy Expe Ecophyto pour leur accompagnement dans la réalisation des travaux.

Déclaration de soutien financier

Les travaux présentés dans cet article sont obtenus dans le cadre du projet Minipest (2018-2024) soutenu par l'Office Français pour la Biodiversité (OFB) dans le cadre du dispositif Dephy Expe Ecophyto et la Région Hauts-de-France.

Références bibliographiques

Karlsson-Green K., Stenberg J.A., Lankinen Å. (2020). Making sense of Integrated Pest Management (IPM) in the light of evolution. *Evolutionary Applications*, 13:1791-1805 (<https://doi.org/10.1111/eva.13067>).

Ebitu L., Avery H., Mourad K.A., Enyetu J. (2019). Citizen science for sustainable agriculture – A systematic literature review. *Land Use Policy*, 103, 105326 (<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105326>).

Pour citer cet article : Bruno Pottiez, Samuel Alexandre, Stéphane Hervieu, Maxime Derbecourt, Marie Bernard, et al.. Minimisation de l'utilisation des pesticides en systèmes de grandes cultures et cultures légumières en Hauts-de-France. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.177-187. [10.17180/ciag-2026-vol109-art14](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art14)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/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.



Le projet BEE, une démarche de protection agroécologique de la vigne pour intégrer le biocontrôle

Xavier BURGUN¹, Marion LE BOT¹, Caroline GOUTTESOULARD², Guillaume DELANOUE³, Marc VERGNES¹, Lionel LEY⁴ Olivier KEICHINGER⁵, Marie THIOULET-SCHOLTUS⁶

¹ Institut Français de la Vigne et du Vin pôle Nouvelle-Aquitaine, 39 rue Michel Montaigne 33290 Bordeaux, France

² Institut Français de la Vigne et du Vin pôle Rhône Méditerranée, avenue Yves Cazeaux - 30230 Rodilhan, France

³ Institut Français de la Vigne et du Vin Pôle Val de Loire Centre, Avenue Emile Gounin 37400 Amboise, France

⁴ INRAE, Unité d'Expérimentation Agronomique et Viticole (UEAV), 68000 Colmar, France

⁵ Chercheur indépendant, 67600 Sélestat, France

⁶ INRAE, Unité Mixte de Recherche - Laboratoire Agronomie et Environnement (LAE) INRAE, Université de Lorraine, 68000 Colmar, France

Correspondance : xavier.burgun@vignevin.com

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art15>

Résumé

Le projet BEE « Biocontrôle et Equilibre de l'Ecosystème vigne » développe une démarche viti-écologique afin de faciliter l'intégration des produits de biocontrôle. Le projet dispose de 5 sites expérimentaux dans les départements 16, 33, 37, 68 et 30. Les résultats 2018 - 2023 montrent : une réduction de l'Indice de Fréquence de Traitement phytosanitaire (IFT) hors-biocontrôle de 83 % sans augmenter le nombre de passages ; une forte augmentation du recours au biocontrôle ; une très réduite utilisation de fongicides (à 1,65 kg/ha/an de cuivre métal). La protection contre l'oïdium (100 % biocontrôle) et le black-rot a donné satisfaction. La protection contre le mildiou des grappes présente une prise de risque plus élevée par rapport à la référence en particulier sur les millésimes à forte pression. La diffusion des résultats a débuté en 2022 à Cognac via le réseau participatif LUMA : « Limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques selon les principes de l'Agroécologie ».

Mots-clés : Vigne, Expérimentation Système, Fertilité et vie des sols, Prophylaxie, Règles de décision, Outil d'aide à la décision, Biocontrôle.

Abstract

The BEE project "Biocontrol and Ecosystem Balance in Vineyards" aims to develop an agroecological approach to viticulture to facilitate the integration of biocontrol products. The project has five experimental sites in France: (16), (33), (37), (68), and (30). Results observed between 2018 and 2023 show an 83% reduction in the non-biocontrol TFI (Treatment Frequency Index) without increasing the number of treatments. The use of biocontrol-list product has drastically increased, while the use of copper-based fungicides has been limited to an average of 1.65 kg/ha of copper metal per hectare. The protection against powdery mildew (100 % biocontrol) and black rot was satisfactory. However, protection against downy mildew of grape bunch posed a higher risk compared to standard practices, particularly for protection in high disease pressure vintage. The dissemination of results began in 2022 in Cognac with the establishment of the LUMA participatory network: "Limiting the Use of Phytopharmaceutical Products According to Agroecology Principles."



Keywords: Vine, Experimentation System, Fertility and soil life, Prophylaxis, Decision rules, Decision support tool, Biocontrol.

1. Introduction

La directive européenne 2009/128/CE a introduit un cadre d'action commun pour parvenir à une utilisation durable des pesticides, exigeant des États membres qu'ils mettent en œuvre des politiques nationales visant à réduire l'utilisation et les impacts des pesticides (Barzman et Dachbrodt-Saaydeh, 2011 cités dans Nefti et al, 2024). Réduire l'usage des intrants en viticulture est un défi majeur (Fouillet et al., 2022). Pour y répondre, le plan Ecophyto, lancé à la suite du Grenelle de l'environnement en 2008 a subi plusieurs révisions en 2015, 2018 et 2024 en conservant un objectif de réduction de 50 % de l'utilisation des pesticides. Dans le cadre de la stratégie Ecophyto 2030, cette réduction d'emploi s'accompagne d'un plan d'anticipation du retrait des substances actives PARSADA pour éviter les impasses techniques en viticulture.

Afin de parvenir à cette réduction des produits phytosanitaires de synthèse, la stratégie Ecophyto 2030 identifie le recours aux solutions de biocontrôle et leur intégration dans une démarche globale de protection agroécologique. Le biocontrôle désigne un ensemble de méthodes de protection des végétaux reposant sur l'utilisation de mécanismes naturels (macro-organismes, micro-organismes, médiateurs chimiques comme les phéromones, ou encore des substances d'origine naturelle végétale, animale ou minérale) pour réguler les populations de bioagresseurs. Cette stratégie, qui s'inscrit également dans la transition agroécologique (Altieri *et al.*, 2017 ; Gary *et al.*, 2017), correspond à un véritable changement de paradigme. Ces solutions ont des efficacités souvent partielles qui peuvent paraître plus risquées et dont la maîtrise est moins aisée. Aussi, l'adoption de ces solutions par les professionnels au sein des itinéraires techniques est actuellement encore limitée.

D'après la synthèse Dephy FERME 2023, l'IFT Biocontrôle en viticulture conventionnelle était en moyenne de 2,4 points sur la période 2018-2020 soit 20 % de l'IFT Total hors herbicide. Malgré une augmentation de l'utilisation de l'IFT Biocontrôle de 50 %, le recours au biocontrôle par les professionnels reste faible et s'appuie essentiellement sur des produits fongicides comme le soufre mouillable, le phosphonate de potassium et l'huile essentielle d'orange douce. Le soufre mouillable représente notamment 85 % des applications de biocontrôle (Nefti et al, 2024).

Le projet Biocontrôle et Equilibre de l'Ecosystème vigne vise à concevoir et évaluer des systèmes viticoles agroécologiques favorisant l'intégration des produits de biocontrôle pour réduire drastiquement l'IFT hors biocontrôle. La réflexion répond à une nécessité de réduction des produits phytopharmaceutiques et d'anticipation du retrait de substances actives chimiques clefs pour la viticulture française, tout en assurant le maintien des rendements et de la qualité des vins. Les stratégies intègrent la gestion de la santé du sol, des mesures prophylactiques pour modifier la structure de la plante, et l'utilisation de produits de biocontrôle.

2. Matériels et méthodes

2.1. Conception du système de protection agroécologique de la vigne

- Un prototype de système de protection agroécologique de la vigne a été créé dans le cadre du projet Biocontrôle et Equilibre de l'Ecosystème vigne. Ses objectifs sont (**Tableau 1**) :
- de réduire de 75 % l'IFT hors-biocontrôle par une utilisation privilégiée des produits de la liste biocontrôle ;
- d'exclure l'utilisation des herbicides chimiques ;



- de garantir un rendement et une qualité en adéquation avec les besoins des viticulteurs.

Tableau 1 : Cadres de contraintes des sites mis en œuvre dans le cadre du projet BEE. (AOP : Appellation d'Origine Protégée)

Caractéristiques		A46ROD	A46CHI	A46JUI	A46SAI	A46WIN
Objectifs	Environnementaux	-75 % de l'IFT hors-biocontrôle. Pas d'utilisation de produits Cancérogènes Mutagène ou Reprotoxiques et Perturbateurs Endocriniens. Aucun herbicide. Intégrer la diversité des solutions de biocontrôle disponibles.				
	Agronomiques	Rendements et qualité conformes aux AOP en tenant compte du potentiel agronomique de la parcelle.				
Leviers	Efficience	Utilisation de la méthode Optidose pour optimiser le dosage des fongicides cupriques, pulvérisation confinée (A46JUI), Application phytosanitaire différenciée sur les feuilles et les grappes (A46SAI)				
	Atténuation	Couverts végétaux en hiver, enherbement, réduction de la fertilisation azotée, effeuillage (A46WIN et A46SAI)				
	Biocontrôle	Règle de décision pour intégrer la diversité des modes d'action de biocontrôle en fonction du risque de développement des maladies				
	Lutte physique	Entretien mécanique du cavaillon,			Paillage durable du cavaillon	

L'itinéraire de gestion du sol se base sur l'utilisation d'engrais verts pour protéger les sols de l'érosion et créer des conditions favorables à une alimentation durable de la plante. En complément, des apports d'engrais organiques sont raisonnés pour fournir les ressources nécessaires à l'élaboration du rendement sans créer d'excès de vigueur favorable à l'installation et au développement des bioagresseurs. L'entretien du sol est réalisé sans recours aux herbicides chimiques soit par un entretien mécanique du cavaillon soit par l'utilisation d'un paillage durable. Le contrôle cultural permet de limiter le développement de la pourriture grise (enherbement, limitation de la fertilisation, effeuillage).

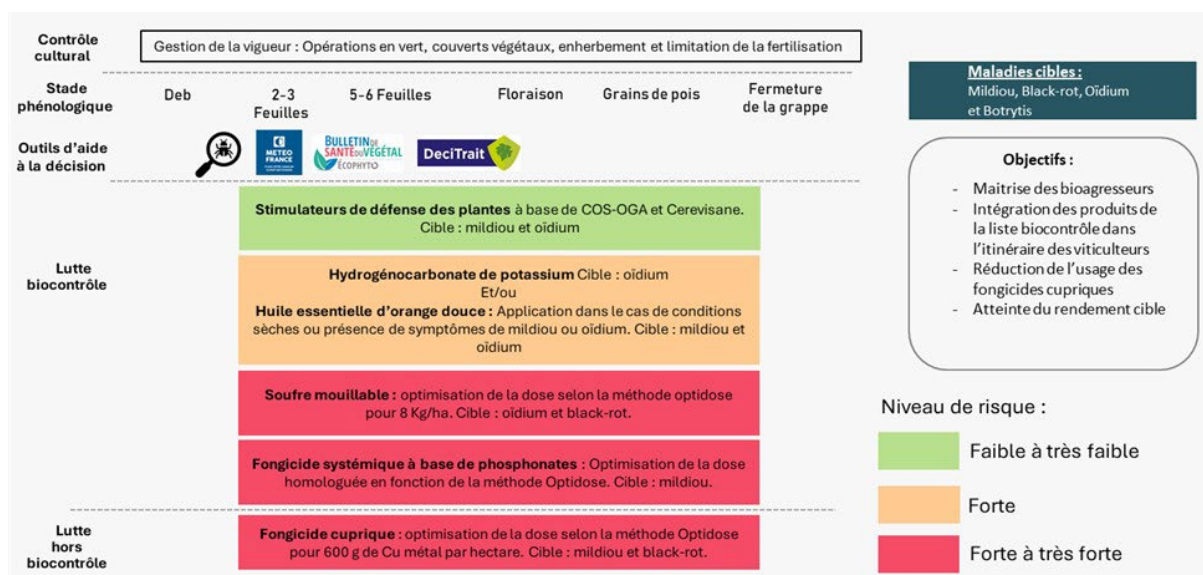


Figure 1 : Système décisionnel pour la gestion des maladies cryptogamiques

L'utilisation complémentaire de produits de biocontrôle permettant une protection du végétal reste cependant indispensable. La protection de la vigne contre le mildiou et l'oïdium s'appuie essentiellement sur les matières actives issues de la liste des produits de biocontrôle (**Figure 1**). Les produits stimulateurs des défenses des plantes sont positionnés préventivement en début de saison ou



sur un niveau de pression faible pour préparer la plante à résister aux bio-agressions. Des produits avec une action fongicide sont utilisés pour freiner le développement des bioagresseurs. Les produits dont l'efficacité est confirmée comme les phosphonates, le soufre et le cuivre sont utilisés sur une pression forte à très forte avec une dose modulée par l'outil d'aide à la décision Optidose®. La protection contre le black-rot est assurée par l'effet indirect de ces substances actives. Des règles de décision sont proposées pour positionner ces matières actives efficacement dans l'itinéraire des viticulteurs et profiter de leur polyvalence. Les indicateurs de décision sont relevés par des observations simples à l'îlot de production et l'utilisation de l'outil d'aide à la décision Decitrait®. Decitrait® intègre les données climatiques Météo France, le modèle potentiel système®, Optidose® et une estimation de la rémanence des produits utilisés. Sur les sites sensibles aux tordeuses de la grappe, la confusion sexuelle est utilisée.

2.2. Dispositif expérimental

Le projet dispose de 5 sites expérimentaux en viticulture conventionnelle à l'échelle nationale (Tableau 2). L'intérêt de ce déploiement est d'évaluer nos règles de décision sur des zones climatiques différentes (océaniques, méditerranéennes et continentales). En effet, les pressions parasitaires observées dans les différents bassins de productions peuvent varier entre années et entre régions de production de façon significative.

Tableau 2 : Description des systèmes DEPHY mis en œuvre sur le réseau BEE

Caractéristiques	A46ROD	A46CHI	A46WIN	A46JUI	A46SAI
Appellation	AOP Costières de Nîmes Rouge	AOC Chinon Rouge	AOP Crémant d'Alsace	AOP Cognac	AOC Saint Estèphe
Climat	Méditerranéen	Océanique	Semi-continentale tempéré	Océanique	Océanique
Sol	Argilo-calcaire	Sableux à Sablo-argileux	Limoneux	Argile lourde	Sableux à Argilo-sableux
Cépage	Syrah	Cabernet Franc	Pinot Blanc	Ugni Blanc	Merlot noir
Commune	Rodilhan	Chinon	Wintzenheim	Juillac le Coq	Saint Estèphe
Surface (ha)	0,4	0,35	0,3	0,6	0,35
Nombre de répétitions	4	1	3	3	4
Largeur des bandes (nombre de rangs)	5	10	7	10	7
Information sur la production	5000 ceps/ha, Cordon de Royat	5000 ceps/ha, Guyot simple	4850 ceps/ha, Guyot double	2600 ceps/ha, Guyot double	9100 ceps/ha, Guyot double
Objectifs de rendement par ha	60 hl	55 hl	80 hl	130 hl	50 hl

Le dispositif expérimental compare deux modalités : une référence (REF) et le système BEE. Elles sont composées de rangs entiers et constituent des bandes avec plusieurs répétitions. La largeur des bandes permet l'emploi de tous les équipements utilisés sur les propriétés viticoles. Les parcelles disposent d'un témoin non traité inclus à la parcelle pour évaluer la pression sanitaire locale du millésime.

2.3. Analyse statistique des résultats

Nous utilisons les tests statistiques ci-dessous pour analyser les données avec le logiciel RStudio :

- des tests paramétriques d'analyses de variance à un et deux facteurs au seuil de risque de 5 %, suivis d'un test de Newmann-Keuls ou d'un test de Tuckey pour différencier les modalités selon différents groupes statistiques ;



- des tests non paramétriques : une comparaison des médianes au seuil de risque de 5 % par le test de Kruskal-Wallis pour un échantillon supérieur à deux, ou par le test de Wilcoxon pour deux échantillons. Le test post-hoc choisi est Conover-Iman. La sommation des rangs permet le classement des facteurs étudiés.

2.4. Evaluation des performances

Les variables utilisées pour évaluer les performances de notre système sont présentées dans le tableau ci-dessous. L'évaluation multicritère a été faite à l'aide de la méthode INDIGO®-vigne (Thiollet-Scholtus et al. 2015), comme dans les projets SALSA et DiverViti (Amiot et al., 2024 ; Lafond et al., 2024).

Tableau 3 : Liste non exhaustive des variables utilisées pour la rédaction de l'article

Variable	Abrév.	Unité	Valeur
Identifiants			
Année de l'étude	Millésime	Nombre	2018 ; 2019 ; 2020 ; 2021 ; 2022 ; 2023
Parcelle	A46_JUI	Catégorie	A46_JUI : Juillac le Coq en Charente (16) ; A46_WIN : Wintzenheim en Alsace (68) ; A46_SAI : Saint Estèphe en Gironde (33) ; A46_ROD : Rodilhan dans le Gard (30) ; A46_CHI : Chinon dans l'Indre et Loire (37)
Traitement	Traitement	Catégorie	BEE : Système innovant testé dans le projet ; REF : Référence exploitation ; TNT : Témoin non traité inclus à la parcelle d'expérimentation
Variables agronomiques			
Objectif de rendement	TY	HI/ha	Objectif de rendement initial par zone viticole
Rendement	Rdt	HI/ha	
Pourcentage d'atteinte des objectifs de rendement	YAR	%	$YAR = 100 * (Rdt / TY)$
Variables sur la mise en œuvre des produits phytopharmaceutiques			
Nombre d'applications phytosanitaires	NP	Nombre	Nombre de passages pour appliquer un à plusieurs produits sur une parcelle.
Nombre de traitements phytosanitaires	NT	Nombre	Le traitement phytosanitaire est l'application d'un produit lors d'un passage.
IFT Enquête Agreste ITK 2016	ITK 2016	Nombre	IFT de référence issue de l'enquête pratiques phytosanitaires en viticulture en 2016
IFT Total HH	IFTT	Nombre	Nombre de doses de référence de produits phytopharmaceutiques hors herbicides chimiques (HH)
IFT Hors Biocontrôle HH	IFTHB	Nombre	Nombre de doses de référence de produits phytopharmaceutiques hors biocontrôle HH
IFT Biocontrôle HH	IFTB	Nombre	Nombre de doses de référence de produits phytopharmaceutiques biocontrôle HH
Cuivre métal par hectare	Cu métal/ha	Nombre	Quantité de la substance active "composés du cuivre" appliquée par hectare annuellement
Prix du calendrier de traitement HH	PPP Coût/ha	Nombre	Calcul des prix HH avec le coût des fournitures en Viticulture et Œnologie
Variables sur la maîtrise des bioagresseurs			
Mildiou sur feuille intensité	MFI	%	Mesure après la véraison
Mildiou sur feuille	MGI	%	Mesure après la fermeture de la grappe
Oïdium sur feuille intensité	OFI	%	Mesure après la véraison
Oïdium sur feuille	OGI	%	Mesure après la fermeture de la grappe
Black-rot sur feuille intensité	BFI	%	Mesure après la véraison
Black-rot sur feuille	BGI	%	Mesure après la fermeture de la grappe
Cumul des dégâts sur le feuillage	FI	%	$FI = BFI + OFI + BFI$

3. Résultats

3.1. Usage des produits phytopharmaceutiques

L'analyse des résultats statistiques pour la thématique de l'usage des produits phytopharmaceutiques sur les modalités référence et BEE est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : P-values obtenues après réalisation d'un test de Wilcoxon appariés pour le facteur traitement et un test de Kruskal Wallis pour les facteurs millésime et parcelle. L'effet parcelle est testé uniquement sur le traitement BEE. Les valeurs en gras indiquent des différences significatives au seuil de 5 %. Le rang de chaque parcelle est indiqué par les lettres définies par le test de Conover-Iman. Le classement est décroissant.

Indicateurs	Traitement	Millésime	Parcelle	Test post hoc avec le facteur Parcelle				
	P value	P value	P value	A46_SAI	A46_JUI	A46_WIN	A46_ROD	A46_CHI
Nombre de passages	0,55	0,91	<0,01	14a	10b	7d	8c	3e
Nombre de traitements	0,98	0,69	<0,001	33a	28a	18b	19b	7c
IFT Biocontrôle	<0,001	0,44	<0,001	16,16a	15,82a	11,73ab	9,04bc	3,96c
IFT hors biocontrôle	<0,001	0,8	<0,001	4,33a	4,4a	0,58b	2,78a	0,98b
IFT Total	<0,01	0,51	<0,01	20,48a	20,21a	12,31b	11,82b	4,94c
Cu métal/ha/an	0,74	0,74	<0,01	3,22a	3,03a	1,36b	0,72b	0,46b
PPP Coût/ha	<0,001	0,54	<0,001	759a	871a	497b	466b	169c

Nombre d'applications phytosanitaires et de traitements :

Nous n'observons pas une différence statistique entre le système BEE et la référence exploitation au niveau du nombre d'applications phytosanitaires et du nombre de traitements (**Tableau 4**). **Les règles de décision du projet BEE n'entraîne pas une augmentation du nombre d'applications phytosanitaires et du nombre de traitements par rapport à la référence exploitation.** Nous relevons en moyenne pour le système BEE 8 applications phytosanitaires et 20 traitements phytosanitaires. L'analyse non paramétrique montre un effet de la région viticole sur ces deux indicateurs. En effet, le nombre d'applications phytosanitaires et de traitements est plus élevé en Nouvelle-Aquitaine par rapport aux régions Grand-Est, Occitanie et Centre-Val de Loire.

Usage des solutions de biocontrôle et indice de fréquence de traitement :

Les substances de biocontrôle utilisés majoritairement sont le phosphonate de potassium, le disodium phosphonate, l'Huile Essentielle (HE) d'orange douce, le COS-OGA, le soufre mouillable, la Cerevisane, l'hydrogencarbonate de potassium et la confusion sexuelle (Figure 2).

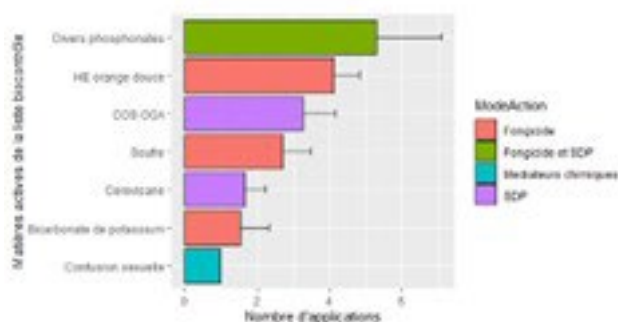


Figure 2 : Nombre moyen d'applications par année des substances actives de la liste biocontrôle pour l'ensemble des systèmes BEE sur le réseau

Le système BEE montre une réduction de l'IFT hors-biocontrôle de 70 % par rapport à la référence exploitation et 83 % par rapport à l'enquête des pratiques phytosanitaires Agreste 2016 (**Figure 3**). Il s'est également affranchi de

l'utilisation de produits phytopharmaceutiques Cancérigène, mutagène, et reprotoxique et suspectés



perturbateurs endocriniens. L'IFT hors-biocontrôle regroupe l'utilisation de fongicides cupriques et d'insecticides pour la lutte obligatoire contre la flavescence dorée. La quantité de cuivre métal utilisée par ha et par an est en moyenne de 1,65 Kg. Elle ne se différencie pas de la référence exploitation. La quantité de cuivre métal utilisée est significativement plus élevée en Nouvelle-Aquitaine que dans les régions Grand-Est, Occitanie et Val de Loire Centre.

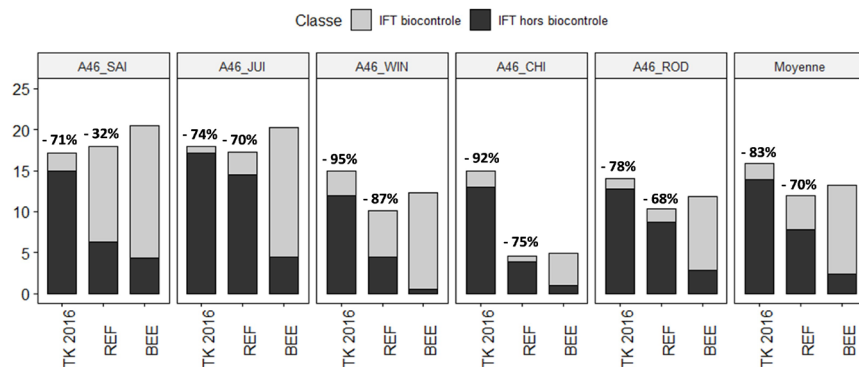


Figure 3 : IFT de références obtenues via l'enquête sur l'itinéraire technique (ITK) Agreste et moyenne des IFT de 2018 à 2023 sur les traitements BEE et REF séparés par site d'essai. Le pourcentage affichait représente la réduction de l'IFT hors-biocontrôle

de BEE par rapport à l'enquête ITK 2016 et la référence exploitation.

Malgré une réduction de l'IFT hors-biocontrôle conforme à l'objectif formulé de 75 %, l'IFT total sur la modalité BEE est significativement supérieur à la référence exploitation. En effet, l'itinéraire BEE mobilise plusieurs solutions à efficacité partielle en synergie tandis que sur la référence, un produit chimique peut à lui seul suffire pour la maîtrise des bioagresseurs. La part du biocontrôle dans l'IFT Total est de 83 % pour le système BEE contre seulement 30 % pour la référence exploitation. Nous observons pour l'itinéraire BEE une augmentation de l'IFT biocontrôle de 178 % par rapport à la référence exploitation et 491 % par rapport à la référence Agreste 2016. Les indicateurs relevés liés à l'utilisation de produits phytopharmaceutiques sont significativement plus élevés en Nouvelle-Aquitaine que dans les autres régions. Ce phénomène s'explique d'une part par une pression mildiou moins importante en Occitanie et en Alsace et d'autre part par des conditions très locales défavorables au mildiou pour la région Val de Loire Centre.

Le coût total moyen des produits phytopharmaceutiques utilisés est significativement plus élevé sur la modalité BEE que la REF avec un surcoût de 20 %. Cette augmentation s'explique par un IFT total plus élevé (+15 %) et un coût par IFT supérieur pour les solutions de biocontrôle. Le problème économique de l'intégration de la diversité des solutions de biocontrôle se pose aux viticulteurs. En effet, une optimisation peut se réaliser en sélectionnant les produits dont le rapport « coût-efficacité » ou la polyvalence avec une action sur plusieurs cibles est effective.

3.2. Performances agronomiques

3.2.1. Contexte parasitaire sur la période 2018-2023

Le mildiou est la maladie majoritairement observée sur notre réseau entre 2018 et 2023. Un niveau de destruction des grappes supérieur à 50 % est observé sur les témoins non traités 2 années sur 3 en Nouvelle-Aquitaine (2018, 2020, 2021, 2023), 1 année sur 2 en Occitanie (2018, 2020, 2023) et 1 année sur 3 en Val de Loire (2018, 2023). Bien que la pression soit globalement plus faible en Alsace, l'année 2021 se caractérise par une pression mildiou extrême dans la région Grand-Est. Le black-rot et l'oïdium sont observés localement voire sporadiquement. En effet, ces maladies ont été observées sur les grappes dans seulement 40 % des cas d'étude pour l'oïdium et 25 % des cas pour le black-rot. Seul le site A46_JUI a présenté une pression régulière et forte avec en moyenne sur les témoins non traités 25 % des baies oïdiées et 19 % des baies détruites par le black-rot.

3.2.2. Maitrise des bioagresseurs

L'analyse des résultats statistiques pour la thématique de la maitrise des bioagresseurs est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : P-values obtenues après réalisation d'un test de Kruskal-Wallis pour le facteur traitement. Le test post-hoc choisi est Conover-Iman. Les valeurs en gras indiquent des différences significatives au seuil de 5 %. L'efficacité moyenne en % est calculé sur l'échantillon des parcelles avec une intensité d'attaque supérieur à 5 %.

Maladies	Intensité d'attaque (%)	Traitement	Post-hoc Conover iman			Efficacité moyenne par rapport au témoin non traité (TNT)(%)		
		P-value	BEE	REF	TNT	Echantillon	BEE	REF
Mildiou	Feuilles	<0,01	6,2 b	3,2 b	21,8 a	18	77	84
	Grappes	<0,05	12,9 ab	4,3 b	30,4 a	15	69	90
Oïdium	Feuilles	<0,01	2,2 b	0,7 b	13,4 a	13	87	95
	Grappes	0,14	1	0,2	10,8	9	85	97
Black-rot	Feuilles	0,14	0,07	0,04	0,28	0		
	Grappes	0,85	0,16	0,04	4,2	5	97	100
Cumul mildiou-oïdium-black-rot	Feuilles	<0,001	8,5 b	3,9 b	35,5 a	24	73	86
	Grappes	<0,01	14,1 b	4,5 b	45,4 a	19	74	92

Cumul des dégâts mildiou, oïdium et black-rot

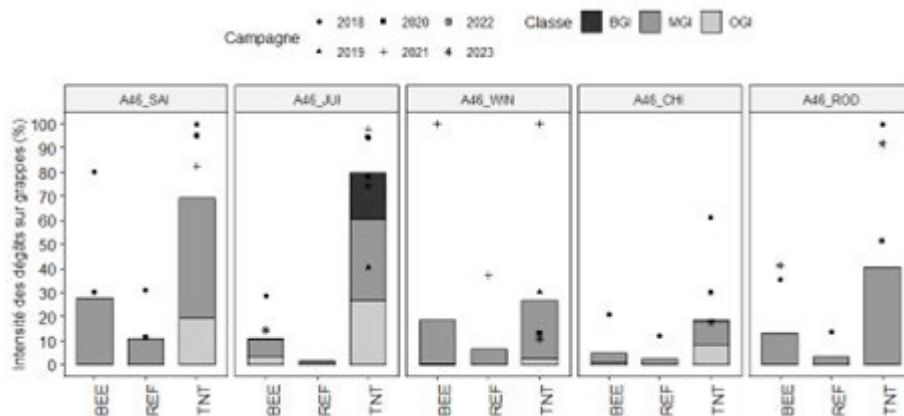


Figure 4 : Intensités totales moyennes sur la période 2018-2023 des maladies à la récolte (en %). Les valeurs totales sont présentées par année sous la forme d'un nuage de points. MGI : Mildiou intensité sur les grappes, BGI : Black-rot intensité sur les grappes et OGI : Oïdium intensité sur les grappes.

L'intensité d'attaque sur le feuillage à la récolte évalue indirectement l'impact de notre système sur la maturation des raisins et la mise en réserve. Une différence du cumul des dégâts mildiou – oïdium – black-rot sur les feuilles ($p < 0.001$) et les grappes ($p < 0.001$) est significative entre les modalités BEE, REF et TNT. Le test post-hoc de Conover Iman montre une différence entre le témoin non traité sur site (groupe A) et les modalités traitées (Groupe B) pour les feuilles et les grappes. Un effet site est mis en évidence : le cumul de dégâts est significativement plus important en Nouvelle-Aquitaine que dans les autres régions. Un test de Wilcoxon montre une différence de cumul des dégâts significative entre les modalités REF et BEE ($p < 0.01$).

Mildiou

Nos règles de décision ont permis une protection du feuillage similaire à la référence. Les résultats sont plus contrastés pour la protection des grappes. L'efficacité de nos règles de décision dépend fortement de la pression des maladies, notamment du mildiou. Sous une pression modérée (<60 % de grappes



détruites sur témoins non traités), leur efficacité par rapport au TNT est comparable à la référence avec moins de 10 % de dégâts dans 95 % des cas. En cas de forte pression (>60 %), l'efficacité chute alors à 53 %, contre 85 % pour la référence.

Le millésime 2018 s'est caractérisé par des conditions climatiques orageuses très favorables au développement du mildiou et par une pousse active de la vigne. Ces conditions agro climatiques ont complexifié la culture de la vigne tant pour la protéger que pour l'entretenir en Nouvelle-Aquitaine, Val de Loire et en Occitanie. Dans le contexte du millésime 2018, l'objectif de stimuler les défenses de la plante strictement avant les premières contaminations mildiou avec l'application de COS-OGA seul n'a pas été possible et une présence de mildiou régulière a été observée dès la floraison. Sur l'ensemble des cas d'étude toutes années confondues, le millésime 2018 représente 57 % des cas d'échec pour la modalité BEE et 60 % pour la modalité référence. A la suite de cette première année, nos règles de décision ont été corrigées pour mieux prendre en compte les risques d'orages. D'autres échecs ont été observés et s'expliquent par des difficultés à renouveler les applications dans un contexte de forte pousse et de pluies régulières (A46WIN – 2021, A46SAI – 2020) ou une mauvaise évaluation du risque de développement des maladies en début de campagne (en 2023 à Rodilhan).

Oïdium et black rot

Pour l'oïdium, nos règles de décision utilisant 100 % de biocontrôle ont permis de rester en dessous du seuil de 10 % de baies oïdiées avec un recours raisonné au soufre mouillable avec en moyenne 15 kg/ha/an et une intégration plus large des solutions de la liste biocontrôle. Pour le black-rot, dans le cas du site de Juillac le Coq avec une forte pression, l'effet indirect des règles de décision de lutte contre le mildiou et l'oïdium a permis d'obtenir une efficacité de 97 % sur les grappes par rapport au témoin non traité.

3.2.2. Rendements

Le rendement de la modalité BEE en hectolitre par hectare est significativement inférieur à celui de la modalité référence ($p < 0.001$). En effet, une baisse de rendement de 20 % en moyenne, sur l'ensemble du réseau et tous millésimes confondus, est observée par rapport à la référence. La différence de rendement ne s'explique pas uniquement par la présence de mildiou. L'écart de rendement avec la référence est également lié aux changements de pratiques visant à favoriser la prophylaxie et à arrêter l'utilisation des herbicides chimiques.

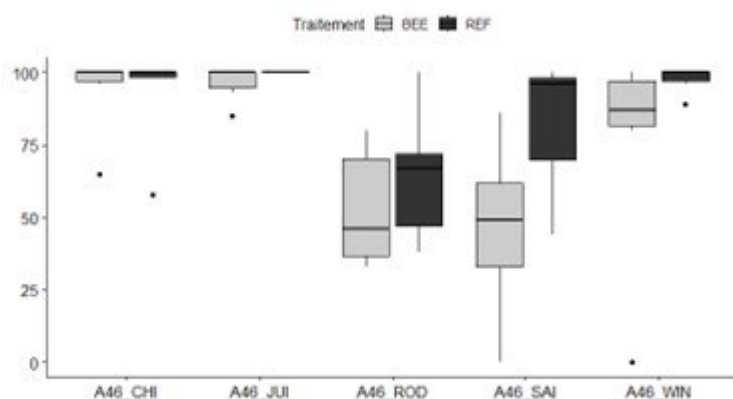


Figure 5 : Pourcentage d'atteinte des objectifs de rendement sur la période 2018-2023 sur le réseau BEE. Les rendements supérieurs aux objectifs ont été ramenés à 100 %.

Le pourcentage d'atteinte des objectifs de rendement est significativement inférieur sur la modalité BEE ($p < 0.01$). Il est de 75 % pour l'itinéraire technique BEE

contre 88 % pour la référence exploitation. L'influence du millésime sur le taux d'atteinte des objectifs de rendement pour la modalité BEE n'a pas été mis en évidence statistiquement ($p = 0.84$). Un effet site sur les parcelles BEE ($p < 0.001$) met en relief les difficultés à atteindre le rendement cible à Saint Estèphe (groupe BC) et Rodilhan (groupe B) par rapport à Chinon et Juillac le Coq (groupe A). Ces difficultés s'expliquent par une mortalité importante des ceps sur la parcelle de Rodilhan liée au

dépérissement de la Syrah et à une année sans récolte à cause du mildiou à Saint-Estèphe en 2018. La parcelle de Wintzenheim (groupe AC) est proche d'atteindre l'objectif de rendement à l'exception du millésime 2021 où l'ensemble de la récolte a été perdu à cause du mildiou.

3.2.3. Évaluation multicritère

L'évaluation multicritère de la modalité BEE a été faite pour les données disponibles pendant le projet. Certains sites ont subi des contraintes d'acquisition de données. Globalement l'évaluation multicritère permet d'identifier les majeurs points faibles à travailler pour améliorer les performances ou la durabilité des systèmes (Figure 6).

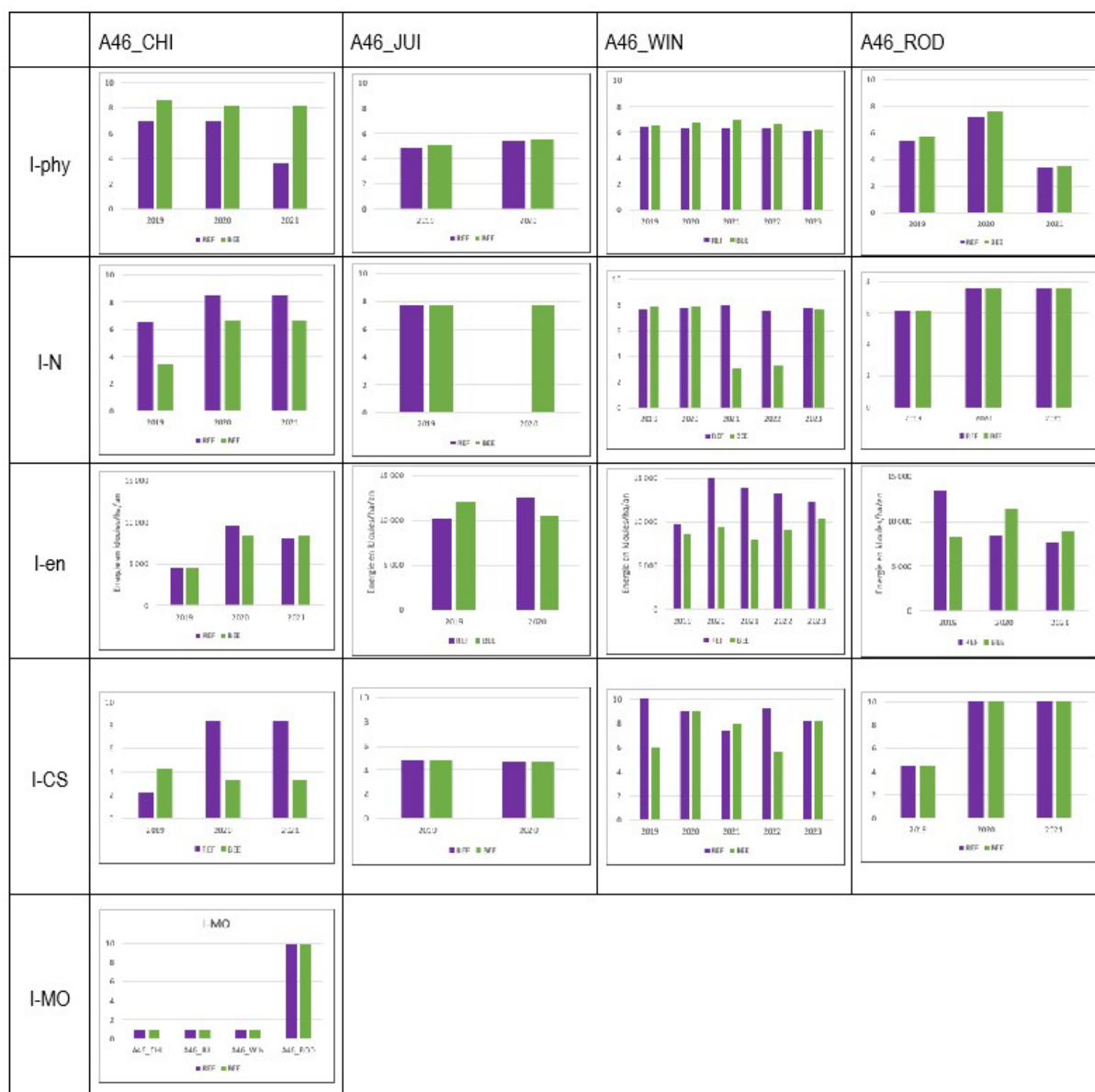


Figure 6 : Indicateurs d'évaluation environnementale par année et par site. I-phy (phytosanitaire), I-N (azote), I-en (énergie), I-CS (couverture du sol), I-MO (matière organique).

Pour le site de Chinon, le point de vigilance est le risque de fuite azotée dans l'environnement (I-N), le risque d'érosion hydrique (I-CS) et le risque de perte de fertilité du sol (I-MO). Pour le site de Cognac, les risques environnementaux concernent l'usage des pesticides (I-phy), l'érosion hydrique des sols (I-CS) et la perte de fertilité du sol (I-MO). Pour le site de Colmar, les risques environnementaux



concernent les fuites d'azote (I-N), la consommation d'énergies fossiles (I-en), l'érosion hydrique (I-CS) et la perte de fertilité du sol (I-MO). Enfin, pour le site de Rodhlan, les risques environnementaux concernent l'usage des pesticides (I-phy), la consommation d'énergies fossiles (I-en) (Figure 6).

4. Discussion

L'utilisation de couverts végétaux est intéressante pour limiter l'érosion, améliorer la vie biologique des sols et mettre à disposition de la plante des éléments nutritifs. Néanmoins, des difficultés ont été observées certaines années pour réaliser les semis et obtenir une levée correcte des couverts. L'apport organique et minéral insuffisant, impose la recherche d'une meilleure synergie entre l'utilisation de couverts végétaux et les amendements organiques. Un outil d'aide à la décision basé sur la méthode du bilan azoté (Cahurel, 2018) est en cours d'expérimentation en viticulture et devrait permettre à l'avenir d'avoir une gestion intégrée de l'installation des couverts végétaux et de la fertilisation azotée.

Dans le cadre du projet, nous avons développé une approche prophylactique centrée sur la plante avec pour objectifs de rendre l'installation des bioagresseurs difficiles par l'aération du feuillage et d'optimiser l'application de produits phytopharmaceutiques ayant un mode d'action fongicide de contact. Une nouvelle voie expérimentée dans le cadre du projet Ecophyto PROFIL (2021-2024) pourrait être de s'appuyer sur des méthodes mécaniques pour extraire les organes végétaux hébergeant les formes de conservation hivernale des maladies cryptogamiques de la vigne. Cette méthode n'était pas utilisée jusqu'à maintenant à cause de l'absence de preuve de son intérêt dans une démarche systémique à long terme.

Pour l'itinéraire de protection, les produits de la liste biocontrôle ont un rôle important à jouer pour accompagner les viticulteurs dans les changements réglementaires à venir en particulier le plan de retrait des substances actives PARSADA. Néanmoins, l'intégration des solutions de biocontrôle dans leur diversité pose question pour les viticulteurs autant techniquement qu'économiquement. Actuellement, les produits avec une action fongicide sont les plus intéressants à mobiliser par les viticulteurs : soufre mouillable, divers phosphonates, bicarbonate de potassium et huile essentielle d'orange douce. En effet, si leur efficacité est parfois partielle, ces solutions ont des modes d'action connus sur le développement des maladies. Les produits stimulateurs de défense strictes et les micro-organismes sont difficiles à maîtriser et nécessitent des études complémentaires pour optimiser leur utilisation dans l'itinéraire des viticulteurs.

5. Conclusion

Le projet BEE « Biocontrôle et Équilibre de l'Écosystème vigne » a proposé à l'échelle nationale une démarche pour intégrer les solutions de biocontrôle dans l'itinéraire des viticulteurs. Cette démarche s'est appuyée sur des leviers simples et rapidement adoptables tels que l'utilisation de couverts végétaux, l'optimisation de la fertilisation, les outils d'aide à la décision et le biocontrôle. Les résultats observés entre 2018 et 2023 montrent une réduction de l'IFT hors-biocontrôle de 83 % sans augmenter le nombre de passages. Le recours au biocontrôle a drastiquement augmenté tandis que l'utilisation de fongicides cupriques s'est limitée à 1,65 kg/ha de cuivre métal/ha en moyenne. La protection contre l'oïdium et le black-rot a donné satisfaction dans l'ensemble des situations observées. La protection contre le mildiou présente une prise de risque plus élevée par rapport à la référence exploitation pour la protection des grappes en particulier sur les millésimes avec une pression très forte. L'approche globale mise en œuvre est responsable d'une baisse du rendement par rapport à la référence exploitation.

L'approche système est très intéressante pour diffuser les résultats aux viticulteurs. Dans ce sens, depuis 2022 et dans le prolongement du projet BEE, le réseau participatif LUMA à Cognac s'appuie sur



une co-construction du réseau Dephy dans la région de Cognac (EXPE et FERME) et propose une utilisation des produits de biocontrôle avec une action fongicide et des fongicides cupriques pour lutter contre les maladies cryptogamiques. Il est piloté par le BNIC en partenariat avec l'IFV, et les Chambres d'agriculture de Charente et Charente-Maritime/Deux sèvres et implique actuellement 24 viticulteurs. En 2023, les résultats montrent une efficacité moyenne de 90 % sur le réseau sur une année avec une très forte pression mildiou. Le système LUMA montre une réduction de l'IFT hors-biocontrôle de 73 % en 2022 et 66 % en 2023 sans augmenter le nombre de passages. Le coût supplémentaire du calendrier de traitement est en moyenne de 42€/ha. Il est prévu une étude socio-économique pour évaluer les externalités négatives de la démarche pour les viticulteurs. Les travaux se poursuivent et démontrent l'intérêt de la parcelle vitrine du projet BEE pour créer une dynamique sur le biocontrôle.

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 dans le respect des règles RGPD.

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

Xavier BURGUN : <https://orcid.org/0000-0003-2383-2144>

Marie THIOLLET-SCHOLTUS : <https://orcid.org/0000-0002-9811-7316>

Contributions des auteurs

Xavier BURGUN, Marion LE BOT : Animation du projet, Pilotage du site de Juillac le Coq (16), acquisition de données, conception, rédaction et relecture de l'article

Caroline GOUTTESOULARD, Guillaume DELANOUE, Marc VERGNES, Lionel LEY : Pilotage d'un site expérimental, acquisition de données, rédaction et relecture de l'article

Olivier KEICHINGER : Conception de méthode multicritère, acquisition de données, calculs d'indicateurs.

Marie THIOLLET-SCHOLTUS : Conception de méthode multicritère, écriture de méthodes et de résultats d'évaluation, rédaction et relecture de l'article.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des personnes ayant travaillé sur ce projet : les participants à la conception (experts et participants aux ateliers), les équipes ayant réalisé le suivi de terrain (ingénieurs,



techniciens et stagiaires), les intervenants extérieurs sollicités, les équipes du réseau DEPHY pour leur soutien et les outils mis à disposition, et tous ceux dont les remarques, réflexions et questions ont nourri le projet lors de son élaboration comme lors de sa mise en œuvre.

Déclaration de soutien financier

Ce document a été produit dans le cadre d'une action du plan Ecophyto, piloté par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec l'appui technique et financier de l'Office français de la Biodiversité.

Références bibliographiques

- Altieri M.A., Nicholls C.I., Montalba R., 2017. Technological Approaches to Sustainable Agriculture at a Crossroads: An Agroecological Perspective. *Sustainability* 9, 349. <https://doi.org/10.3390/su9030349>
- Barzman, M., & Dachbrodt-Saaydeh, S. (2011). Comparative analysis of pesticide action plans in five European countries. *Pest Management Science*, 67(12), 1481-1485. <https://doi.org/10.1002/ps.2283>
- Amiot, R., Nefti, O., Keichinger, O., Metral, R., Thiollot-Scholtus, M., Ley, L., Arcens, C., and Delière, L. 2024. La résistance variétale au mildiou et à l'oïdium permet-elle de mettre en œuvre des systèmes viticoles innovants multi-performants à très bas niveau d'intrants? *Innov. Agron.* 98, 87-105. 10.17180/ciag-2024-vol98-art07
- Jean-Yves Cahurel, Florent Bidaut, Xavier Crété, Nathalie Damay, Pascal Dubrulle, et al.. 2018. N-Pérennes, un outil de raisonnement de la fertilisation azotée en cultures pérennes : application à la vigne et à certains arbres fruitiers. *Innovations Agronomiques*, 63, pp.433-443. <https://hal.science/hal-01848562v1>
- Fouillet E., Delière L., Chartier N., Munier-Jolain N., Cortel S., Rapidel B., Merot A., 2022. Reducing pesticide use in vineyards. Evidence from the analysis of the French DEPHY network. *European Journal of Agronomy* 136. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126503>
- Lafond, D., Delanoue, G., Fortin, E., Garin, P., Keichinger, O., Tabuteau, L., and Thiollot-Scholtus, M. 2024. Diversifier le peuplement végétal des parcelles viticoles pour réduire les usages de pesticides : le projet DiverViti. *Innov. Agron.* 98, 69-86. <https://doi.org/10.17180/ciag-2024-vol98-art06>
- Nefti, O., Chartier, N., Merot, A., Peyrard, T. and Delière, L., (2024). To what extent can a phase-out of pesticides in viticulture be achieved? Learning from the efforts of a large farm network after 10 years. *OENO One*, 58(2). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.2.7885>
- Thiollot-Scholtus, M., and Bockstaller, C. 2015. Using indicators to assess the environmental impacts of wine growing activity: the INDIGO® method. *Eur. J. Agron.* 62, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.09.001>
- Sophie Trouvelot, Xavier Burgun. 2024. Les solutions de biocontrôle dans les agrosystèmes viticoles, des innovations diffusables à grande échelle ? *Innovations Agronomiques*, 91, pp.28-37. (10.17180/ciag-2024-vol91-art03). (hal-04570844)

Pour citer cet article : Xavier Burgun, Marion Le Bot, Caroline Gouttesoulard, Guillaume Delanoue, Marc Vergnes, et al.. Le projet BEE, une démarche de protection agroécologique de la vigne pour intégrer le biocontrôle. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.188-200. [10.17180/ciag-2026-vol109-art15](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Le projet NextGenViti un laboratoire pour des solutions innovantes, les apports de la robotique et de la pulvérisation fixe pour la réduction des pesticides en viticulture

Christophe GAVIGLIO¹

¹ Institut Français de la Vigne et du Vin, pôle Sud-Ouest, 1920 route de Lisle sur Tarn, 81310 Peyrole

Correspondance : christophe.gaviglio@vignevin.com

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art16>

Résumé

Le projet DEPHY EXPE NextGenViti, mené de 2019 à 2024, sur 3 sites différents a permis de tester la combinaison de différents leviers de réduction des intrants, dont la robotique pour l'entretien du sol, avec l'objectif de réduction du temps de travail associé au désherbage mécanique. Si seul l'IFT (Indice de Fréquence de Traitement) herbicide est concerné par ce levier, il a profondément évolué durant le projet et son intégration dans l'itinéraire de culture, ainsi que l'évolution de la performance sont les points les plus intéressants que nous pouvons retenir. La pulvérisation fixe a également été évaluée dans le projet, avec moins de succès, mais cela a permis d'identifier les axes d'amélioration nécessaires à un éventuel développement ultérieur. Les autres leviers utilisés dans le projet, en combinaisons avec ces deux leviers technologiques, sont la modalisation de la pression épidémiologique, le maintien d'une certaine diversité dans les parcelles avec des couverts végétaux, la favorisation de la présence des auxiliaires et l'utilisation préférentielle des solutions de biocontrôle.

Mots-clés : Innovation, robotique, biocontrôle et pulvérisation fixe

Abstract: the contributions of robotics and automation to the reduction of pesticides in viticulture

The DEPHY EXPE NextGenViti project, carried out from 2019 to 2024, tested the combination of different input reduction levers, including robotics for soil maintenance, with the objective of reducing the working time associated with mechanical weeding. Although only the herbicide IFT is concerned by this lever, it has evolved profoundly during the project and its integration into the cultivation itinerary, as well as the evolution of the performance are the most interesting points that we can remember. Stationary spraying was also evaluated in the project, with less success, but this helped to identify areas for improvement needed for possible further development.

Keywords: Innovation, robotics, biocontrol and stationary spraying

1. La robotique dans le projet : intérêt, enjeux, performances obtenues

1.1. Intérêt et enjeu dans le projet

Les projets DEPHY EXPE, suivis à l'échelle des systèmes de production, visent à réduire de manière très significative l'usage des produits phytosanitaires. Contrairement aux projets suivis dans les dispositifs DEPHY FERME, l'idée est de pouvoir expérimenter des systèmes dits en rupture, s'éloignant des pratiques les plus usuelles déjà en place chez les vignerons. La robotique s'inscrit bien dans cette logique car, au début du projet elle était encore très peu diffusée.

La suppression de l'IFT herbicide passe par le recours au désherbage mécanique sous le rang, les inter-rangs étant depuis longtemps enherbés et / ou travaillés. La principale difficulté lors de cette



transition est la gestion du temps de travail associé à la répétition des interventions en fonction des conditions météo rencontrées lors du millésime. L'autre difficulté est d'ordre technique puisque cela implique d'utiliser des outils de travail du sol très près des souches, avec un risque de blessure réel sur ces dernières. Les robots de binage répondent à ces deux difficultés en ajoutant un intérêt supplémentaire en termes de réduction de l'énergie utilisée pour le désherbage (Gaviglio, 2023).

L'enjeu dans le projet était d'évaluer l'intégration de la robotique dans l'itinéraire de production, et d'évaluer la performance intrinsèque de ce levier, tant en termes de capacité de travail que d'efficacité dans la gestion des adventices, et ce sur 3 sites distincts ayant des cadres de contraintes différents.

Tableau 1 : Caractéristiques essentielles des 3 sites expérimentaux vis-à-vis des leviers testés.

	Densité de plantation	Objectif de production	Topographie	Valorisation attendue de production
GAILLAC AOP	4 545 pieds / ha	50 hl / ha	Plane	Moyenne
GERS IGP	3 800 pieds / ha	90 hl / ha	Valonnée	Faible
BEAUJOLAIS AOP	8 000 pieds /ha	50 hl /ha	Pentue	Forte

1.2. La sélection des robots au démarrage du projet, évolution

Au moment du montage du projet, en 2018, Naïo Technologies est le principal acteur de la robotique viticole en France. Nous cherchions un constructeur capable de se projeter sur 6 ans, et de fournir au projet des mises à jour technologiques pertinentes sur cette durée, au travers d'un contrat de location qui permettait de planifier un budget sur cette durée. Le cahier des charges était d'équiper 3 sites différents en termes de densité de plantation, de topographie et de sol, pour réaliser du binage interceps. Nous aurions pu choisir de remettre en question la sélection de ce fournisseur chaque année, mais le mode de financement et le budget fixé dès le départ ne le permettait pas.

Le projet a démarré en 2019 avec la location de 3 robots Ted (Version 1), un pour chaque site.



Photo 1 : Robot Ted (Version 1) de la société Naïo Technologies, équipé des interceps mécaniques Vitimeca, crédit photo IFV CG

Au moment du montage du projet, en 2018, Naïo Technologies est le principal acteur de la robotique viticole en France. Nous

cherchions un constructeur capable de se projeter sur 6 ans, et de fournir au projet des mises à jour technologiques pertinentes sur cette durée, au travers d'un contrat de location qui permettait de planifier un budget sur cette durée. Le cahier des charges était d'équiper 3 sites différents en termes de densité

de plantation, de topographie et de sol, pour réaliser du binage interceps. Nous aurions pu choisir de remettre en question la sélection de ce fournisseur chaque année, mais le mode de financement et le budget fixé dès le départ ne le permettait pas.

Le projet a démarré en 2019 avec la location de 3 robots Ted (Version 1), un pour chaque site.

Cette première version du robot, déclinée dans des dimensions différentes pour pouvoir fonctionner aussi bien dans des vignes étroites que dans des vignes larges avait les caractéristiques suivantes : 4 roues motrices et directrices, une arche pour enjamber le rang, des capteurs de contact (bumpers) à l'avant, deux systèmes de relevage d'outils à l'arrière (photo 1). Le robot était équipé d'outils interceps mécaniques passifs de la marque Vitimeca, ainsi que de rotors de binage Kress. L'action des outils est complémentaire : binage à plat pour les lames et fractionnement pour les rotors.

Les limites de cette première version en termes de puissance, capacité de traction et relevage des outils ont amené notre fournisseur à apporter des modifications sensibles qui ont pu être déployées sur le terrain en 2022, mais pas pour tous les sites expérimentaux : le site de Gaillac a reçu un Ted V2 (enjambeur), le site du Beaujolais a reçu un Jo (robot interligne étroit à chenilles) et le site de Mons dans le Gers a conservé le Ted V1. Ces choix sont liés à la répartition du budget, fortement impacté par l'augmentation du tarif de location du robot Ted V2. Celui-ci est toujours enjambeur, mais sa puissance est augmentée et surtout la position des outils est optimisée, comme sur un tracteur enjambeur, avec un système de perches entre les roues avant et les roues arrière qui permet de conserver les outils interceps à l'intérieur du gabarit du robot, et non avec un déport important à l'arrière comme c'était le cas avec la première version (photo 2). On observe ici un changement de paradigme intéressant vis-à-vis de la mécanisation du vignoble traditionnelle : en vignoble étroit il est plus simple de travailler avec un tracteur enjambeur et en vignes larges avec un tracteur interligne. Ici avec les robots, en vignes étroites (Beaujolais) on préfère utiliser un robot à chenilles étroit qui passe entre les rangs, et sur les deux autres sites en vignes larges nous avons des robots enjambeurs. Ceci est lié à l'usage principal

de ces robots : le désherbage mécanique sous le rang. La position des outils est optimisée dans les deux configurations.



Photo 2 : Version 2 du robot Ted, déployé sur le site de Gaillac à partir de juin 2022, équipé d'interceps mécaniques Perrein, crédit photo IFV CG

1.3. Performance, avantages et inconvénients

Le projet a permis d'observer les progrès accomplis dans le domaine de la robotique, avec Naïo Technologies en particulier, car entre la première et la deuxième version du robot le nombre d'interventions et la vitesse de celles-ci ont beaucoup changé.

Voici une synthèse des enseignements en matière de robotique viticole apportés par le projet, dans le contexte qui est celui du projet NextGenViti : vignes larges, 4 500 pieds par hectare. Nous avons notamment pu évaluer le débit de chantier, le nombre d'interventions annuelles nécessaires, la maîtrise des adventices ainsi que l'hypothèse de départ associée à la robotique viticole qui était : « le déficit de



puissance avec le robot sera compensé par des passages fréquents qui permettront de limiter le développement des adventices à un stade qui serait difficile à gérer ».

1.3.1. Vitesse de travail réelle et débit de chantier

Avec la première version du robot Ted, utilisée jusqu'en 2022, la vitesse maximum en cours de travail était de l'ordre de 3 km/h. Avec des manœuvres prenant jusqu'à 65 secondes à chaque rang, le débit de chantier réel pour une intervention se chiffrait entre 3 et 4 heures par hectare, suivant la longueur des rangs et la durée des arrêts techniques en cours de travail.

La deuxième version a permis de franchir le seuil des 4 km/h avec les outils et l'amélioration de la séquence de manœuvres permettant de gagner de précieuses secondes à chaque changement de rang, le débit de chantier effectif a pu être porté à 2 heures par hectare.

Cet indicateur est très important pour estimer la surface gérable par un robot toute l'année, et calculer son amortissement par hectare et par an. Il permet de dire qu'avec un robot récent, que l'on fait évoluer pendant les heures de travail des employés en charge de sa supervision, on peut désherber mécaniquement 4 hectares par jour. Avec des interventions rapprochées toutes les deux semaines (10 jours ouvrés) en période de pic de désherbage, cela signifie que le robot pourrait gérer l'entretien de 40 hectares en vignes larges.

A noter en 2024 l'intégration de la fonctionnalité « autonomie augmentée » grâce à des capteurs physiques à l'avant du robot qui permettent de détecter une ouverture anormale au niveau du passage des outils. Cela autorise un fonctionnement supervisé à distance, mais avec une réduction de la vitesse nominale (pour des raisons d'inertie et de sécurité) à 2,5 km/h qui est très pénalisante pour le débit de chantier. De plus, ce mode autonome à 100 % a généré beaucoup de faux positifs dans les arrêts de sécurité, ce qui en a réduit l'intérêt. Nous avons estimé, qu'en dehors des interventions pour redémarrer le robot, l'astreinte de supervision humaine ne devrait pas dépasser une heure par jour. Si le superviseur est présent sur la parcelle, les interventions sont plus rapides. La suppression des fausses alertes est un enjeu crucial dans la calibration du dispositif de sécurité.

1.3.2. Nombre d'interventions nécessaires par an, modalités d'intervention

Ce paramètre est très dépendant du millésime. En raison du mode d'action des outils employés par les robots (outils passifs) et de la résistance rencontrée dans le sol, nous avons souvent dû, pour une date d'intervention, doubler le passage du robot, dans un sens puis dans l'autre, pour favoriser le désherbage par la fragmentation des mottes d'une part, et pour limiter la zone non travaillée derrière le pied de vigne d'autre part. Ainsi, pour 7 dates en 2020 avec le Ted V1 nous comptabilisons 14 passages avec le robot (EXPE dans le tableau ci-dessous), ce qui est très supérieur aux interventions avec le tracteur (5, REF). En 2023 avec la version 2 pleinement opérationnelle, nous avons réduit le nombre d'interventions à 6, avec une bonne maîtrise des adventices jusqu'en juillet.

Tableau 2 : Nombre d'interventions par an avec le robot (EXPE), vs avec le tracteur (REF) pour le désherbage mécanique.

		2019	2020	2021	2022	2023	2024
Gaillac	EXPE	2 (+3)	14	4	6	6	6
	REF	5	5	4	4	4	4
Beaujolais	EXPE	NC	4	7	2	6	4
	REF	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Gers	EXPE	NC	3	3	9	10	NC
	REF	NC	NC	NC	NC	NC	NC



NB : introduction du Ted V2 à partir de juin 2022 pour le site de Gaillac ; 2019 est l'année de démarrage, non représentative, 2020 est perturbée par la COVID.

NC : pour la modalité de référence sur les sites du Beaujolais et du Gers : la référence est le désherbage chimique

1.3.3. Maîtrise des adventices

Impact des outils complètement passifs sur la réussite du désherbage :

Les outils passifs présentent l'inconvénient d'un appui fort sur les souches si le croisement sur le rang est important. Si pour limiter ce phénomène on règle les outils au minimum de croisement, la résistance rencontrée dans le sol a tendance à les écarter de la ligne des souches, créant une zone non travaillée, et donc non désherbée. La multiplication des interventions et l'alternance des outils permet d'atteindre cette zone, mais avec une efficacité limitée. Cela a conduit, en 2022, à réaliser un complément de désherbage à la pioche. L'évaluation de la qualité du désherbage a été effectuée grâce à des relevés de surface couverte sous le rang. Elle montre les limites de la première version du robot (Ted V1). A partir de 2022 les relevés sont meilleurs grâce à la puissance supérieure de Ted V2, mais inférieurs au résultat obtenu avec un tracteur et un outil intercep animé par l'hydraulique.

La gestion du chiendent reste complexe car les outils ne travaillent pas très profondément et ils peuvent disséminer des fragments plus loin dans la parcelle.

1.4. Evaluation économique de la robotique viticole

L'évaluation économique (Gaviglio, 2024) repose sur le prix, l'amortissement prévu, et la performance intrinsèque du robot qui permet d'imaginer la surface de travail affectée à la machine. Si on reprend les éléments retenus en 1.3.1, un robot vendu 200 000 € avec ses outils, exploité sur 40 hectares pendant 7 ans représente plus de 700 € par hectare et par an d'amortissements. Il faut ajouter un peu de temps de travail humain pour l'astreinte de mise en œuvre et de supervision (1 à 2 heures par jour de travail), la logistique pour les transports entre parcelles (achat d'une remorque ?), et des frais d'assurance (600 €/an), d'abonnement aux services de données pour la réception des corrections GPS centimétriques (700 €/an). Viennent s'ajouter l'énergie et l'entretien, ce qui amène le coût d'utilisation proche de 1000 € par hectare et par an, avec des hypothèses plutôt optimistes (7 ans, 40 ha). Dans le contexte du projet, le désherbage mécanique avec un tracteur représente 450 à 600 € par hectare et par an. Il y a donc encore un déficit de compétitivité du côté de la robotique, malgré des performances techniques en progression, surtout depuis 2022.

Hypothèses de calcul pour la comparaison avec le travail au tracteur sur 40 hectares :

- Coût de la main d'œuvre : 25 € par heure
- Coût de la traction (amortissement du tracteur, entretien et carburant) : 30 € par heure
- Prix d'achat d'un outil interceps : 20 000 euros, amortis sur 7 ans
- Temps de travail avec le tracteur : 5 passages à 3 km/h, soit 1,5 heure par hectare et par passage soit 7,5 heures par an pour un hectare

Tableau 3 : Comparaison des coûts de réalisation du désherbage mécanique sous le rang, exemple pour 40 ha

Coût par ha et par an	Outil intercep	Robot avec outils
Amortissement	72 €	714 €
Traction	225 €	--
Main d'oeuvre	187,5 €	49,5 €
Assurance	2 €	15 €



Entretien (10% amort.)	7 €	70 €
Abonnements	-	18 €
Total	486 €	867 €

1.5. Consommation énergétique d'un robot viticole électrique

Le projet a permis de réaliser cette mesure en 2023 et de la répéter en 2024, grâce à la présence du robot Ted V2 toute la saison (arrivée fin juin en 2022). Les valeurs obtenues ne concernent que le modèle étudié, mais elles sont intéressantes en termes d'efficacité obtenue par rapport à une motorisation thermique. Nous connaissons la capacité de la batterie (26 KWh) au démarrage du travail, et la surface travaillée par le robot (ici, pour cette mesure : 0,44 ha). En plus du travail réalisé dans la vigne le robot a roulé environ 500 mètres pour les trajets entre le hangar et la parcelle. A la fin de cette séquence nous avons constaté une consommation de 10 % de la capacité de la batterie, soit 2,6 KWh. L'estimation simplifiée donne 2,6 KWh pour 0,44 ha soit 5,9 KWh /ha, pour l'utilisation d'un outil passif de binage à plat, à faible profondeur, trajets hors parcelle compris. Sur une parcelle plus favorable, avec moins de phases de manœuvres « improductives », et des trajets affectés à une plus grande surface ce bilan pourrait être amélioré.

Cette estimation ne prend cependant pas en compte les pertes d'énergie lors de la charge du robot, où l'efficacité n'est pas de 100 %. Les chiffres de consommation de carburant GNR pour un tracteur réalisant cette opération sont compris entre 5 et 7 litres par hectare. Sachant qu'un litre de GNR contient environ 10 KWh d'énergie brute, l'énergie dépensée pour l'opération est de 50 à 70 KWh, soit 10 fois plus qu'avec le robot (électrique). Cela est dû en grande partie au rendement assez faible d'un moteur thermique : entre 35 et 40 %.

La comparaison n'est cependant pas aussi simple car nous avons vu au point 1.3.2 que le nombre d'interventions avec un robot est souvent supérieur à celui avec un tracteur.

1.6. Conclusions et perspectives pour la robotique en viticulture

Le projet nous a enseigné que la robotisation du désherbage mécanique sous le rang avec des outils passifs ne permet pas de revoir complètement la stratégie employée dans le sens qui était envisagé, à savoir compenser le déficit de puissance par des passages répétés. Des outils actifs permettant de mieux gérer le mouvement entre les pieds de vigne seraient tout à fait pertinents pour améliorer la gestion des adventices tout en apportant plus de sécurité pour les ceps de vigne. Les principes généraux du désherbage mécanique ne sont pas remis en cause par la robotique mais la robotique doit être capable de les suivre : anticipation, gestion des déplacements de terre, et alternance des outils utilisés.

2. La pulvérisation fixe : intérêt, enjeux, performance et voies d'améliorations attendues

2.1. Intérêt

Déployer un système de pulvérisation fixe sur nos systèmes de production à bas niveaux d'intrants représente une rupture importante par rapport à la pratique usuelle dans les vignobles qui consiste à utiliser des appareils de pulvérisation trainés ou portés par des tracteurs, permettant de traiter plusieurs rangs simultanément en transportant la bouillie dans une cuve permettant de traiter plusieurs hectares. Une installation fixe implique des diffuseurs suffisamment rapprochés au-dessus de la canopée, des tuyaux dans les rangs de vigne, des tuyaux en dehors des rangs, une cuve de bouillie raccordée, un

dispositif de mise en pression (une pompe), un dispositif de rinçage et de nettoyage, un point de vidange, etc. Cela s'apparente à une installation d'irrigation, avec des contraintes supplémentaires liées à l'utilisation des produits phytosanitaires et des diffuseurs plus complexes que de simples goutteurs. Alors pourquoi imaginer intégrer un tel levier dans notre système ? L'intérêt réside principalement dans deux avantages pratiques en lien avec la stratégie de protection phytosanitaire :

Sortir l'applicateur du champ d'application des produits phytosanitaires

Appliquer les traitements avec réactivité par rapport à un risque météo : là où un tracteur met 30 minutes par hectare, le traitement avec la pulvérisation fixe est très court (2 minutes) une fois l'installation sous pression.

Dans une stratégie qui fait appel majoritairement aux produits de biocontrôle, la réactivité dans le renouvellement des interventions est cruciale. Des expériences ont déjà été menées en vergers par le CTIFL (projet CASDAR Pulvéfix), avec d'autres contraintes par rapport à la vigne. Ceci a été décliné par l'IFV avec un projet similaire en 2018-2019 qui visait à concevoir une technique innovante d'application des produits phytosanitaires à l'aide de micro-asperseurs fixes sur les rangs. En s'affranchissant du pulvérisateur classique, ce système pourrait offrir certains avantages : application des produits au moment le plus opportun, réduction de leur consommation et des nuisances sonores vis-à-vis des riverains, limitation de la dérive et du tassement des sols, économie de carburant... La première année du projet (2018) a permis de concevoir un prototype opérationnel qui a été utilisé pour appliquer des produits phytosanitaires sur deux sites en région bordelaise dès la campagne 2019. Le projet NextGen Viti s'est naturellement inspiré ces premières initiatives en la matière.

2.2. Enjeux dans le projet

Cette technologie n'existant pas chez les constructeurs de pulvérisation, l'enjeu dans le projet consistait à construire un système utilisant des éléments du commerce, quitte à réaliser un détournement de l'usage initial, pour pouvoir l'utiliser et en évaluer les atouts et contraintes dans un cas réel d'utilisation sur une surface représentative. C'est ainsi que nous nous sommes tournés vers la société Nétafim, spécialiste de ce type d'installation, qui disposait dans son catalogue d'une solution destinée à protéger les bourgeons de la vigne du gel en pulvérisant de l'eau sur la longueur du rang. Des adaptations ont

été nécessaires par rapport à cet usage initial, en particulier le positionnement des diffuseurs au-dessus de la canopée, et pas seulement au niveau du cordon ou du fil porteur.



Photo 3 :
Installation du matériel Nétafim pour la pulvérisation fixe.



2.3. Caractéristiques techniques

La mise en pression de l'ensemble de l'installation est nécessaire pour atteindre 2,5 bars, qui est la pression de déclenchement des diffuseurs, appelés pulsars en raison de leur fonctionnement alternatif. Une chambre de précontrainte se remplit, et se vide lorsque la pression seuil est atteinte, produisant un jet qui couvre une distance de 5 à 6 mètres.

Le débit de chaque diffuseur est de 0,2 L/min (photo 4). On place un diffuseur sur chaque piquet pour couvrir une distance de 6 mètres. Le nombre de diffuseurs par hectare dépend de la densité de plantation et, dans notre cas, de l'espacement entre chaque piquet. A raison d'un diffuseur tous les 6 mètres dans une densité de plantation de 4545 pieds par hectare, on doit en installer 757 par hectare. Le débit de l'installation est donc de 151,5 L par minute et par hectare. Pour notre expérimentation,



nous disposons d'une cuve mobile accompagnée d'une pompe de mise en pression, que nous déplaçons sur la parcelle. Pour une installation plus pérenne, un local dédié avec accès à l'eau pour remplir l'ensemble des tuyaux serait indispensable.

Photo 4 : Pulsar et son jet au-dessus de la végétation. Crédit photo IFV CG

2.4. Limites attendues par rapport aux méthodes de pulvérisations classiques

Contrairement à un pulvérisateur tracté qui dirige ses jets vers les faces de la végétation, les diffuseurs fixes orientent leurs jets le long du rang, par-dessus la végétation, il faut donc logiquement s'attendre à une répartition de la pulvérisation moins homogène, et à des limites quand le développement de la haie foliaire est important, avec un effet parapluie des feuilles les plus hautes par rapport aux feuilles les plus basses.

Pour couvrir une distance importante le long du rang, les gouttelettes doivent avoir une certaine inertie, et sont donc naturellement plus grosses que celles produites par une pulvérisation pneumatique ou à jet porté. A volume de pulvérisation égal, des gouttes plus grosses couvrent moins de surface foliaire. Cela implique, avec une pulvérisation fixe, d'envisager des volumes d'application de bouillie supérieurs (de l'ordre de 300 L/ha vs 100 à 150) pour conserver une bonne couverture du feuillage. A dose constante, quel que soit le produit, cela se traduit par une dilution supérieure. Si on reprend le chiffre de débit du paragraphe précédent, le temps de fonctionnement nécessaire est d'environ 2 minutes, ce qui est très rapide pour couvrir n'importe quelle surface à partir du moment où la pompe peut fournir le débit suffisant. A titre de comparaison, le traitement avec un appareil de pulvérisation tracté prend environ 30 minutes par hectare.

2.5. Lien entre biocontrôle et systémie

Si en début de saison les limites mentionnées sont peu importantes, elles peuvent devenir plus problématiques lorsque la végétation est très développée, surtout avec des produits de contact. Dans NextGenViti nous avons décidé d'utiliser en première intention des produits de biocontrôle, et en dernier recours, des produits conventionnels. Parmi les produits utilisables, certains ont dans leurs caractéristiques une systémie (circulation dans toute la plante) importante, qui les rend intéressants dans un usage où toute la surface foliaire n'est pas touchée. C'est le cas du LBG (Phosphonates de



potassium à 755 g/L), qui conserverait donc une possibilité d'usage avec la pulvérisation fixe même quand le développement de la végétation ne permet pas une couverture efficace.

2.6. Limites observées en fonctionnement

2.6.1. La pente et la gestion de l'homogénéité de la pression

Ce cas s'est présenté dans le site du Beaujolais en particulier, dont la parcelle expérimentale présente une pente supérieure à 7 %. Il est difficile de maintenir une pression homogène entre le haut et le bas de la parcelle lorsque l'installation fonctionne car la pression de déclenchement est plus facilement atteinte dans le bas de la parcelle, ce qui induit un fonctionnement hétérogène, voir pas de pulvérisation sur le haut de la parcelle si le seuil n'est pas atteint.

2.6.2. La sensibilité au vent latéral

La durée de fonctionnement pour chaque traitement est courte mais il est important de choisir un créneau horaire sans vent car, même avec des gouttelettes « épaisses », le jet est sensible à la déviation compte tenu de la longueur à parcourir.

2.6.3. La difficulté de réglage de la hauteur de rognage

L'enjeu est de ne pas abîmer les diffuseurs et en même temps d'éviter leur obstruction par des rameaux trop hauts, ce qui, avec une vigueur forte, est quasi impossible et nous a poussé à réaliser des rognages manuels autour des piquets. La photo 4 illustre bien ce point.

2.6.4. La gestion des volumes morts une fois le traitement terminé et l'installation sous pression

Il s'agit d'une des caractéristiques les plus complexes à améliorer : par nature cette installation représente des longueurs de tuyaux importantes et des volumes conséquents. Sur la base de notre expérimentation, nous avons évalué le volume nécessaire au remplissage de tous les éléments, jusqu'au corps des diffuseurs, à environ 940 litres par hectare. En reprenant l'hypothèse d'un volume d'application réel autour de 300 L par ha en 2 minutes de fonctionnement, il faut prévoir, pour une installation d'un hectare, 1240 litres de bouille (mise en pression et écoulement de 300 L). Une fois la vanne coupée, après le traitement il reste bien 940 litres dans les tuyaux, de bouillie phytosanitaire diluée, qui demanderait un réglage spécial pour être épandue avec un pulvérisateur classique sur une autre parcelle.

2.6.5. La gestion des eaux de rinçage

Une fois les tuyaux vidés (il est possible de pousser les reliquats avec de l'air), deux options s'offrent à nous : rincer ou non, selon l'occurrence du prochain traitement et sa compatibilité avec le précédent. Un rinçage génère des quantités importantes d'effluents.

2.7. Pistes d'amélioration non testées dans le projet, analyse

2.7.1. Améliorations par rapport à la qualité de pulvérisation :

Le projet nous a permis d'identifier des pistes d'amélioration à essayer, pour rendre ce mode d'application des produits phytosanitaires plus compatible avec les exigences de qualité de la protection.

Augmenter le nombre de diffuseurs permettrait de couvrir plus facilement la longueur et la hauteur de végétation.

Changer le type de diffuseurs pour améliorer la qualité des gouttelettes.

Orienter les diffuseurs vers les faces des rangs sur le côté, avec un balayage latéral pour couvrir plus de surface, mais avec l'inconvénient de la distance à parcourir d'un rang vers l'autre.



Intégrer des diffuseurs déployables pour traiter les faces des rangs

2.7.2. Améliorations par rapport à l'exposition des diffuseurs :

Protéger les diffuseurs des passages des machines (rogneuse, machine à vendanger) implique une position rétractable par rapport à leur position de travail (au-dessus de la végétation). Techniquement il existe des solutions pour le faire, mais le déploiement et le retrait de ces diffuseurs demanderait une source d'énergie ou de la manutention, et un coût supplémentaire élevé. La multiplication par le nombre de diffuseurs augmente le risque de pannes et de mauvaise couverture de la végétation. Il est aussi envisageable de protéger les diffuseurs en les laissant à l'intérieur de la végétation, à condition d'en multiplier le nombre et d'en changer le type, car les pulsars ne seraient pas adaptés au milieu du feuillage. Il faudrait créer un brouillard fin et diffus, avec l'inconvénient de ne pas couvrir la partie haute.

2.7.3. Améliorations par rapport à la gestion des volumes nécessaires :

Deux principales pistes d'amélioration ont été identifiées :

Intégrer des cuves « tampon » en bout de rang pour récupérer la bouillie et la remettre sous pression pour le rang suivant. C'est un moyen de réduire considérablement les volumes morts et de les limiter à ce qui est nécessaire pour un rang. En revanche, c'est une solution très coûteuse qui rallonge beaucoup le temps de traitement et implique une automatisation pour la gestion des phases de remplissage et de mise en pression

Réaliser des traitements rang par rang en branchant l'unité « réserve de bouillie et mise en pression » successivement sur chaque rang après avoir respecté un temps d'application et réaspiré les reliquats dans la cuve. Là aussi on peut réduire considérablement les reliquats produits mais on perd la réactivité et la facilité. On pourrait imaginer un système de vannes pilotées pour automatiser le traitement, mais là aussi le coût de l'installation devient très élevé.

2.8. Conclusion et perspective pour la pulvérisation fixe en viticulture

Bien que très séduisante sur le papier, la pulvérisation fixe se heurte aujourd'hui à beaucoup de problèmes de mise en pratique et ne parvient pas à être à la hauteur des solutions de pulvérisation mobiles existantes en termes de qualité d'application. Les inconvénients qui freinent son déploiement sont identifiés et il existe des solutions techniques pour y palier, mais ces dernières sont coûteuses et demanderaient, une fois installées, une maintenance très importante, ce qui a tendance à en diminuer l'intérêt. Installer une infrastructure de ce type à grande échelle dans un vignoble pour protéger la vigne avec des traitements pourrait être comparé aux solutions telles que vititunnel, qui vise à protéger la vigne des contaminations par un effet parapluie, plutôt qu'à apporter des produits de protection.

3. Conclusions et perspectives

Au démarrage du projet Next Gen Viti, la robotique était encore au stade de technologie naissante, et imparfaite. Après 6 ans de programme, pendant lesquels nous avons pu mesurer les progrès accomplis avec un constructeur en particulier, nous constatons que les robots se sont imposés dans le paysage des équipements viticoles, et qu'ils commencent à s'ouvrir vers d'autres opérations techniques que celles concernant l'entretien du sol sous le rang sans herbicides, sans doute pour apporter aux utilisateurs un meilleur amortissement de l'investissement, qui est leur point faible aujourd'hui. La pulvérisation fait partie de ces opérations pour lesquelles la robotique permettrait de franchir un cap, en termes de réactivité ou en termes de protection des opérateurs. A cet égard, les robots permettraient de conserver la qualité d'application de la bouillie grâce à un positionnement des diffuseurs similaires à celui des appareils de traitement conventionnels. Si les développements technologiques permettent de lever les freins à l'utilisation des pulvérisateurs avec les robots, alors cette solution sera certainement



plus facile à déployer que la pulvérisation fixe telle que nous avons pu la tester, avec les limites intrinsèques à sa conception.

L'exemple des deux leviers innovants étudiés ici ne doit pas faire oublier la démarche globale de réduction des intrants phytosanitaires dans laquelle s'inscrit le projet. Si l'utilisation des robots de binage permet de réduire l'IFT herbicide à 0, l'utilisation prioritaire des produits de biocontrôle avec ou sans la pulvérisation fixe permet quant à elle de réduire significativement l'IFT conventionnel. Pour réduire la pression des maladies cryptogamiques, des leviers agronomiques éprouvés ont été utilisés (enherbement, effeuillage). Le contrôle des insectes ravageurs a été confié en priorité aux outils de lutte biologique comme la confusion sexuelle contre les tordeuses ou l'application d'argile sur les feuilles contre la cicadelle verte. Des nichoirs ont été réalisés pour favoriser la présence des chiroptères afin de favoriser la régulation naturelle des insectes par leur prédation. Le succès de ces stratégies reste toutefois très dépendant des conditions climatiques du millésime. Les printemps pluvieux ne permettent pas de faire d'impasse sur les traitements contre le black-rot notamment et impose d'utiliser de fortes quantités de soufre (biocontrôle) pour éviter les contaminations.

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

Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier :

- Laurent Huet, du service développement Netafim, pour la réflexion et la mise en œuvre du système de pulvérisation fixe ;
- les équipes techniques de Naïo Technologies pour leur support et les mises à jour régulières apportées aux robots ;
- la cellule d'animation nationale du réseau Dephy pour son rôle moteur et coordinateur.

Déclaration de soutien financier

Merci à l'OFB pour son soutien financier pendant les 6 années de ce programme !

Références bibliographiques

Gaviglio, C. (2024, décembre 10). *Modèle économique de la robotique viticole, coûts et bénéfices induits*. Séminaire AGROTIC. Bordeaux Sciences Agro - Chaire Agrotic, Bordeaux.



Vegephyl (éd.). (2023, décembre 6). *La place des nouvelles technologies dans l'entretien des sols viticoles*. 25ème conférence du COLUMA, Orléans. Avec la collaboration de Christophe Gaviglio. IFV.

Ball, D., Ross, P., English, A., Milani, P., Richards, D., Upcroft, B., & Wyeth, G. (2016). Experimental evaluation of an autonomous robot for mechanical weeding in vineyards. *Computers and Electronics in Agriculture*.

Serrano, D., Tardáguila, J., Diago, M. P., & Hernández, C. (2017). VineRobot project: A novel approach to developing robotics in viticulture. *Spanish Journal of Agricultural Research*.

Tardáguila, J., Diago, M. P., & Serrano, D. (2018). Vision-based sensing technologies in vineyard robotics. *Biosystems Engineering*.

Morales, Y., Kanai, S., & Noguchi, N. (2020). Collaborative robotics in viticulture: Future perspectives. *Journal of Field Robotics*.

Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Peña, J. M., & López-Granados, F. (2019). Robotics in agriculture: Application to viticulture. *Precision Agriculture*.

Escolà, A., Planas, S., Rosell, J. R., & Gil, E. (2013). *Spray distribution uniformity with fixed systems in fruit orchards*. *Computers and Electronics in Agriculture*.

Escolà, A., Rosell, J. R., Planas, S., & Gil, E. (2015). *Variable rate spraying in vineyards and fruit orchards*. *Biosystems Engineering*.

Gil, E., Escolà, A., Rosell, J. R., Planas, S., & Val, L. (2011). *Innovative spray application techniques in fruit growing*. *Crop Protection*.

Gil, E., Llorens, J., Llop, J., & Escolà, A. (2014). *Advances in fixed spraying systems for vineyard protection*. *Spanish Journal of Agricultural Research*.

Pour citer cet article : Christophe Gaviglio. Le projet NextGenViti un laboratoire pour des solutions innovantes, les apports de la robotique et de la pulvérisation fixe pour la réduction des pesticides en viticulture. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.201-212. [10.17180/ciag-2026-vol109-art16](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-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.



Diversifier les paysages viticoles à travers les pratiques agricoles et les habitats semi-naturels pour préserver la biodiversité

Violette AURELLE¹, Olivier BONNARD², Yohan CHARBONNIER³, Cyril CONDOMINES², Thomas COSTES², Brice GIFFARD², Louis GROSS², Benjamin JOUBARD², Gaëtane LE PROVOST², Nicolas MOKUENKO³, Océane RICAU¹, Sylvie RICHART CERVERA², Adrien RUSCH², Alex STEMMELEN², Pauline TOLLE²

¹ Chambre d'agriculture de la Gironde Pôle Viticulture-Œnologie- Vinopôle Bordeaux-Aquitaine, 39 rue Michel Montaigne - CS 20115 – 33295 Blanquefort, France

²INRAE, Bordeaux Sciences Agro, ISVV, SAVE, F-33140, Villenave d'Ornon, France

³ LPO DT Aquitaine, 433 chemin de Leysotte 33410 Villenave d'Ornon, France

Correspondance : adrien.rusch@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art17>

Résumé

Les systèmes de cultures basés sur les principes de l'agroécologie cherchent à valoriser la biodiversité et les fonctions écologiques pour limiter l'empreinte environnementale des activités agricoles. Notre étude s'appuie sur un suivi à long-terme sur le site atelier BACCHUS pour caractériser les effets de certains modes de conduite et du contexte paysager sur différentes communautés animales et végétales. Nos résultats indiquent un effet globalement positif des pratiques de l'agriculture biologique sur la diversité taxonomique multitrophique et une variabilité de réponse des différentes communautés considérées. De manière intéressante, nous démontrons l'importance de la gestion à l'échelle du paysage notamment via le maintien d'habitats semi-naturels et le déploiement de l'agriculture biologique pour concilier viticulture et préservation de la biodiversité.

Mots-clés : agroécologie, viticulture, communautés, paysage, agriculture biologique

Abstract: Diversifying vineyard-dominated landscapes through farming practices and semi-natural habitats to conserve biodiversity

Agroecological farming aims to enhance biodiversity and ecological functions to reduce the environmental footprint of agriculture. Our study relies on a long-term monitoring of multiple communities in vineyard landscapes using the BACCHUS long-term research territory to assess the effects of farming practices and landscape context on plants and animals. We found an overall positive effect of organic farming practices on multitrophic taxonomic diversity but highly variable responses of the different taxa to organic farming. Interestingly, our analyses demonstrate the importance of a landscape-scale management and the key role of diversifying vineyard landscapes through semi-natural habitats restoration and expansion of organic farming to conciliate viticulture and biodiversity conservation.

Keywords: agroecology, vineyard landscapes, communities, landscape, organic farming

1. Introduction

L'intensification agricole est le déterminant majeur de l'érosion de la biodiversité dans les écosystèmes terrestres (IPBES 2019). Cette érosion de la biodiversité impacte fortement le fonctionnement des agroécosystèmes en limitant des services écosystémiques comme la régulation naturelle des ravageurs



ou la pollinisation (Dainese et al., 2019 ; Rusch et al., 2016). Il existe donc des enjeux de durabilité des systèmes de production agricoles derrière les enjeux de préservation de la biodiversité.

Les pratiques agroécologiques cherchent à valoriser la biodiversité et les fonctions écologiques pour limiter l'empreinte environnementale des activités agricoles. Par nature, ces systèmes posent l'hypothèse d'une meilleure fonctionnalité globale et d'une synergie entre conservation de la biodiversité et durabilité de la production agricole. Dans ce contexte, l'agriculture biologique est souvent considérée comme un système de production agroécologique, avec des impacts globalement positifs sur la biodiversité (Tuck et al., 2014) et sur certains services écosystémiques (Gattinger et al., 2012, Muneret et al., 2018). Pourtant, certaines performances environnementales de l'agriculture biologique font encore débats (Seufert et al., 2017, Tscharntke et al., 2021) et les impacts sur certaines communautés restent très variables et modulés par les contextes de production (Ostandie et al., 2021, Seufert et al., 2017).

Cette forte dépendance contextuelle provient de différents facteurs. Tout d'abord, il existe une grande diversité de pratiques mises en œuvre derrière des systèmes définis par une certification environnementale ou représentant la pratique moyenne de référence. De plus, une écrasante majorité des études menées sur les performances environnementales de l'agriculture biologique sont réalisées à l'échelle parcellaire, sans nécessairement prendre en compte l'impact que peut avoir le contexte paysager sur les effets locaux. Cependant, nous savons désormais que le contexte paysager permet de comprendre les assemblages locaux d'espèces (Martin et al., 2019 ; Le Provost et al., 2021). Enfin, une large majorité des travaux conduits sur les effets de l'agriculture biologique ont été réalisés dans un contexte de faible déploiement de l'agriculture biologique là où il existe de bonnes raisons de penser que les effets locaux sont magnifiés par la quantité de surfaces agricoles en agriculture biologique.

Les cultures pérennes telles que les vignes sont particulièrement intéressantes pour étudier comment les pratiques agricoles et le contexte paysager interagissent pour façonner la biodiversité. Tout d'abord, il existe peu d'études en systèmes de culture pérennes sur la biodiversité alors même que ces systèmes peuvent être gérés de façon particulièrement intensive (Martinez-Nunez et al., 2024 ; Rusch et al., 2025). Par ailleurs, les paysages dominés par la viticulture sont par nature des systèmes plus stables dans leurs usages des terres du fait de la nature pérenne de cette culture. Cette apparente stabilité des différents types d'habitats fait de ces paysages des systèmes d'études intéressants pour caractériser la part relative des effets des pratiques et du paysage sur la biodiversité.

Notre étude s'appuie sur un suivi à long-terme de différentes communautés sur le site atelier BACCHUS (<https://www.siteatelier-bacchus.com/>) pour caractériser les effets des pratiques viticoles et du contexte paysager sur la biodiversité. Dans ce travail nous avons d'abord cherché à mesurer les effets locaux des pratiques de l'agriculture biologique sur la biodiversité. Ensuite, nous avons cherché à comprendre comment deux dimensions différentes du contexte paysager, la quantité d'habitats semi-naturels d'une part et la quantité de surface viticole conduite en agriculture biologique d'autre part, modulent les effets des modes de conduite sur la biodiversité. Dans ce travail, nous testons les hypothèses suivantes : (i) les pratiques de l'agriculture biologique à l'échelle parcellaire ont globalement des effets positifs sur la diversité et l'abondance multitrophique, (ii) l'hétérogénéité de composition des paysages, et notamment la quantité d'habitats semi-naturels dans le paysage, favorise la diversité et l'abondance multitrophique ; et enfin (iii) les effets positifs locaux de l'agriculture biologique sont modulés par l'hétérogénéité des paysages avec des effets locaux positifs de l'agriculture biologique plus forts dans des paysages dominés par des quantités importantes d'habitats semi-naturels ou des quantités importantes de surfaces agricoles en agriculture biologique.



2. Matériels et méthodes

2.1. Site d'étude et dispositif expérimental

Cette étude a été menée sur le site atelier BACCHUS territoire de 900 km² dominé par la viticulture et situé en Gironde dans un climat océanique tempéré (44°48'N, - 0°14'W). Sur ce territoire, nous avons initialement mobilisé un réseau de 20 paysages sélectionnés le long de deux gradients paysagers non-corrélés : un gradient de proportions d'habitats semi-naturels allant de 2% à 77%, et un gradient de proportion de viticulture biologique allant de 1 % à 52 % environ (calculés dans un rayon de 1 km) (Muneret et al., 2018 ; Ostandie et al., 2021). Au sein de chacun de ces paysages, deux parcelles viticoles ont été sélectionnées : l'une conduite en agriculture biologique et l'autre en agriculture dite conventionnelle. Les parcelles conduites en viticulture biologique l'étaient toutes depuis au moins 5 années au début de la collecte des données. Aucune parcelle n'était irriguée et une majeure partie des systèmes suivis étaient plantés en Merlot (n = 162 parcelles-années sur un total de 194). Certaines parcelles ont été arrachées ou sont sorties du réseau au cours du suivi.

2.2. Suivis de différentes communautés d'organismes

Nous avons caractérisé annuellement, entre 2019 et 2023, l'abondance et la diversité de différentes communautés d'organismes représentant des niveaux trophiques et des compartiments différents. Ainsi, nous avons échantillonné les communautés de plantes, d'araignées, de carabes, de pollinisateurs sauvages et d'oiseaux.

Les communautés de plantes situées dans l'inter-rang et sous le rang de vigne ont été caractérisées à travers des relevés de flore réalisés le long de transects de 3 x 25 m (deux transects positionnés dans 2 inter-rangs différents et le troisième sous le rang). Si une seule modalité de gestion de l'inter-rang était mise en œuvre sur la parcelle (e.g., inter-rang totalement enherbé ou travaillé) alors 2 transects de 25 m répartis dans deux inter-rangs différents ont été réalisés. Si deux modalités de gestion étaient mises en œuvre, alors 2 transects de 25 m par modalité ont été réalisés. Les relevés ont été réalisés chaque année à deux dates différentes (fin Mars/début Avril et fin Juin/début Juillet). La diversité taxonomique et la fréquence des espèces dans les relevés ont été obtenues en agrégeant les relevés aux deux dates.

Les communautés d'araignées et de carabes ont été échantillonnées chaque année à trois dates (Mai, Juillet et fin Aout/début Septembre), à l'aide de pièges Barber. A chaque date, 3 pièges ont été positionnés le long d'un transect au milieu de chaque parcelle, le premier piège était positionné à 15 m minimum de la bordure et chaque piège était distant de 15 m du suivant. Les pièges ont été actifs pendant 7 jours puis les échantillons ont été récupérés et triés au laboratoire. Sur ces échantillons, l'ensemble des carabes et des araignées a été déterminé au niveau taxonomique le plus précis, l'espèce pour une grande majorité des individus, ou le genre. Les araignées juvéniles ou plus globalement les individus non déterminés à l'espèce n'ont pas été considérés ici pour l'estimation de la diversité taxonomique. Les données issues des différentes dates au sein d'une année ont été agrégées pour obtenir une estimation annuelle par parcelle de la diversité taxonomique et de l'abondance de chaque groupe.

Les communautés de pollinisateurs sauvages ont été échantillonnées à l'aide de coupelles colorées (trois couleurs : jaune, bleu et blanche) à trois dates (Avril, Mai et Juillet). A chaque date, la durée de capture était de 48h par parcelle. Les pollinisateurs sauvages (syrphes, abeilles, bourdons) ont été identifiés au genre ou à l'espèce. Pour l'analyse, nous avons calculé la richesse totale en genres, étant donnée l'importance du nombre d'individus déterminés au genre, et l'abondance totale par parcelle. Au vu de la variabilité de l'effort d'échantillonnage dû à des problèmes matériels, nous avons corrigé les estimateurs de richesse générique et d'abondance par l'effort d'échantillonnage réel.



Les communautés d'oiseaux ont été recensées par points d'écoute de 10 minutes à deux dates différentes (fin Avril/début Mai et Juin) chaque année pour inventorier tant les espèces nicheuses précoces que les espèces transsahariennes plus tardives. Le même observateur qualifié a identifié tous les oiseaux entendus et vus dans un rayon de 150 m autour du centre de chaque parcelle le matin (6h00-10h00).

2.3. Abondance et diversité multitrophique

La diversité et l'abondance multitrophique ont été calculées sur la base de la richesse taxonomique (spécifique ou générique) et de l'abondance des 5 communautés échantillonnées chaque année. Pour chaque métrique, nous avons calculé la moyenne des z-scores (standardisation de la variable en soustrayant la valeur par la moyenne et en divisant par l'écart-type) par année et par parcelle. En plus de l'approche basée sur la moyenne des z-scores, nous avons aussi mobilisé d'autres approches (i.e., moyenne des variables standardisées par le maximum, et le nombre de groupes dépassant différents seuils de richesse ou d'abondance) mais les résultats obtenus étaient très similaires (Allan et al., 2014) et nous ne présentons donc ici que les résultats issus de l'approche basée sur la moyenne des z-scores.

2.4. Analyses statistiques

Nos hypothèses ont été testées à l'aide de modèles linéaires généralisés mixtes. Les variables explicatives (effets fixes) dans tous les modèles étaient : le mode de conduite (agriculture biologique ou conventionnelle), la proportion de forêts, la proportion de prairies et la proportion de viticulture biologique dans un rayon de 1 km. De plus, toutes les interactions entre les modes de conduites locaux et les trois variables paysagères ont été considérées. Dans tous les modèles, nous avons également intégré un effet aléatoire « site » (i.e., paysage) et un effet aléatoire « Année » pour prendre en compte les structures de dépendances liées au dispositif en paires et aux mesures répétées. Les différentes variables réponses considérées étaient : la diversité et l'abondance multitrophique, ainsi que la richesse et l'abondance de chacun des groupes considérés séparément. Pour prendre en compte les incertitudes liées à la sélection des variables dans les modèles, nous avons réalisé une d'inférence multi-modèles. Les effets rapportés se basent sur les estimations moyennes sur le jeu des meilleurs modèles (ΔAIC des meilleurs modèles < 2) pour chacune des variables réponses. La multicollinéarité entre les prédicteurs a été évaluée à l'aide du facteur d'inflation de la variance (VIF) et du test de corrélation de Spearman (valeurs $VIF < 2$; $|r| < 0,6$). Nous avons vérifié l'absence d'autocorrélation spatiale dans les résidus des modèles à l'aide de variogrammes. Les analyses ont été réalisées à l'aide du package MuMIn (Bartoń, 2020), du package DHARMa (Hartig, 2020) et du package lme4 (Bates et al., 2015).

3. Résultats

Le niveau d'utilisation des produits phytosanitaires était la pratique la plus discriminante entre les deux types de systèmes suivis (Agriculture biologique : moyenne IFT = 9.5, min = 3.3, max = 22.5 ; Agriculture conventionnelle : moyenne IF = 16.4, min = 5, max = 27.1).

Nos analyses ont révélé que la diversité multitrophique était plus élevée dans les parcelles conduites en agriculture biologique en comparaison des parcelles conduites en agriculture conventionnelle mais n'ont indiqué aucune différence sur l'abondance multitrophique (Figure 1). Aucun effet des variables paysagères, seules ou en interaction, sur la diversité ou l'abondance multitrophique n'a été détecté.

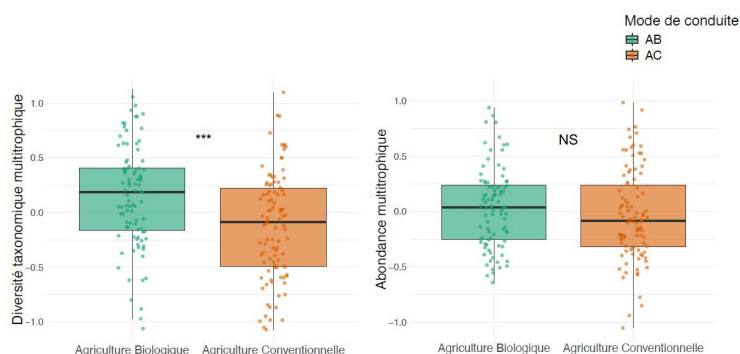
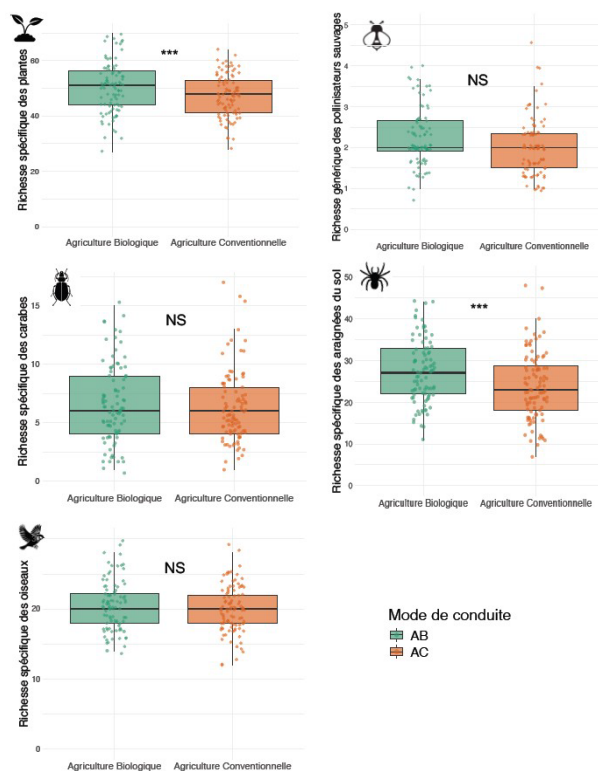


Figure 1 : Effets moyens des modes de conduite (agriculture biologique et agriculture conventionnelle) sur la diversité taxonomique multitrophique et l'abondance multitrophique sur le site atelier BACCHUS entre 2018 et 2023. *** : p-value < 0.01 ; NS : non significatif

Nos analyses sur les communautés de plantes ont indiqué qu'en moyenne la richesse spécifique des plantes était plus élevée dans les parcelles conduites en agriculture biologique en comparaison des parcelles en agriculture conventionnelle (Figure 2) et que l'interaction entre les modes de conduite locaux et la quantité de forêt dans le paysage était très structurante pour ces communautés (Figure 3). En effet, la richesse spécifique des plantes a augmenté avec la quantité de forêt dans le paysage mais uniquement pour les parcelles conduites en agriculture biologique, là où aucun effet n'a été détecté dans les parcelles conventionnelles (Figure 3). Aucune différence de couverture totale des plantes n'a été détectée entre modes de conduite ou le long des gradients paysagers.

Nos analyses sur les communautés de carabes n'ont indiqué aucun effet des modes de conduite ou des variables paysagères sur la richesse spécifique ou l'abondance des carabes.

La richesse spécifique ou l'abondance des araignées étaient significativement plus importantes dans les parcelles conduites en agriculture biologique en comparaison des parcelles conduites en agriculture conventionnelle. Par ailleurs, l'abondance et la richesse spécifique des araignées ont augmenté avec la quantité de viticulture en agriculture biologique dans le paysage.



Aucune variable n'a été identifiée comme structurante de la richesse générique des pollinisateurs sauvages. En revanche, l'abondance des pollinisateurs sauvages a augmenté avec la quantité d'agriculture biologique dans le paysage.

La richesse spécifique des oiseaux a augmenté avec la quantité de forêt dans le paysage et aucune autre variable explicative considérée n'a d'effet sur la richesse spécifique des oiseaux. En revanche, l'abondance des oiseaux a diminué avec la quantité de viticulture conduite en agriculture biologique dans le paysage.

Figure 2 : Effets moyens des modes de conduite (agriculture biologique et agriculture conventionnelle) sur la diversité des différents groupes (plantes, pollinisateurs sauvages, carabes, oiseaux et araignées) suivis sur le site atelier BACCHUS entre 2018 et 2023. *** : p-value < 0.01 ; NS : non significatif

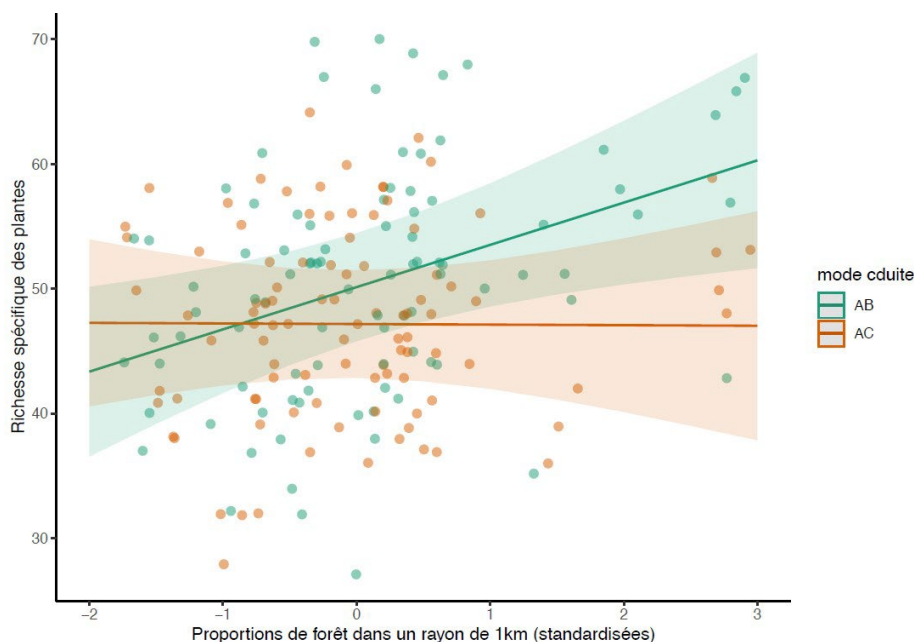


Figure 3 : Effets des modes de conduite (agriculture biologique et agriculture conventionnelle) en interaction avec la proportion de forêt dans un rayon de 1 km autour des parcelles sur la richesse spécifique des plantes suivie sur le site atelier BACCHUS entre 2018 et 2023. La P-value associée à l'effet de l'interaction entre la proportion de forêt et les modes de conduite est < 0.01 .

4. Discussion et conclusion

Nos résultats sur les effets positifs des pratiques de l'agriculture biologique sur la diversité multitrophique sont en accord avec l'état des connaissances actuelles (Tuck et al., 2014). Étant donné qu'une grande majorité des synthèses existantes regroupent principalement des études réalisées en cultures annuelles, notre travail confirme donc cet effet dans le cas des cultures pérennes. En revanche, nos résultats n'indiquent aucune différence d'abondance multitrophique entre systèmes, alors qu'il est globalement démontré que les abondances de différentes communautés augmentent généralement dans les systèmes en agriculture biologique. Nos résultats suggèrent donc une plus grande diversité de ressources et un filtrage environnemental moins fort dans les parcelles conduites en agriculture biologique mais une abondance globale équivalente entre les systèmes (Tuck et al., 2014).

Nos analyses révèlent aussi qu'il existe une variabilité de réponses des différentes communautés considérées individuellement. Ainsi, les pratiques de l'agriculture biologique favorisent clairement la diversité des plantes et des araignées du sol, alors qu'aucune différence n'a été détectée sur la diversité des carabes, des pollinisateurs ou des oiseaux. Cette variabilité de réponses confirme des résultats récents (Beaumelle et al., 2023 ; Ostandie et al., 2021) et suggère des sensibilités différentes des communautés étudiées aux pratiques agricoles. Ainsi, nous savons que les communautés de plantes ou d'araignées sont particulièrement affectées par l'usage des produits phytosanitaires de synthèse, principal marqueur des différences de pratiques entre agriculture biologique et conventionnelle en viticulture (Froidevaux et al., 2017). De plus, nos résultats suggèrent que des déterminants environnementaux indépendants des pratiques de l'agriculture biologique pourraient structurer les communautés et expliquer l'absence d'effets des systèmes étudiés (Ostandie et al., 2021). Ainsi, certains facteurs comme l'intensité de travail du sol et le type de sol sont très structurants pour les communautés de carabes et pourraient expliquer l'absence d'effet des systèmes conduits en agriculture biologique. En outre, les communautés d'oiseaux sont connues pour répondre localement à certaines pratiques comme le type d'enherbement des inter-rangs (Barbaro et al., 2021) et ont des



domaines vitaux qui dépassent généralement l'échelle de la parcelle cultivée (Fontes-Montemayor et al., 2017). Ces éléments pourraient contribuer à expliquer l'absence d'effet des modes de conduites locaux sur les communautés d'oiseaux.

Nos résultats indiquent un effet structurant du contexte paysager sur l'abondance et la diversité des différentes communautés étudiées. Ainsi, 4 communautés sur les 6 étudiées dépendent du contexte paysager environnant la parcelle de vigne, seul ou en interaction avec les pratiques locales. Lorsque des effets étaient détectés, il s'agissait presque toujours d'effets positifs de la quantité d'habitats semi-naturels ou de la quantité de viticulture biologique dans le paysage. Seule l'abondance des oiseaux apparaît négativement corrélée à la quantité de viticulture biologique dans le paysage. Au global, nos résultats valident donc nos hypothèses initiales en indiquant des effets positifs de la quantité d'habitats semi-naturels ou de viticulture biologique dans le paysage sur la diversité et l'abondance des communautés. Ces effets bénéfiques suggèrent que ces habitats sont sources de ressources alimentaires mais aussi de zones de refuges ou d'hivernation. De manière intéressante, nos analyses révèlent une interaction entre les pratiques locales et le contexte paysager sur la richesse taxonomique des plantes : les effets bénéfiques de l'augmentation de la quantité de forêt dans le paysage se détectent uniquement dans les parcelles conduites en agriculture biologique, suggérant que les forêts jouent bien un rôle de réservoir pour cette communauté mais que cet effet n'apparaît que dans des situations où les filtres locaux liés aux pratiques sont moins forts. Enfin, nos résultats indiquent aussi que les effets bénéfiques de l'agriculture biologique peuvent également émerger à l'échelle du paysage (Henckel et al., 2015). Ces résultats suggèrent aussi que les échelles auxquelles s'opèrent les effets pourraient dépendre des traits fonctionnels des organismes et notamment ceux liés à la mobilité (Gámez-Virués et al., 2015). Cette interprétation nécessiterait une analyse complémentaire de la réponse fonctionnelle des communautés étudiées. Au global, notre étude fait ressortir des effets des pratiques et des habitats semi-naturels à différentes échelles spatiales et renforce l'idée selon laquelle l'hétérogénéité de composition du paysage façonne le cortège d'espèces qui est ensuite localement filtré par les pratiques agricoles ou le type d'habitat.

Notre étude indique que la conservation des habitats semi-naturels combinés aux pratiques de la viticulture biologique sont des leviers importants à mobiliser pour la conservation de la biodiversité. Évidemment, cette analyse nécessite d'être complétée par des travaux supplémentaires. En effet, bien que s'appuyant sur un jeu de données conséquent, cette analyse se concentre sur des métriques relativement simples pour décrire les communautés, là où l'analyse des changements dans la composition taxonomique ou fonctionnelle permettrait d'enrichir notre compréhension des effets à l'œuvre. De plus, notre analyse s'appuie sur une vision dichotomique des systèmes et n'intègre pas la variabilité des pratiques viticoles effectivement mises en œuvre derrière cette vision binaire. Ainsi, une meilleure description des pratiques effectivement mises en œuvre dans ces systèmes permettrait de mieux expliquer la variabilité des performances de l'agriculture biologique. Enfin, notre étude n'évalue pas la réponse de différentes fonctions écologiques alors que cette analyse complémentaire viendrait certainement nuancer les effets de certaines pratiques voire du contexte paysager. Ceci permettrait notamment d'analyser les antagonismes ou les synergies entre différents services écosystémiques ce qui permettrait de mesurer plus globalement les conséquences du déploiement de pratiques agroécologiques sur le fonctionnement des paysages viticoles.

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

GLP : 0000-0002-1643-6023; BG : 0000-0003-4367-1245; AR : 0000-0002-3921-9750; AS : 0000-0002-2269-1709

Contributions des auteurs

VA, OB, YC, CC, TC, LG, BG, GLP, BJ, NLM, OR, SRC & PT ont assuré la collecte des données et la détermination des spécimens; AS a calculé les variables paysagères ; PT, VA, YC, NM, OR, SRC, BG, BJ, OB & AR ont mis au point les protocoles de suivis ; PT a mis en place le réseau de parcelles viticoles ; AR a conduit les analyses statistiques et écrit le manuscrit ; AR & PT ont coordonné le projet ; l'ensemble des auteurs a contribué à la définition des questions de recherche et à la rédaction du manuscrit.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des viticulteurs du site atelier BACCHUS pour nous avoir permis d'accéder à leurs parcelles et d'avoir pris du temps pour documenter leurs pratiques. Nous remercions également Alexis Saintilan pour son travail de détermination sur les pollinisateurs sauvages et les araignées.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été soutenu par le plan ECOPHYTO2+ (X4IN33VI) via le projet OPERA.

Références bibliographiques

Allan, E., Bossdorf, O., Dormann, C. F., Prati, D., Gossner, M. M., Tschamntke, T., ... & Fischer, M. (2014). Interannual variation in land-use intensity enhances grassland multidiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(1), 308-313.

Barton, K. (2020). MuMIn: Multi-model Inference. R Package Version 1.43. 17 <https://cran.r-project.org/web/packages/MuMIn/index.html>.

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

Beaumelle, L., Giffard, B., Tolle, P., Winter, S., Entling, M. H., Benítez, E., ... & Rusch, A. (2023). Biodiversity conservation, ecosystem services and organic viticulture: A glass half-full. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 351, 108474.

Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., ... & Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science advances*, 5(10), eaax0121.

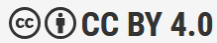
Froidevaux, J. S., Louboutin, B., & Jones, G. (2017). Does organic farming enhance biodiversity in Mediterranean vineyards? A case study with bats and arachnids. *Agriculture, ecosystems & environment*, 249, 112-122.



- Fuentes-Montemayor, E., Watts, K., Macgregor, N. A., Lopez-Gallego, Z., & J. Park, K. (2017). Species mobility and landscape context determine the importance of local and landscape-level attributes. *Ecological Applications*, 27(5), 1541-1554.
- Gámez-Virués, S., Perović, D. J., Gossner, M. M., Börschig, C., Blüthgen, N., De Jong, H., ... & Westphal, C. (2015). Landscape simplification filters species traits and drives biotic homogenization. *Nature communications*, 6(1), 8568.
- Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., ... & Niggli, U. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(44), 18226-18231.
- Hartig, F., & Hartig, M. F. (2017). Package 'dharma'. R package, 531, 532.
- Henckel, L., Börger, L., Meiss, H., Gaba, S., & Bretagnolle, V. (2015). Organic fields sustain weed metacommunity dynamics in farmland landscapes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1808), 20150002.
- IPBES, W. (2019). Intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. Summary for Policy Makers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat, Bonn, Germany.
- Le Provost, G., Thiele, J., Westphal, C., Penone, C., Allan, E., Neyret, M., ... & Manning, P. (2021). Contrasting responses of above-and belowground diversity to multiple components of land-use intensity. *Nature communications*, 12(1), 3918.
- Martin, E. A., Dainese, M., Clough, Y., Báldi, A., Bommarco, R., Gagic, V., ... & Steffan-Dewenter, I. (2019). The interplay of landscape composition and configuration: new pathways to manage functional biodiversity and agroecosystem services across Europe. *Ecology letters*, 22(7), 1083-1094.
- Martinez-Nuñez, C., Velado-Alonso, E., Avelino, J., Rey, P. J., ten Hoopen, G. M., Pe'er, G., ... & Bartomeus, I. (2025). Tailored policies for perennial woody crops are crucial to advance sustainable development. *Nature Sustainability*, 8(2), 133-141.
- Muneret, L., Thiéry, D., Joubard, B., & Rusch, A. (2018). Deployment of organic farming at a landscape scale maintains low pest infestation and high crop productivity levels in vineyards. *Journal of applied ecology*, 55(3), 1516-1525.
- Ostandie, N., Giffard, B., Bonnard, O., Joubard, B., Richart-Cervera, S., Thiéry, D., & Rusch, A. (2021). Multi-community effects of organic and conventional farming practices in vineyards. *Scientific reports*, 11(1), 11979.
- Rusch, A. (2025). Nature-based solutions to increase sustainability and resilience of vineyard-dominated landscapes. *Basic and Applied Ecology*, 82, 70-78.
- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M. M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., ... & Bommarco, R. (2016). Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198-204.
- Seufert, V., & Ramankutty, N. (2017). Many shades of gray—The context-dependent performance of organic agriculture. *Science advances*, 3(3), e1602638.
- Tscharntke, T., Grass, I., Wanger, T. C., Westphal, C., & Batáry, P. (2021). Beyond organic farming—harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends in ecology & evolution*, 36(10), 919-930.
- Tuck, S. L., Winqvist, C., Mota, F., Ahnström, J., Turnbull, L. A., & Bengtsson, J. (2014). Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. *Journal of applied ecology*, 51(3), 746-755.



Pour citer cet article : Violette Aurelle, Olivier Bonnard, Yohan Charbonnier, Cyril Condomines, Thomas Costes, et al.. Diversifier les paysages viticoles à travers les pratiques agricoles et les habitats semi-naturels pour préserver la biodiversité. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.213-222. [10.17180/ciag-2026-vol109-art17](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art17)



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.



Dispositif DEPHY EXPE 2 : un jeu de données sur les performances et les leviers agroécologiques de 120 systèmes de culture utilisant les produits phytopharmaceutiques en ultime recours

Pierre SCHNEIDER^{1,2}, Louise MALOT^{1,2}, Romario JACQUES^{1,2}, Matthieu HIRSCHY^{1,2}, François BRUN¹, Emeric EMONET^{1,2}

¹ ACTA - Les Instituts Techniques Agricoles, 149 rue de Bercy, 75012 Paris

² Cellule d'Animation Nationale DEPHY, Equipe EXPE, Paris

Correspondance : matthieu.hirschy@acta.asso.fr, emeric.emonet@acta.asso.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art18>

Résumé

Le jeu de données présenté est issu du dispositif expérimental DEPHY EXPE 2 dans le cadre de la stratégie ECOPHYTO II. Il est en grande partie constitué après la fin des expérimentations dans l'idée de produire une synthèse du dispositif. Ce jeu de données comporte 120 systèmes de cultures expérimentaux couvrant l'ensemble des filières agricoles végétales (maraîchage, grandes cultures – polyculture / élevage, horticulture, culture tropicale, viticulture et arboriculture) et conduits sur l'ensemble du territoire français entre 2018 et 2024. Les expérimentations menées sont décrites par les concepts agronomiques de leviers agroécologiques, de situations de production et de multi-performances (agronomique, économique, sociale, environnementale) et se placent à l'échelle du système de culture. La récolte des données mobilise en grande partie l'expertise des expérimentateurs et expérimentatrices en la replaçant dans des nomenclatures préexistantes (leviers agroécologiques du projet AGROWISE, indicateurs de performance inspirés de la méthode MASC 2.0). Le jeu de données se présente sous la forme de deux fichiers avec, pour l'un, des données brutes et, pour l'autre, des données prétraitées.

Mots-clés : agronomie, système de culture, jeu de données, leviers agroécologiques, performances, pesticides

Abstract: Summary of the DEPHY EXPE 2 system: a post-hoc dataset on the performance and agroecological levers of 120 cropping systems using plant protection products as a last resort

The dataset comes with the end of the DEPHY EXPE 2 experimental programme defined by the French ECOPHYTO II strategy. It was largely compiled after the end of the experiments with the aim of producing a synthesis of the programme. It includes 120 experimental cropping systems covering all agricultural sectors (vegetable farming, arable farming – mixed farming/livestock, horticulture, tropical crops, viticulture and arboriculture). The experiments have been implemented across the entire French territory between 2018 and 2024. They are described using agronomic concepts of agroecological levers, production situations and multi-performance (agronomic, economic, social, environmental), and are analysed at the cropping system scale. Data collection largely draws on the expertise of experimenters by placing it in pre-existing nomenclatures (project AGROWISE: *IPM taxonomy explorer*; indicators of performance from MASC 2.0). The dataset is presented in the form of two files, one containing raw data and the other containing pre-processed data.

Keywords: agronomy, cropping system, data set, agroecological lever, performance, pesticides



Valeur du jeu de données

- Le jeu de données présente des systèmes de cultures expérimentaux originaux et différents, issus d'une diversité de filières, conduits sur 5 à 6 ans, sur une grande partie du territoire national (et donc dans des situations de production variées).
- Il est pensé dans un cadre conceptuel agronomique défini et explicité qui s'adapte au dispositif DEPHY EXPE 2.
- Il utilise des nomenclatures éprouvées (indicateurs tirés de l'outil MASC 2.0 ou encore la nomenclature de leviers agroécologiques tirée du projet AGROWISE).
- Il mobilise l'expertise des expérimentateurs et expérimentatrices ayant mené les systèmes de culture en incluant une incertitude empirique et qualitative.
- Lien vers données DOI
<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?sessionId=5420d6106d8abe576ba57cd45a30?persistentId=doi%3A10.57745%2F9KELA&version=DRAFT>

1. Contexte du dispositif

1.1. Description et historique du dispositif

Le plan Ecophyto initié en 2008, et déclinaison française de la Directive 2009/128 dite directive SUD, a, entre autres, induit la création du dispositif DEPHY EXPE en 2010, dont l'objectif est de réduire d'au moins 50 % l'utilisation des produits phytopharmaceutiques dans le cadre de systèmes de culture expérimentaux des filières végétales suivantes : arboriculture, maraîchage/légumier, horticulture, viticulture, grandes cultures (Emonet et al. 2024). Le dispositif DEPHY EXPE 2 a démarré en 2018 avec 260 systèmes de culture répartis dans 41 projets et avec un objectif renouvelé : la restriction de l'utilisation de produits phytopharmaceutiques à l'ultime recours.

Afin de valoriser les données et apprentissages au fil des années, les porteurs et porteuses de projet ont renseigné des informations sur les pages web du site EcophytoPIC (<https://ecophytopic.fr/dephy/les-projets-dephy-expe-2-2018-2024>) selon la structure suivante, détaillée dans Emonet et al. 2024 : pages « Projet », pages « Sites », pages « Systèmes ». Les pages « Systèmes » sont celles qui contiennent les descriptions générales des systèmes de culture, les leviers utilisés ainsi que des résultats de performance choisis par les expérimentateurs. Outre ces pages web, des bases de données internes recensent divers éléments contextuels (personne contact, coordonnées GPS, etc.). Le présent article a pour objectif de fournir un jeu de données exploitable regroupant des informations de ces différentes sources et d'une récolte de données *post hoc*.

1.2. Approche agronomique

1.2.1. Modèle initial

On généralise le cadre conceptuel défini par Aubertot et Robin (2013) selon l'équation 1. On remplace donc le « profil des dégâts » étudié dans l'article cité par un ensemble de performances (cadre plus général). La performance est ici entendue comme un ensemble d'indicateurs permettant de caractériser la durabilité d'un système de culture. Le présent travail se place à l'échelle du système de culture (noté SdC par la suite) et dans le cadre de la durabilité restreinte i.e. de la durabilité qualifiant « la capacité des systèmes [...] à être durables par et pour eux-mêmes » (Craheix et al. 2011). La situation de production est vue à la manière de Aubertot et Robin (2013) : « les composantes physiques, chimiques et biologiques – outre les cultures – d'une parcelle donnée (ou agroécosystème) ainsi que son environnement, incluant les déterminants socio-économiques qui affectent les décisions de l'exploitant



agricole » [Traduction libre]. Le système de culture (SdC) est ici entendu comme « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique » (Sebillotte 1990). Un SdC se décompose alors en une succession culturale et un ensemble d'itinéraires techniques.

1.2.2. Modèle modifié

Les paragraphes suivants présentent les raisons pour lesquelles il est nécessaire d'adapter le modèle. En effet, le cadre agronomique initial décrit ci-dessus ne permet pas une collecte *ex post* des données du dispositif DEPHY EXPE 2. Il devient donc indispensable de proposer un cadre moins restrictif et mieux adapté à l'exploitation des données

La description de SdC aussi divers que ceux traités dans le dispositif DEPHY EXPE 2 renvoie à la question de la précision de la description. En effet, les SdC traitent de filières agricoles différentes, qui mobilisent des descriptions de systèmes différentes. Une approche par "levier agroécologique" est donc à privilégier afin de trouver une échelle de description commune pour l'ensemble des SdC. L'ensemble des leviers mis en place est vu comme un bon représentant du SdC. L'échelle *leviers* s'éloigne en partie de la notion de succession culturale et d'itinéraire technique précis mais elle a l'intérêt d'être incluse dans des nomenclatures réutilisables (par exemple, Heinen et al. 2024). Les "leviers" sont définis comme : « une pratique ou un ensemble de pratiques alternatives permettant d'éviter ou de réduire l'utilisation de produits phytopharmaceutiques » (ECOPHYTOPIC 2025b).

La situation de production ne peut pas être réellement explicitée avec les données disponibles dans le cadre du dispositif DEPHY EXPE 2. En effet, aucune nomenclature préexistante n'a été utilisée sur l'ensemble du dispositif et la récolte de données uniformisées *a posteriori* paraît trop chronophage. Afin de traiter de manière globale l'ensemble des systèmes, il est alors décidé d'intégrer la notion de situation de production dans l'évaluation des performances. De cette façon, la situation de production n'est plus à expliciter dans le modèle. Dans la pratique, cela signifie que les performances sont évaluées de manière subjective par une remise en contexte de celles-ci dans la situation de production du système de culture (les performances obtenues sont-elles satisfaisantes au regard de la filière, des conditions météorologiques rencontrées, du contexte pédoclimatique, des populations de ravageurs, des invasions, des aides actuellement disponibles, du contexte socio-économique, etc ?). Le modèle agronomique qui en découle perd alors sa capacité à prédire les performances via la connaissance des SdC et de la situation de production et se concentre sur les leviers les plus généralisables. Plusieurs hypothèses sous-tendent ce modèle : (1) plusieurs situations de production sont représentées dans le jeu de données, (2) ces situations de production sont représentées de façon égale. Ces hypothèses sont à mettre en regard avec les métadonnées présentées en section 0.

Le modèle agronomique final est présenté en **Équation 1** : Modèle agronomique modifié. Ce modèle permet de fournir des faisceaux de preuves des services rendus par certains leviers ou combinaisons de leviers, mais ne permet pas de modéliser précisément la performance ou de généraliser l'intérêt des leviers car la situation de production n'est pas explicitée. Ce modèle agronomique sert de base au jeu de données présenté.

$$L = P \mid SP, \text{ avec } \begin{cases} L = \text{ensemble de leviers tels que : leviers} \approx SdC \\ P \mid SP = \text{évaluation subjective de la performance remise} \\ \text{en contexte dans sa situation de production} \end{cases}$$

Équation 1 : Modèle agronomique modifié



2. Description du jeu de données

2.1. Présentation des fichiers joints

L'ensemble des données brutes décrites ci-après est disponible dans le fichier *DEPHY_EXPE_2_dataset_COMPLET.csv*. Un fichier prétraité est également disponible pour simplifier les analyses rapides du jeu de données : *DEPHY_EXPE_2_dataset_SIMPLIFIE.csv*.

2.2. Descriptions détaillées des variables

2.2.1. Description des clés

Dans les deux fichiers, on trouve l'identifiant du projet (*ID_projet*), du site expérimental (*ID_site_experimental*) et du système de culture (*ID_système*). Une ligne correspond à un SdC. La clé primaire du jeu de données est donc le triplet des identifiants. En effet, dans le cadre de DEPHY EXPE 2 (voir section 0), les projets ont un ou plusieurs sites expérimentaux qui hébergent un ou plusieurs systèmes de culture. Ce jeu de données dispose de 120 systèmes de culture différents (sur les 226 systèmes présents dans le dispositif DEPHY EXPE 2). Le nombre de système étudié est en effet contraint par l'exhaustivité de la récolte de données (voir section 0).

2.2.2. Description des variables relatives aux métadonnées

Les métadonnées permettent de mettre en contexte les systèmes dans le cadre de l'ensemble du dispositif DEPHY EXPE 2 - et servent également à caractériser de manière très succincte une partie de la situation de production. Dans les deux fichiers, les métadonnées sont les suivantes (on précise ici nom_de_la_colonne : type ou valeurs des données) : filière (*META_Filiere_projet* : maraîchage, grandes cultures - polyculture élevage, culture tropicale, horticulture, viticulture, arboriculture), protocole (*META_Type_de_protocole* : essai système, observatoire piloté), conduite (*META_Conduite* : 0 PPP, AB, conventionnelle), localisation de la station expérimentale (*META_Coordonnees* : coordonnées GPS – WSG84 – arrondie à la première décimale pour anonymiser), période d'expérimentation (*META_Periode* : année_début-année_fin).

On entend par *essai système* un essai expérimental de SdC dans lequel les règles de décision sont figées dans le temps en opposition aux *observatoires pilotés* dont les règles de décision peuvent évoluer au cours du projet selon les observations réalisées ou les résultats obtenus. Concernant la colonne *conduite*, 0 PPP correspond à une conduite menée sans produits phytopharmaceutiques hors produit de biocontrôle, AB à une conduite menée en accord avec le cahier des charges de l'Agriculture Biologique et *conventionnelle* est la conduite par défaut. Lorsqu'un système était à la fois 0 PPP et AB, seule la mention AB apparaît. Concernant les filières, elles sont définies à l'échelle *projet* et plusieurs filières sont autorisées par projet. La période en années durant laquelle le projet a été mené fait référence à la campagne agricole (les deux bornes sont incluses).

2.2.3. Description des variables relatives aux leviers agroécologiques

Dans les deux fichiers, les leviers agroécologiques sont décrits de la même manière. Les colonnes exposant les leviers sont organisées par couche. Les couches sont définies par le projet AGROWISE (Heinen et al. 2024) et correspondent aux différents niveaux de la nomenclature des leviers. Les colonnes exposent les couches 0 à 3 avec comme en-tête *LEVIERS_couche_x*, x étant la couche.

Chaque entrée dans ces colonnes donne les codes correspondant aux pratiques mises en place sur le système de culture (e.g. « 8 » pour la couche 0 ou « 2.1.1.2 » pour la couche 3, voir **Tableau 19** qui décrit la nomenclature AGROWISE). L'information de la mise en place d'un levier sur un système de culture est binaire (levier *présent* ou *absent*). La correspondance code / levier ou catégorie de leviers est permise par la nomenclature AGROWISE (AGROWISE 2025, fichier téléchargeable). Les codes sont séparés dans les entrées par des virgules au sein d'une même couche. Par exemple, si pour un



système de culture, le code 1.1.1.1 est noté dans la colonne LEVIERS_couche_3, alors cela signifie que ce système met en place le levier « *Use Resistant And/or Tolerant Cultivars* ».

Tableau 19 : Fonctionnement de la nomenclature AGROWISE (AGROWISE 2025)

Couche	Noms de la couche dans la nomenclature AGROWISE	Exemple de levier	Exemple de code
0	IPM principe	Prevention and suppression	1
		Decision making	2
1	Target	Decision Support Systems & Thresholds	3.1
		Hygiene measures and biosecurity	1.6
		Amendments	1.4
2	Strategy	Harvest Management	1.3.3
		Crop management	1.3.2
		Cultivar And Rootstock Diversity	1.1.1
3	Layer	Crop rotation	1.1.2.1
		Use resistant And / or Tolerant Cultivars	1.1.1.1
		Intercropping	1.1.2.2

Description des variables relatives aux performances

Les colonnes de type *PERF_catégorie_performance* décrivent les performances estimées dans le contexte de la situation de production du SdC (voir **Équation 1** : Modèle agronomique modifié **Équation 1**) au travers de 15 indicateurs qualitatifs (plus précisément catégoriels ordonnés) organisés par catégories de performances. Ces indicateurs proviennent d'une sélection modifiée des indicateurs de l'outil d'évaluation multicritère MASC 2.0 (Craheix et al. 2011). Les détails des choix réalisés sont disponibles en Annexe A. Les indicateurs et les catégories utilisés sont présentés dans le **Tableau 20**.

Tableau 20 : Indicateurs de performances utilisés dans le jeu de données

Catégorie	Indicateurs
Economie	Rentabilité, Surcoût en matériel
Agronomie	Maîtrise des adventices ; Maîtrise des ravageurs, Maîtrise des maladies ; Maîtrise de la fertilité physicochimique à long terme (état structural, pH, fertilité P-K, PAS N)
Social	Complexité des interventions culturales et des connaissances à acquérir ; Surcharge de travail ; Difficulté physique et risque pour la santé (TMS, CMR, etc.)
Environnement	Contribution à la qualité des eaux (pesticides, phosphates, nitrate), de l'air (pesticides, NH ₃ , NO ₂) et du sol (MO, érosion, toxiques accumulés) ; Pression sur les ressources abiotiques (eau, énergie, phosphates, minéraux, etc.) ; Conservation de la faune ; Conservation de la flore ; Conservation des micro-organismes du sol ; IFT global

Selon les fichiers, il est important de noter que les entrées concernant les performances sont différentes :



Concernant le fichier *DEPHY EXPE 2 dataset COMPLET.csv*, une entrée est une distribution de la performance estimée par un (une) expérimentateur (expérimentatrice) sur un support de quatre notes ordonnées ainsi : « Très satisfaisant », « Satisfaisant à Moyennement satisfaisant », « Moyennement satisfaisant à Peu satisfaisant », « Peu satisfaisant ». Cette distribution est représentée par quatre fréquences attribuées à ces notes – dans le même ordre – séparées par le symbole « | » (e.g. l'entrée « 0.1 | 0.6 | 0.3 | 0 »). La distribution entre quatre notes permet à l'expérimentateur ou l'expérimentatrice d'estimer l'incertitude liée à la fois au protocole de mesure et à la variabilité spatiale et temporelle (sur toutes les années d'expérimentations).

Concernant le fichier *DEPHY EXPE 2 dataset SIMPLIFIE.csv*, une entrée est une note moyenne calculée de la manière suivante : (1) une valeur numérique est attribuée à chaque note (« Très satisfaisant » : 1, « Satisfaisant à Moyennement satisfaisant » : 0.66, « Moyennement satisfaisant à Peu satisfaisant » : 0.33, « Peu satisfaisant » : 0), (2) la moyenne est calculée avec la formule : $\forall \text{ SdC}, \forall \text{ performance, moyenne} = \sum_{\text{note}} \text{note} \times \text{frequence}_{\text{note}}$. On obtient alors une note numérique moyennée comprise entre 0 et 1.

3. Matériel et méthode

3.1. Récolte des données

3.1.1. Récolte des métadonnées

La récolte des métadonnées s'est organisée sur la base d'un livrable obligatoire des projets du dispositif DEPHY EXPE 2 : les *Pages Systèmes* (voir à ce propos Emonet et al. 2024). Chaque porteur ou porteuse de projet remplit une page web par SdC (voir « DEPHY EXPE 2 (2018-2024) | Ecophytopic », 2025) dans laquelle il ou elle indique les caractéristiques du système, les leviers mis en place, des performances, des conclusions ou toute information qu'il ou qu'elle juge pertinente. Les métadonnées définies en section 0 sont disponibles sur ces pages web (exceptées les coordonnées GPS qui proviennent donc d'une base de données interne). Seules les pages web remplies et à jour sont utilisées. Certaines données indisponibles sont récupérées via une base de données interne également ou via la lecture plus attentive des *Pages Systèmes*.

3.1.2. Récolte des leviers agroécologiques

La récolte des leviers a été effectuée par l'équipe en charge du réseau DEPHY EXPE. Au fur et à mesure de la lecture des *Pages Systèmes*, les leviers sont relevés de façon binaire. Par défaut, le levier est absent et quand la description d'une pratique fait référence à un levier, celui-ci est ajouté (avec les catégories « parents » correspondantes). On ne définit pas de seuil pour l'ajout ou non d'un levier, qui relève de l'interprétation personnelle.

Après collecte initiale des données, une relecture des *Pages Systèmes* accompagnée d'une vérification de saisie a été réalisée pour les systèmes de culture présentant moins de 15 leviers agroécologiques (suspicion d'erreurs de saisie dues à un nombre de leviers anormalement bas). Ont été également attribués aux systèmes de culture, les 13 leviers dont les codes sont les suivants : 2.1.1.2, 2.1.2.1, 2.1.2.2, 2.1.2.5, 8.2.3.3, 8.2.3.2, 8.1.1.1, 8.1.1.2, 8.1.2.1, 8.1.2.2, 8.1.2.3, 8.1.2.4, 8.2.1.1. Cette attribution rend compte du fait que le dispositif DEPHY EXPE 2 demande des observations sur le terrain, l'identification des ravageurs et maladies et des évaluations, des rapports de suivi, etc.

3.1.3. Récolte des performances

La récolte initiale des indicateurs de performances des 120 SdC est réalisée par un panel de 82 expérimentateurs et expérimentatrices via le questionnaire en Annexe B. Un expérimentateur ou une expérimentatrice peut donc évaluer la performance de plusieurs systèmes. Dans la pratique, seules quelques personnes ont eu plus de 3 SdC à remplir (et jamais plus de 8). L'évaluation des



performances d'un SdC repose sur un avis *expert qualitatif* remis dans le contexte de sa situation de production et sans explicitation de celle-ci. L'évaluation est réalisée *indépendamment* pour les 15 indicateurs de performance d'un SdC (au sens statistique du terme). Ainsi, on ne dispose pas d'une distribution jointe mais des 15 distributions marginales de la performance.

Après récolte initiale des données, les indicateurs de performance non traités dans le questionnaire par les répondants ont été complétés par une répartition uniforme sur les quatre notes possibles. Exception a été faite pour les systèmes en conduite *hors-sol* concernant l'indicateur *Maîtrise des adventices* : 10 points ont alors été attribués à la note *Très satisfaisante*.

La possibilité de récolter à la fois les performances et les leviers conditionne le nombre de systèmes du jeu de données : seuls 120 SdC sont dans le jeu de données (sur 226). C'est donc seulement si une réponse était fournie au questionnaire et si la page « Système » était fiable que le système a été placé dans l'échantillon présenté dans le jeu de données.

4. Représentativité du jeu de données par rapport à l'ensemble du dispositif et visualisation sommaire des données

4.1. Métadonnées

D'un point de vue géographique, le Nord-Est de la France est légèrement sous représenté par rapport au dispositif complet (les GCPE étant en partie situés à cet endroit) mais il n'y a pas de biais notable sur le reste du territoire national (voir **Figure 24**).

Toutes les filières végétales sont représentées dans le jeu de données (voir **Figure 25**). Par rapport à l'ensemble du dispositif, la filière *Grandes cultures – Polyculture Elevage* est sous représentée d'environ 15 % et les autres filières sont normalement représentées (moins de 6 % de sur / sous représentation). Les proportions des conduites des systèmes de culture de l'échantillon sont les suivantes : *AB* : 24.2 %, *0 PPP* : 25 %, et *conventionnelle* : 50.8 %. Ces proportions sont représentatives de celles du dispositif complet. Les années couvertes par le jeu de données s'étendent de 2018 à 2024 et on constate bien la présence des deux vagues d'appel à projets qui débutent en 2018 et en 2019. La plupart des systèmes sont conduits sur 5 ou 6 ans. Le jeu de données contient 55.8 % d'observatoire pilotés contre 44,2 % d'essais systèmes.

6 projets sur les 41 du dispositif DEPHY EXPE 2 ne sont pas inclus dans l'échantillon et 5 projets cumulent plus de 6 systèmes pris en compte (2 projets cumulent 11 et 10 systèmes et comptent donc pour environ 9 % de l'échantillon chacun). Deux systèmes du même projet sont souvent davantage semblables que deux systèmes de projets différents.

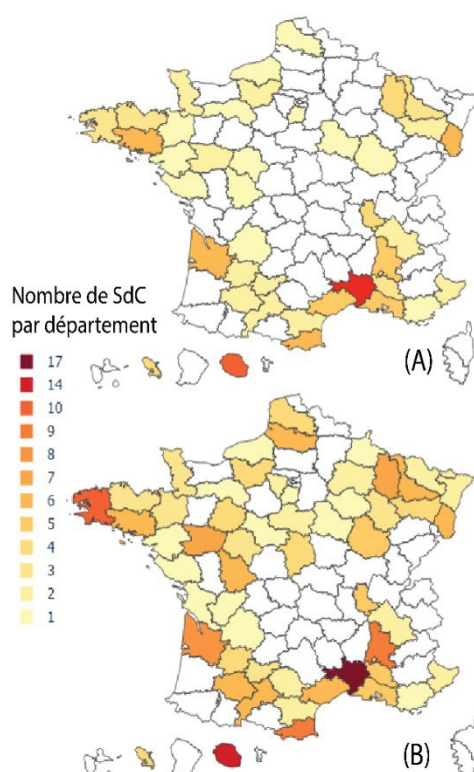


Figure 24 : Localisation des SdC. (A) : jeu de donnée présenté ; (B) : ensemble du dispositif DEPHY EXPE 2.

4.2. Visualisation des performances moyennes

La visualisation des distributions de probabilité multivariées sur des variables potentiellement non-indépendantes étant *a priori* difficile, on ne présente dans cet article qu'une visualisation des performances basée sur les notes moyennes (données tirées du fichier : *DEPHY_EXPE_2_dataset_SIMPLIFIE.csv*).

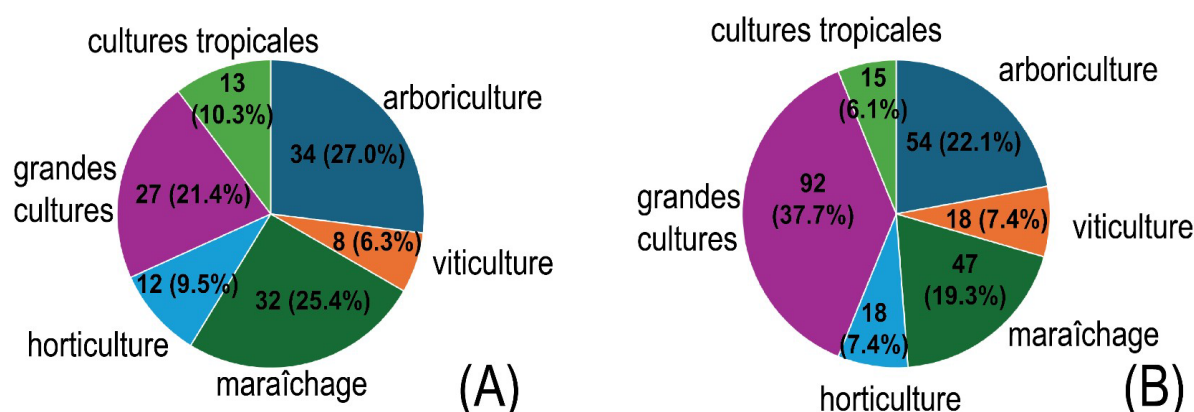


Figure 25 : Répartition des systèmes de cultures DEPHY EXPE 2 par filière. (A) : Systèmes présents dans le jeu de données (120) ; (B) : Ensemble des 226 systèmes DEPHY EXPE 2.

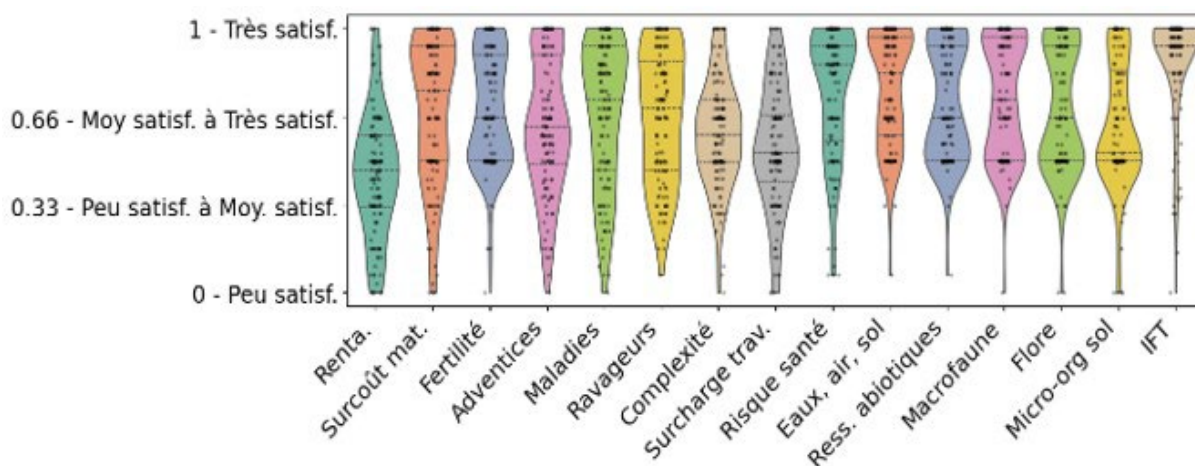


Figure 3 : Répartition des systèmes de cultures DEPHY EXPE 2 par filière. (A) : Systèmes présents dans le jeu de données (120) ; (B) : Ensemble des 226 systèmes DEPHY EXPE 2.

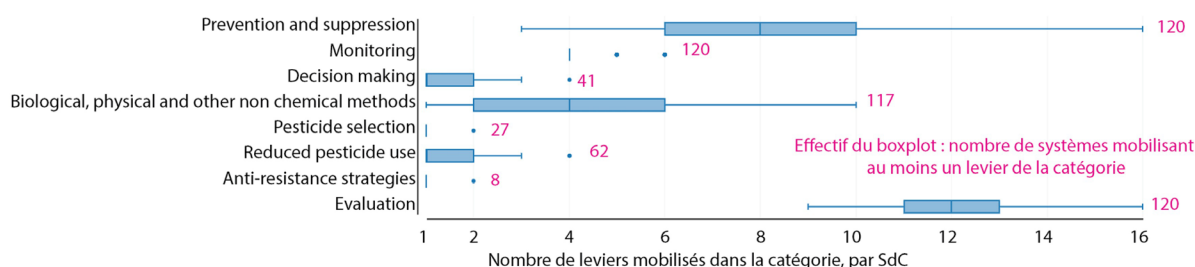


Figure 4 : Boxplots des leviers mobilisés par les SdC, par catégories de l'IPM

4.3. Visualisation des leviers

La visualisation proposée utilise la couche 0 de la nomenclature AGROWISE : les catégories de l'IPM. Cette visualisation permet de voir les catégories les plus mobilisées dans le jeu de données en termes de systèmes mais également en termes de nombre de leviers intra-catégorie.

5. Conclusion, limites et perspectives

Ce jeu de données fournit des données condensées mobilisables dans une synthèse du dispositif DEPHY EXPE 2. Il fournit un cadre conceptuel et un ensemble de nomenclatures adaptées au dispositif DEPHY EXPE 2 et qui permettent de faire le lien avec d'autres projets potentiels.

Ce jeu de données est récolté après la fin des projets, ce qui limite l'acquisition de données complètes et harmonisées. En effet, une récolte des données anticipée permettrait aux expérimentateurs et expérimentatrices d'évaluer également la mise en place des leviers. Cette anticipation permettrait également d'harmoniser la description de la situation de production ou encore d'augmenter ou de préciser les indicateurs de performances retenus. Il pourrait également être envisagé la mise en place d'entretiens semi-directifs pour la récolte des différentes données (à la place d'un questionnaire) pour diminuer les interprétations et biais personnels évoqués ci-avant.

Il est prévu de valoriser ce jeu de données dans un prochain article en fournissant une analyse statistique inférentielle qui utilise le cadre agronomique explicité dans cet article.



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

Matthieu HIRSCHY : <https://orcid.org/0000-0002-2711-7714>

François BRUN : <https://orcid.org/0000-0002-1079-2385>

Contributions des auteurs et autrices (CRediT)

Pierre Schneider : Conceptualization, Data curation, Investigation, Methodology, Supervision, Software, Visualisation, Writing – original draft, Writing – review & editing ; *Louise Malot* : Data curation, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing ; *Romario Jacques* : Investigation, Writing – review & editing ; *Matthieu Hirschy* : Project administration, Funding acquisition, Writing – review & editing, Ressources, Supervision ; *François Brun* : Methodology, Writing – review & editing ; *Emeric Emonet* : Writing – review & editing.

Déclaration d'intérêt

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

Matériel complémentaire

L'annexe A, *Sélection des performances du jeu de données* adresse, sous format .pdf, présente les choix effectués sur les indicateurs de performances du jeu de données en repartant des indicateurs de l'outil MASC 2.0.

L'annexe B, *Questionnaire perf envoyé aux expérimentateurs*, sous format .xlsx, correspond au questionnaire envoyé aux expérimentateurs et expérimentatrices pour qu'ils évaluent leurs performances remises dans le contexte de leur situation de production.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été financé dans le cadre du dispositif DEPHY : action de la Stratégie Écophyto 2030 pilotée par les ministères chargés de l'Agriculture, de l'Environnement, de la Santé et de la Recherche, avec le soutien financier de l'Office français de la biodiversité.

Remerciements

Le travail de récolte des données n'aurait pas été possible sans l'aide de tous les répondants du questionnaire et de tous les expérimentateurs et expérimentatrices impliqués dans le dispositif DEPHY



EXPE 2. Nous les remercions pour leur travail et leur coopération. Nous remercions également les porteurs et porteuses de projet et l'ensemble de la *Cellule d'Animation Nationale DEPHY* pour leur aide méthodologique et conceptuelle. Nous saluons particulièrement l'aide des *Experts filières*, de la *Cellule Référence* et de l'*Equipe Agrosyst*. Nous remercions tout particulièrement Jean-Noël Aubertot, président du CST DEPHY, Marie-Cathy Eckert, ancienne *Experte filière cultures légumières et* Alexandra Jullien, enseignante chercheuse à AgroParisTech, pour leur aide sur la conception méthodologique de la récolte des données. Nous adressons également un remerciement à Pauline Cadoret pour sa relecture attentive.

Nous remercions également les projets dont notre travail se nourrit. Merci à l'INRAE et ses partenaires pour la nomenclature de leviers AGROWISE et pour le développement de l'outil MASC 2.0.

Enfin, nous remercions les personnes impliquées dans la publication de cet article, et particulièrement, Aurélie Gauguary, pour son accompagnement.

Références bibliographiques

AGROWISE. 2025. « IPM Taxonomy AGROWISE ». App AGROWISE. <https://agrowise-ipm.softtr.app/ipm-taxonomy-flat#tab2>.

Aubertot, Jean-Noël, et Marie-Hélène Robin. 2013. « Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases ». *PLOS ONE* 8 (9): e73202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073202>.

Craheix, Damien, Frédérique Angevin, Jacques-Eric Bergez, et al. 2011. *MASC 2.0, Un outil pour l'analyse de la contribution des systèmes de culture au développement durable. Présentation & principes d'utilisation*. INRA - AgroParisTech - GIS GC HP2E. <https://means.inrae.fr/Media/files/masc/Presentation-et-principes-d-utilisation-de-MASC-2.0>.

ECOPHYTOPIC. 2025a. « DEPHY EXPE 2 (2018-2024) | Ecophytopic ». <https://ecophytopic.fr/dephy/les-projets-dephy-expe-2-2018-2024>.

ECOPHYTOPIC. 2025b. « Leviers PIC ». ECOPHYTOPIC. <https://ecophytopic.fr/search/base-leviers?page=1>.

Emonet, Emeric, André Chabert, Romario Jacques, Louise Malot, et Matthieu Hirschy. 2024. « DEPHY EXPE 2 : Expérimentations de systèmes agroécologiques pour un usage des pesticides en ultime recours ». *Innovations Agronomiques* 98: 1. <https://doi.org/10.17180/ciaq-2024-vol98-art01>.

Heinen, Janina, Anna Berlin, et Riccardo Bommarco. 2024. *Guidelines for Farm-Specific or Crop-Specific Rules for Mitigating Pesticide Impacts While Ensuring Sustainable Agriculture*. No. 101148740. AGROWISE. Sveriges Lantbruksuniversitet – Swedish University of Agricultural Sciences for the European Project AGROWISE coordinated by INRAE. <https://eng-agrowise.hub.inrae.fr/results/harmonised-taxonomy-of-the-innovative-practices-and-systems-d2.1>.

Sebillotte, Michel. 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In *Les systèmes de culture*. Un Point sur... - INRA. INRA. <https://hal.inrae.fr/hal-02852812>.

Annexe A : Sélection des performances du jeu de données à partir des indicateurs de l'outil MASC 2.0

Cette annexe met en regard les indicateurs utilisés par l'outil MASC 2.0 (voir Figure 1) avec les performances mobilisées dans le jeu de données (voir Tableau 1). Les choix effectués sont présentés en Tableau 1 et aboutissent à la liste des indicateurs de performances présents dans le questionnaire envoyés aux expérimentateurs et expérimentatrices pour la récolte des données sur les performances des systèmes expérimentés.

On rappelle que pour avoir un bon taux de réponse au questionnaire de récolte des données, on souhaite avoir 15 indicateurs maximum. Des choix sont faits pour écarter des indicateurs potentiellement pertinents mais jugés moins intéressants que d'autres dans le cadre de ce jeu de



données *post hoc*. On rappelle également qu'aucune agrégation n'a eu lieu dans le jeu de données (au sens de celles que propose l'outil MASC 2.0, voir Figure 1). Des regroupements entre indicateurs sont néanmoins réalisés (voir Tableau 1). En somme, l'outil MASC 2.0 a simplement fourni une liste d'indicateurs pour évaluer la contribution au développement durable à l'échelle *système de culture*.

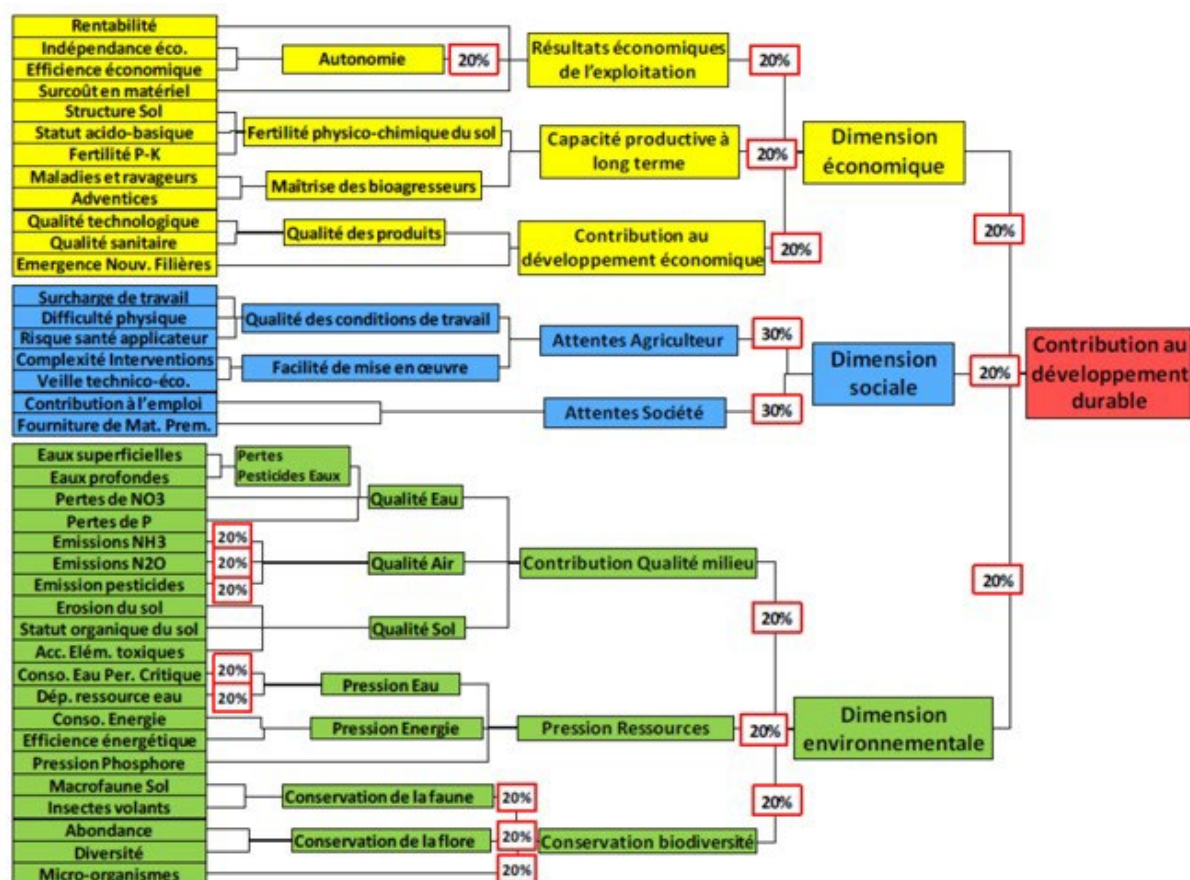


Figure 1 : Structure des indicateurs utilisés par Craheix et al. (2011a). Ne pas tenir compte des pourcentages.

Tableau 1 : Choix effectués vis-à-vis des indicateurs de performances définis par Craheix et al. (2011b) pour la récolte des données concernant les performances

CATEGORIE DE PERFORMANCES	JUSTIFICATION DES CHOIX EFFECTUÉS
ÉCONOMIE	Seuls les indicateurs <i>Rentabilité</i> et <i>Surcoût en matériel</i> sont mobilisés dans la partie <i>Économie</i>. La partie <i>Autonomie</i> est mise de côté, car il a été considéré que l'autonomie d'un système relevait davantage du niveau de l'exploitation agricole que du système de culture. Le volet <i>Contribution au développement économique</i> a été retiré de l'analyse. On justifie cela par le prisme du jeu de données qui s'attarde sur une vision locale du système de culture sans s'intéresser directement, dans la récolte de données, aux aspects sociétaux. Le volet <i>Capacité productive à long terme</i> est remanié et mis à l'échelle d'une



	catégorie sous le nom <i>Agronomie</i> (voir ci-après).
AGRONOMIE	Cette catégorie correspond au volet <i>Contribution au développement économique</i> de la Figure . Elle est remaniée afin de faire le lien avec la façon dont le dispositif DEPHY EXPE 2 a raisonné et pour ne pas perdre les répondants. Ainsi, ont été séparés <i>Maîtrise des maladies</i> et <i>Maîtrise des ravageurs</i>. L'indicateur <i>Maîtrise des adventices</i> a été gardé tel quel. De plus, l'ensemble des indicateurs du volet <i>Fertilité physico-chimique</i> ont été regroupés en un seul indicateur : <i>Maîtrise de la fertilité physicochimique à long terme (état structural, pH, fertilité P-K)</i>.
SOCIAL	Le volet <i>Attentes de la société</i> a été écarté pour la même raison que le volet <i>Contribution au développement économique</i> (cf. ci-avant). Les indicateurs du volet <i>Facilité de mise en œuvre</i> sont réunis sous la forme d'un indicateur : <i>Complexité des interventions culturelles et des connaissances à acquérir</i>. L'indicateur <i>Surcharge de travail</i> est laissé tel quel. Les indicateurs <i>Difficulté physique</i> et <i>Risque santé applicateur</i> sont réunis en <i>Difficulté physique et risque pour la santé (TMS, CMR, etc.)</i>.
ENVIRONNEMENT	Tous les indicateurs du volet <i>Contribution Qualité milieu</i> sont regroupés en un indicateur : <i>Contribution à la qualité des eaux (pesticides, phosphates, nitrate), de l'air (pesticides, NH3, NO2) et du sol (MO, érosion, toxiques accumulés)</i>. Idem pour le volet <i>Pression des ressources</i> qui devient l'indicateur : <i>Pression sur les ressources abiotiques (eau, énergie, phosphates, minéraux, etc.)</i>. Ces deux regroupements permettent ainsi de rester transversal à chaque SdC car chacun d'entre eux n'a pas mesuré les mêmes indicateurs au sein de ces volets. Les volets <i>Conservation de la faune</i>, <i>Conservation de la flore</i> sont repris comme indicateurs avec l'indicateur <i>Conservation des micro-organismes du sol</i>. Enfin, l'indicateur <i>IFT</i> est ajouté, car tous les systèmes l'ont mobilisé dans le cadre de DEPHY EXPE 2. Ainsi, la récolte des données reste en cohérence avec l'enjeu majeur de réduction de l'usage de produits phytopharmaceutiques propre au dispositif DEPHY.

Annexe B : Questionnaire sur les performances envoyé aux expérimentateurs et expérimentatrices

Cette annexe est sous forme d'un fichier « .xlsx » disponible au DOI : <https://doi.org/10.57745/I9KELA>

Références bibliographiques des annexes :

Craheix, D., F. Angevin, J.-E. Bergez, C. Bockstaller, B. Colomb, L. Guichard, R. Reau, W. Sadok et T. Doré. MASC 2.0, Un outil pour l'analyse de la contribution des systèmes de culture au développement durable. Présentation & principes d'utilisation. INRA - AgroParisTech - GIS GC HP2E. 2011. (Rapport disponible sur : <https://means.inrae.fr/Media/files/masc/Presentation-et-principes-d-utilisation-de-MASC-2.0> [visité le 04/09/2025]).

Craheix, D., F. Angevin, J.-E. Bergez, C. Bockstaller, B. Colomb, L. Guichard, R. Reau, W. Sadok et T. Doré. Un outil pour l'analyse de la contribution des systèmes de culture au développement durable. Jeu complet de fiches critères de MASC 2.0. INRA _ Agro-ParisTech _ GIS GC HP2E. 2011. (Rapport disponible sur : <https://means.inrae.fr/Media/files/masc/Jeu-complet-de-fiches-criteres-MASC-2.0> [visité le 04/09/2025]).



Pour citer cet article : Pierre Schneider, Louise Malot, Romario Jacques, Matthieu Hirschy, François Brun, et al.. Summary of the DEPHY EXPE 2 system: a post-hoc dataset on the performance and agroecological levers of 120 cropping systems using plant protection products as a last resort. *Innovations Agronomiques*, 2026, 109, pp.223-236. [10.17180/ciaq-2026-vol109-art18](https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol109-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.



Synthèse du dispositif DEPHY EXPE 2 : proposition méthodologique pour réaliser une synthèse transversale

Pierre SCHNEIDER^{1,2}, Matthieu HIRSCHY^{1,2}, Romario JACQUES^{1,2}, Louise MALOT^{1,2},
Emeric EMONET^{1,2}

¹ ACTA - Les Instituts Techniques Agricoles, 149 rue de Bercy, 75012 Paris

² Cellule d'Animation Nationale DEPHY, Equipe EXPE, Paris

Correspondance : matthieu.hirschy@acta.asso.fr, emeric.emonet@acta.asso.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art19>

Résumé

DEPHY EXPE 2 est un dispositif expérimental visant à réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques regroupant 41 projets (toutes filières végétales) et 226 systèmes de cultures à l'échelle du territoire français. Ce travail propose une méthodologie de réalisation d'une synthèse transversale du réseau. Cette méthodologie se base sur les méthodes de revue de la portée, de méta-analyse et de revue systématique. Elle dépasse le cadre des synthèses statistiques préexistantes tout en capitalisant l'expérience qui peut en être extraite pour fournir des points d'attention particuliers. Elle se conduit en deux temps. Une première phase adresse des problématiques d'étude liées à des sujets d'intérêt (organisationnel, socio-économique, technique, etc.) et une seconde phase propose la réalisation d'une synthèse par sujet.

Mots-clés : agronomie, système de culture, méthodologie, pesticides, meta-analyse, revue systématique, revue de la portée

Abstract: Summary of the DEPHY EXPE 2 network: methodological proposal for producing a transversal synthesis

DEPHY EXPE 2 is an experimental network aimed at reducing the use of plant protection products. It includes 41 projects (all type of crops) and 226 cropping systems across the entire French territory. This work proposes a methodology for producing a cross-cutting synthesis of the network. This methodology is based on the methods of scoping review, meta-analysis and systematic review approaches. It goes beyond a pre-existing statistical summary, while capitalising on the experience that can be drawn from them, in order to identify specific points of attention. The approach is conducted in two phases. The first phase addresses research questions related to topics of interest (organisational, socio-economic, technical, etc.), while the second focuses on producing a synthesis for each topic.

Keywords: agronomy, cropping system, methodology, pesticides, meta-analysis, systematic review, scoping review

1. Introduction

1.1. Contexte du dispositif

Dans le contexte des plans ECOPHYTO II et II+, la composante expérimentale du réseau DEPHY, DEPHY EXPE, constitue une action structurante pour évaluer et promouvoir des systèmes agricoles réduisant l'usage des pesticides tout en restant performants sur les plans économique, environnemental et social. La mouture DEPHY EXPE 2, lancée entre 2017 et 2018, a mobilisé 41 projets couvrant l'ensemble des filières végétales — grandes cultures, arboriculture, viticulture, maraîchage, horticulture



et cultures tropicales — sur près de 200 sites expérimentaux. Ce dispositif expérimental se place à l'échelle des systèmes de cultures (noté SdC par la suite).

Arrivés à terme en 2025, chacun des projets a produit différents livrables, que ce soit individuellement ou dans le cadre du réseau DEPHY. Ne seront abordés ici que ceux demandés par la Cellule d'Animation Nationale (CAN). Il existe ainsi les pages EcophytoPIC, qui se déclinent en un triptyque Projet-Site-Système, visant à décrire progressivement les projets, les sites expérimentaux et les systèmes de cultures testés, avec une mise en avant plus ou moins hétérogènes des résultats. En effet, bien que la trame des pages soit similaire, chaque contributeur a été libre d'exprimer les résultats et thématiques d'intérêt propres à son projet. A ces pages, s'ajoutent les articles scientifiques publiés dans la revue *Innovations Agronomiques*, qui présentent de façon plus conventionnelle et en une dizaine de pages les expérimentations et leurs résultats. Des livrables sous format vidéo sont également disponibles, *via* les webinaires thématiques réalisés à mi-parcours des projets, ainsi que les replays des CIAg (Carrefours de l'Innovation Agronomique) de 2024 et 2025. Enfin, un livrable met à disposition les données des itinéraires techniques de chaque système de culture innovant, mais la rigueur de la réalisation de cette tâche fut particulièrement hétérogène selon les projets. En somme, l'ensemble de ces livrables constitue une ressource riche mais hétérogène, mobilisable pour la rédaction d'une synthèse transversale.

Les projets étudient chacun une problématique de travail propre concernant la réduction des PPP (produits phytopharmaceutiques). Elle dépend du contexte, c'est-à-dire notamment de l'intérêt de la – ou des – filières concernées, des acteurs impliqués et plus largement du territoire. Le projet ALTO cherche par exemple à explorer la reconception des systèmes afin que les vergers reposent davantage sur les services écosystémiques, tandis que le projet NextGen'VITI met l'accent sur une combinaison de leviers d'efficience, de substitution et de reconception afin d'étudier l'introduction de la robotique et des nouvelles technologies (CAN DEPHY 2018). Cette diversité s'accompagne d'un manque d'harmonisation des outils utilisés et des indicateurs mesurés.

Chaque projet est en grande partie responsable de la valorisation de ses résultats et conclusions individuelles. Néanmoins, il semble possible de mettre en perspective des résultats et des enseignements communs entre projets, voire entre filières, sur des sujets jugés pertinents de partager ainsi. Par exemple, les questions de valorisations des productions, les enseignements sur des protections physiques, ou encore l'apparition de nouveaux bioagresseurs peuvent être des sujets transversaux. Ainsi, une synthèse transversale est demandée à l'échelle réseau afin d'adresser ces sujets communs, de relier de façon pertinente les projets qui traitent ces sujets et, le cas échéant, d'en tirer une conclusion commune. Le travail réalisé sur cette synthèse permet aussi de prendre du recul et donc d'organiser au mieux la récolte des données pour DEPHY EXPE 3.

1.2. Synthèses préexistantes

1.2.1. Une synthèse statistique du dispositif insuffisante

Une synthèse statistique et inférentielle du dispositif concernant l'analyse des performances des systèmes de cultures (remises dans le contexte des situations de production des systèmes) en regard des leviers agroécologiques mis en place a été publiée (Schneider 2026). Cependant, celle-ci ne constitue pas à elle-seule = une synthèse suffisante des résultats du réseau EXPE 2.

D'une part, elle ne couvre qu'un sujet précis qui se cantonne au point de vue de la performance. Or, d'autres sujets peuvent être d'intérêt, comme par exemple, les freins à l'adoption des pratiques (dont les causes sont parfois autres que celles liées à la performance).

D'autres part, cette synthèse se base sur un jeu de données agrégé (Schneider et al. 2026), constitué après le terme des projets. Il se base sur des données d'enquête et ne couvre que 120 SdC sur les 226 que comptent DEPHY EXPE. Malgré un travail important d'agrégation et de recherche de



nomenclatures, ce jeu de données est lacunaire concernant le concept de *situation de production* et certains biais émergent d'après Schneider (2026).

Ainsi, la synthèse transversale du dispositif ne peut se cantonner à cette synthèse statistique, au risque de perdre une grande partie de la complexité des sujets traités.

1.2.2. Synthèses d'autres dispositifs similaires

Différentes initiatives ont eu pour objectif de réaliser des synthèses – parfois transversales – de dispositifs similaires à DEPHY EXPE 2 (DEPHY FERME notamment, réseau d'observation collectant des données d'exploitations agricoles visant à réduire l'usage des phytopharmaceutiques). Elles sont décrites plus précisément dans Schneider (2026). Plusieurs approches sont mobilisées : analyse descriptive ou statistique, analyse par filière ou par thématique. Afin de permettre la diversité des productions et des méthodes d'analyse dans la présente méthodologie, il convient de les rassembler dans un même cadre commun adaptable. Ce cadre doit alors être assez souple et ne pas se cantonner à une approche particulière selon la thématique traitée.

1.3. Recherche d'un cadre méthodologique

Le présent travail s'attarde donc sur la création d'un cadre méthodologique global qui permette de traiter l'ensemble des sujets et enseignements issus du dispositif DEPHY EXPE 2. Il propose un flux de travail ainsi que des références et points d'attention pour chaque étape méthodologique. Il se base notamment sur la synthèse statistique réalisée par Schneider (2026), qui constitue une preuve de concept d'une partie de la présente méthodologie afin de fournir une analyse réflexive sur le rôle des sujets transversaux.

2. Proposition de méthodologie

La proposition de méthodologie (Figure 1) est construite en deux phases : (1) une revue de la portée, (2) un ensemble de synthèses.

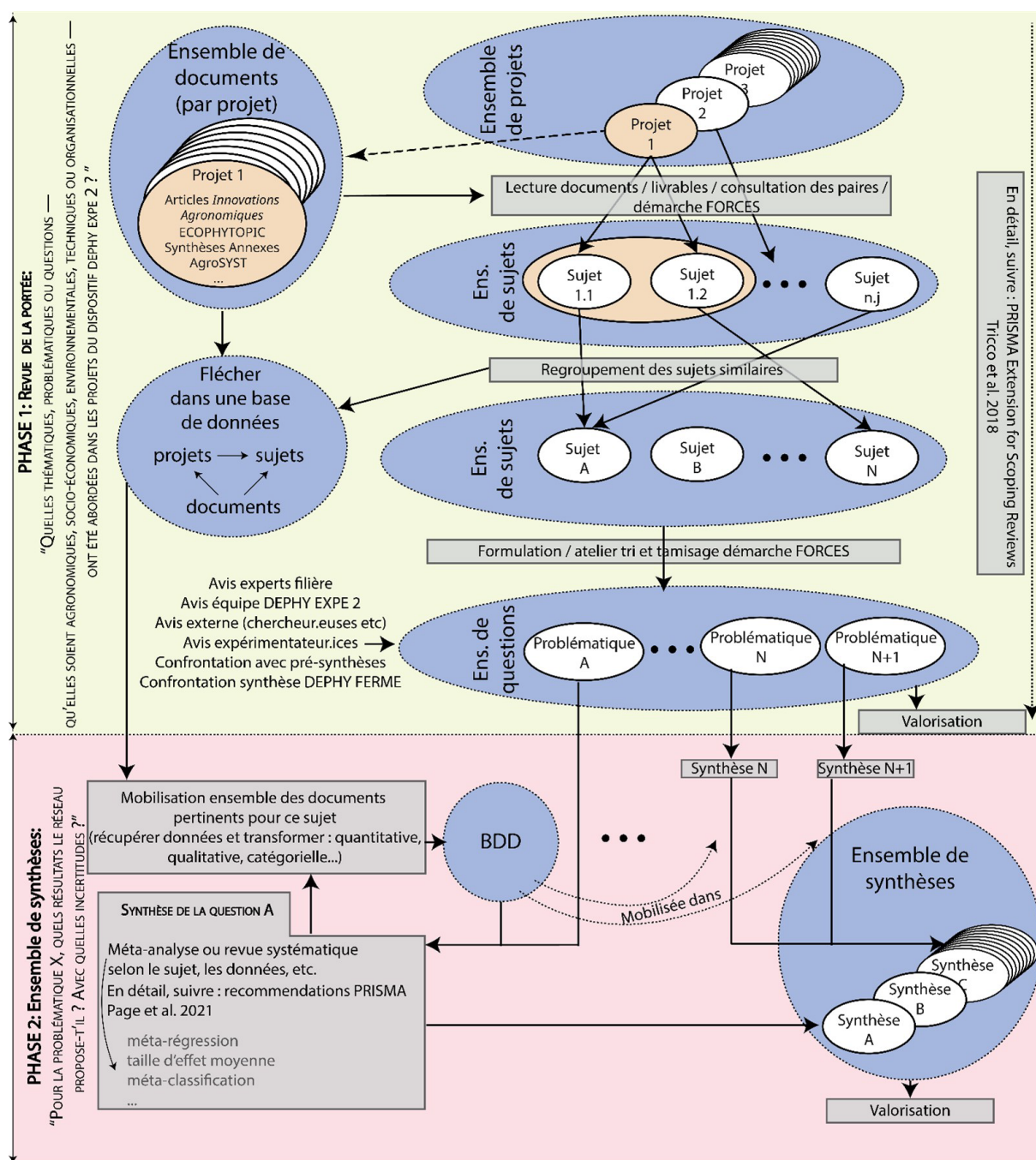


Figure 26 : Schéma de proposition méthodologique

2.1. Revue de la portée

La revue de la portée – *scoping review* en anglais – vise à cartographier l'ensemble des thématiques explorées dans les projets du dispositif DEPHY EXPE 2. Conformément à Munn et al. (2018), une revue de la portée permet (1) d'identifier les types de données et connaissances probantes disponibles, (2) d'examiner comment la recherche est menée sur un domaine donné — en l'occurrence la réduction de l'usage des PPP à l'ultime recours — et (3) de fournir une série de problématiques d'études pour de futures revues systématiques. Cette phase permet également – même si ça n'en est pas l'objectif premier ici – de clarifier les concepts clés présents dans la littérature issue de DEPHY EXPE 2 (par exemple : la notion d'Outil d'Aide à la Décision regroupe une variété d'outils plus ou moins



sophistiqués) et d'identifier des lacunes potentielles dans les connaissances (notamment grâce à un travail bibliométrique).

La revue de la portée se construit à partir de la consultation des différents acteurs (porteurs de projets, expérimentateurs, experts filières¹⁶) ainsi que de l'analyse des différents documents et livrables issus des projets). Elle vise à répondre à la question suivante :

« Quelles thématiques, problématiques ou questions — qu'elles soient agronomiques, socio-économiques, environnementales, techniques ou organisationnelles — ont été abordées dans les projets du dispositif DEPHY EXPE 2 ? ».

Afin de garantir la reproductibilité et la rigueur de la démarche, on peut se reporter à l'ensemble des étapes décrites dans l'article de Tricco et al. (2018) qui se base sur la déclaration PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses, Moher et al. 2009) et qui l'étend aux revues de la portée. Pour ancrer ces étapes dans le contexte du dispositif DEPHY EXPE 2, les étapes de *Selection of sources of evidence (screening and eligibility)* et *Data charting process* sont détaillées ci-après.

Selection of sources of evidence (screening and eligibility). À partir des différents documents issus des projets et des entretiens, des sujets – potentiellement plusieurs par projets – sont identifiés. Un sujet est entendu comme une innovation sur le plan agroécologique sur laquelle les connaissances ou pratiques obtenues paraissent intéressantes et pertinentes à un ensemble d'acteurs. Les sujets sont recherchés prioritairement dans les ressources conçues pour être diffusées (compte rendu, article scientifique, documents mis à disposition en ligne, livrables obligatoires, etc.).

Data charting process. Un sujet est alors formulé sous la forme d'une problématique de recherche et il est soumis aux différents acteurs du ou des projets en lien pour validation et / ou reformulation. Cette étape peut notamment s'appuyer sur les ateliers *tri et tamisage* de la démarche collaborative FORCES (Lefèvre et al. 2024). Une présentation des sujets à des acteurs se plaçant à l'échelle transversale, comme la CAN DEPHY et les Experts filières, ainsi que la confrontation avec des synthèses préexistantes dans des dispositifs proches – DEPHY FERME, DEPHY EXPE 1 – permet d'évaluer l'intérêt de réaliser des synthèses pour les sujets sélectionnés.

Il est essentiel de documenter précisément l'association entre chaque sujet et les projets qui y contribuent afin de pouvoir les mobiliser de façon adéquate lors de la réalisation des synthèses (voir section 2.2). Cette opération de fléchage permet également d'évaluer la contribution relative de chaque projet à un sujet donné, en tenant compte du volume, de la qualité et de la pertinence des éléments probants disponibles.

2.2. Ensemble de synthèses

La seconde phase répond aux problématiques adressées en première phase sous la forme d'un ensemble de synthèses. Elle propose un cadre analytique pour réaliser une méta-étude en s'inspirant des recommandations concernant les méthodes de méta-analyse et de revue systématique.

2.2.1. Etat de l'art des méthodes de revue systématiques et de méta-analyse

Plusieurs revues systématiques (appliquées à l'échelle de l'ensemble des documents produits dans le cadre de DEPHY EXPE 2) pourraient être envisagées pour faire les différentes synthèses. Néanmoins, comme le soulignent Makowski et al. (2018), « la revue systématique consiste en une conclusion

¹⁶ Expert filière : professionnel issu des instituts techniques ou des centres de recherche, chargé d'assurer le lien entre les réseaux EXPE et FERME, d'accompagner le réseau dans sa réflexion méthodologique en collectant des références, et de valoriser les références ainsi que l'expertise propre à chaque filière.



narrative résumant les études de la revue". Elle ne renseigne pas de manière quantitative "sur la force d'une relation causale, sur la taille des effets étudiés ou sur le niveau d'incertitude ». Une méta-analyse permet de combler ce manque. Elle trouve en effet les potentielles zones d'ombre des questions abordées, elle pointe les points de vue divergents en connaissance de la variabilité inter-études (et donc en caractérisant les biais) et elle permet ainsi de répliquer la démarche de la synthèse (Doré et al. 2011).

Il est important de noter que des confusions règnent parfois entre revue et méta-analyse. Une méta-analyse est « une synthèse statistique de données produites à partir d'études différentes, mais comparables » [Traduction libre, Chalmers et al. (2002)] ; tandis qu'une revue correspond à « la mise en place de stratégie pour limiter le biais [...] pour faire une synthèse des études pertinentes sur un sujet donné » [Traduction libre, Chalmers et al. (2002)]. La méta-analyse peut constituer une partie d'une revue, mais cela n'est pas systématique. Cela tranche avec la vision de Makowski et al. (2018) qui associe "revue" et "qualitatif". Dans le présent document, nous définissons la revue et la méta-analyse à la manière de Chalmers et al. (2002). Le mot synthèse – générique – est employé pour évoquer indifféremment une méta-analyse ou une revue.

Comme c'est déjà le cas dans certains domaines – science médicale notamment (Borenstein et al. 2021)– certains articles comme Makowski et al. (2014) ou Doré et al. (2011) recommandent l'usage plus systématique de la méta-analyse en agronomie. Néanmoins, il est important de noter que la valeur d'une méta-analyse peut considérablement diminuer si cette dernière n'est pas menée avec suffisamment de rigueur. Dans le cadre de la méta-analyse appliquée à l'agronomie, divers auteurs ont fait des recommandations qui sont compilées dans le **Tableau 21**.

Dans un autre registre, Krupnik et al. (2019) insiste sur le fait que « [lorsque les méthodes de méta-analyse] sont appliquées à des sujets fortement politisés situés dans une sphère de débat scientifique, [. . .], des interprétations plus prudentes des résultats des méta-analyses, qui reconnaissent la nature socialement et politiquement intégrée de la recherche agricole, sont nécessaires » [Traduction libre]. Cet avertissement est particulièrement bienvenu dans le cadre de l'analyse des résultats des projets DEPHY EXPE 2.

Tableau 21 : Recommandations concernant la méta-analyse en agronomie

Étapes clés de la méta-analyse d'après Doré et al. (2011)	Recommandations de Philibert et al. (2012)	Recommandations de Krupnik et al. (2019)
Définir l'objectif de la méta-analyse et les variables d'intérêts		Justifier la question posée, la catégorisation des systèmes étudiés et l'échelle à laquelle les analyses sont menées.
Faire une revue systématique de la littérature et/ou de la base de données d'intérêt	- Fournir une description précise des procédures de recherche bibliographique suivies par les auteurs pour la sélection des études et assurer la répétabilité de ces procédures. - Fournir la liste des références des études sélectionnées et utilisées dans la méta-analyse.	Évaluer la façon dont les études et les données sont collectées
Analyse des	Présenter une analyse de la variabilité des résultats	



limites, des incertitudes, des biais, de la sensibilité	des études. Ceci inclut la vérification de la présence d'une variabilité inter-étude et, si cela est opportun, la recherche des sources de cette variabilité. L'évaluation peut aussi porter sur l'estimation de la variance intra-étude. Présenter une analyse de la sensibilité des conclusions au changement dans la base de données et/ou dans le modèle statistique utilisé. Cette analyse doit être réalisée pour identifier les données influentes et pour assurer la robustesse des conclusions en regard des hypothèses formulées dans l'analyse. Évaluer le biais de publication qui caractérise le fait que seules des études dont les résultats sont très significatifs ont été publiées. Dans cette situation, une méta-analyse peut conduire à une conclusion biaisée et à une surestimation de l'effet d'un facteur donné. Le biais de publication est un problème prédominant dans les méta-analyses et plusieurs méthodes telles que les graphiques en entonnoir – par exemple, Borenstein et al. (2021) — ont été développées pour détecter la présence d'un tel biais dans des ensembles de données comprenant des résultats publiés. Pondérer les données. Lorsque les résultats rapportés dans les différentes études diffèrent quant à leur degré de précision, il est recommandé de pondérer les données en conséquence.	
Présentation des résultats et incertitudes	Rendre disponibles les données et le programme utilisés pour l'analyse.	

2.2.2. Etapes clés des synthèses

L'ensemble des synthèses – qui constitue la seconde phase du travail – débute par la justification de la méthode de synthèse choisie. Lorsque la problématique étudiée porte sur une relation causale, une taille d'effet, une prévalence ou tout autre indicateur quantitatif comparable, une méta-analyse est privilégiée sous réserve de la quantité suffisante, de la qualité adéquate et de l'homogénéité des données disponibles. Le fléchage réalisé en première phase constitue une étape déterminante pour identifier les ensembles d'études susceptibles d'être agrégées statistiquement.

Lorsque des projets associés à un sujet donné ne répondent pas aux exigences d'une méta-analyse, ils sont exclus de l'analyse statistique. Si le nombre de projets à exclure est trop élevé et que, par conséquent, leur exclusion compromet la compréhension globale du sujet, une revue systématique est privilégiée (sans agrégation statistique). De plus, si les données collectées ne sont pas satisfaisantes, il est envisageable de réaliser une nouvelle collecte de données.

Les hypothèses et le modèle agronomique qui sous-tendent la problématique sont explicités. Dans le cas d'une méta-analyse, un choix est alors réalisé sur le type d'approche retenue : méta-régression, analyse de taille d'effet, méta-classification, etc. Enfin, une analyse critique incluant une appréciation du



risque de biais, de l'hétérogénéité, de la robustesse des résultats et de leurs limites est systématiquement réalisée.

Que ce soit pour une méta-analyse ou pour une revue systématique, l'utilisation de la méthodologie PRISMA est conseillée (Page et al. 2021) avec une attention particulière sur les points énoncés en section 0.

3. Points d'attentions après réalisation d'une preuve de concept de la phase II

La synthèse statistique réalisée (voir section 0, Schneider (2026)) est un exemple de synthèse sur un sujet donné : « liens entre performances et les leviers mis en place à l'échelle transversale ». Ce sujet est mobilisé par l'ensemble des 41 projets et des 226 systèmes de cultures et constitue donc une preuve de concept d'intérêt pour la seconde phase de la méthodologie proposée. On dresse ici quelques points d'attention concernant la phase II de la méthodologie en regard de cette preuve de concept.

Cette synthèse statistique ne suit pas *stricto sensu* PRISMA mais essaie tout de même de s'en rapprocher au travers de l'analyse de certains biais notamment, ou encore l'indication des critères d'éligibilité (un projet est analysé si les informations concernant les leviers mis en place et les performances sont bien disponibles). Néanmoins, il n'y a pas de diagramme de flux PRISMA, etc. De plus, cette synthèse s'éloigne du cadre méta-analytique car elle se base sur des données partiellement récoltées *de novo*. On insiste donc sur le fait de mieux maîtriser les attendus d'une méta-analyse et de se référer à des méthodologies connues.

Concernant le cadre méthodologique, cette synthèse s'attarde sur les hypothèses agronomiques de travail (notamment *via* l'exemple de la performance remise dans le contexte de la situation de production) et le cadre statistique qui en découle. On insiste sur le fait que l'explicitation des hypothèses agronomiques sous-jacentes est essentielle et primordiale dans le cadre de chaque synthèse de la phase II et que cette étape ne doit pas être négligée afin de déterminer correctement la méthode de synthèse adéquate.

Cette synthèse transversale et statistique est finalement assez pauvre en conclusions informatives du fait de son intégration de l'ensemble des SdC sans tri préalable selon les filières et, plus généralement, selon la situation de production. Le caractère transversal paraît donc être ici un frein à la synthèse et une analyse par filière serait certainement plus appropriée. Au-delà du fait que la situation de production est ici une co-variable du modèle statistique, on insiste sur le fait que la description des situations de production aurait permis de mener des analyses des liens entre leviers et performances qui auraient probablement été plus informatives. Cet exemple montre l'importance que revêt la description fiable des situations de production pour lier de façon pertinente les projets et les sujets lors de la phase I.

4. Conclusion

Ce travail propose un cadre méthodologique pour la réalisation d'une synthèse transversale. Ce cadre se construit autour de deux phases. Une première phase adresse des problématiques d'étude liées à des sujets d'intérêts (organisationnel, socio-économique, technique, etc.) en se basant sur la méthodologie et les bonnes pratiques associées aux revues de la portée. Une seconde phase propose la réalisation d'une synthèse par sujet *via* un ensemble de méta-analyses et de revues systématiques. Différentes études sur les méta-analyses en agronomie pointent différents écueils à éviter. Le cadre méthodologique décrit peut donc être allégé ou modifié (avec récolte *de novo* de données par exemple) mais il est nécessaire de se rapprocher des méthodes proposées dans les deux phases pour en garantir la robustesse. Enfin, la description précise des situations de production paraît être un préalable



essentiel qui doit être mis en place dès la première phase du travail afin de rapprocher au mieux les systèmes de cultures et les sujets potentiels.

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

Pierre SCHNEIDER : <https://orcid.org/0009-0004-0888-731X>

Matthieu HIRSCHY : <https://orcid.org/0000-0002-2711-7714>

Louise MALOT : <https://orcid.org/0009-0008-9538-4903>

Contributions des auteurs

Pierre Schneider : Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing ; *Matthieu Hirschy* : Project administration, Funding acquisition, Writing – review & editing, Ressources, Supervision, Methodology ; *Romario Jacques* : Writing – original draft, Writing – review & editing, Methodology ; *Louise Malot* : Writing – review & editing, Methodology ; *Emeric Emonet* : Writing – review & editing.

Déclaration d'intérêt

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

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été financé dans le cadre du dispositif DEPHY : action de la Stratégie Écophyto 2030 pilotée par les ministères chargés de l'Agriculture, de l'Environnement, de la Santé et de la Recherche, avec le soutien financier de l'Office français de la biodiversité.

Remerciements

Nous remercions les porteurs et porteuses de projet et l'ensemble de la *Cellule d'Animation Nationale DEPHY* pour leur aide méthodologique et conceptuelle. Nous saluons particulièrement l'aide des *Experts filières*, de la *Cellule Référence* et de l'*Equipe Agrosyst*. Nous remercions également Jean-Noël Aubertot, président du *CST DEPHY*, Marie-Cathy Eckert, ancienne *Experte filière*, Alexandra Jullien, enseignante chercheuse à AgroParisTech et Nicolas Guilpart, enseignant chercheur à AgroParisTech, pour leur aide sur la conception méthodologique.



Nous remercions également les 41 projets (et les structures qui les accueillent) dont notre travail se nourrit.

Enfin, nous remercions les personnes impliquées dans la publication de cet article, et particulièrement, Aurélie Gauguery, pour son accompagnement.

Références bibliographiques

Borenstein, Michael, Larry V. Hedges, Julian P. T. Higgins, et Hannah R. Rothstein. 2021. *Introduction to Meta-Analysis*. John Wiley & Sons.

CAN DEPHY. 2023. *Fermes du réseau DEPHY : 10 ans de résultats. Trajectoires et performances des systèmes de culture*. <http://ecophytopic.fr/sites/default/files/2023-06/Synth%C3%A8se%20DEPHY%20FERME%202023.pdf>.

Chalmers, Iain, Larry V. Hedges, et Harris Cooper. 2002. « A Brief History of Research Synthesis ». *Evaluation & the Health Professions* 25 (1): 12-37. <https://doi.org/10.1177/0163278702025001003>.

Doré, Thierry, David Makowski, Eric Malézieux, Nathalie Munier-Jolain, Marc Tchamitchian, et Pablo Tittone. 2011. « Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge ». *European Journal of Agronomy* 34 (4): 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.006>.

Emonet, Emeric, Marie Rougier, et Emeric Pillet. 2016. « Réseau DEPHY EXPE : Synthèse des résultats à mi-parcours à l'échelle nationale - filière Grandes Cultures – Polyculture Elevage ». Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto.

Krupnik, Timothy J., Jens A. Andersson, Leonard Rusinamhodzi, Marc Corbeels, Carol Shennan, et Bruno Gérard. 2019. « DOES SIZE MATTER? A CRITICAL REVIEW OF META-ANALYSIS IN AGRONOMY ». *Experimental Agriculture* 55 (2): 200-229. <https://doi.org/10.1017/S0014479719000012>.

Lechenet, Martin. 2017. « Peut-on concilier un faible usage de pesticides, une bonne performance économique et environnementale ? Analyse d'un réseau national de fermes de démonstration Ecophyto ». Phdthesis, Université de Bourgogne Franche-Comté (COMUE). <https://hal.inrae.fr/tel-02789142>.

Lefèvre, Amélie, Paola Salazar, Caroline Colnenne-David, et al. 2024. *Guide pratique pour formaliser des connaissances pour l'action issues d'expérimentations de systèmes de production agroécologiques*. 28. <https://doi.org/10.17180/gm5q-k762>.

Makowski, David, Thomas Nesme, François Papy, et Thierry Doré. 2014. « Global Agronomy, a New Field of Research. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 34 (2): 293-307. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0179-0>.

Makowski, David, François Piraux, et François Brun. 2018. *De l'analyse des réseaux expérimentaux à la méta-analyse : Méthodes et applications avec le logiciel R pour les sciences agronomiques et environnementales*. Editions Quae. <https://univ.scholarvox.com/catalog/book/docid/88861516?searchterm=makowski>.

Moher, David, Alessandro Liberati, Jennifer Tetzlaff, Douglas G. Altman, et PRISMA Group. 2009. « Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement ». *PLoS Medicine* 6 (7): e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>.

Nandillon, Romain. 2024. « Réduction d'usage de pesticides : évolution des pratiques et des performances technico-économiques au sein du réseau de fermes DEPHY ». n° 2024UBFCK043. Theses, Université Bourgogne Franche-Comté. <https://theses.hal.science/tel-04871061>.

Page, Matthew J., Joanne E. McKenzie, Patrick M. Bossuyt, et al. 2021. « The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews ». *Systematic Reviews* 10 (1): 89. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4>.

Philibert, Aurélie, Chantal Loyce, et David Makowski. 2012. « Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 148 (février): 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.003>.



Schneider, Pierre. 2026. *Synthèse du dispositif DEPHY EXPE 2 : analyse transversale des performances de systèmes de cultures économes en produits phytopharmaceutiques, en regard des leviers agroécologiques mobilisés.*

Schneider, Pierre, Louise Malot, Jacques Romario, Matthieu Hirschy, François Brun, et Emeric Emonet. 2026. *Dispositif DEPHY EXPE 2 : un jeu de données sur les performances et les leviers agroécologiques de 120 systèmes de culture utilisant les produits phytopharmaceutiques en ultime recours.* <https://doi.org/10.57745/I9KELA>.

Tricco, Andrea C., Erin Lillie, Wasifa Zarin, et al. 2018. « PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation ». *Annals of Internal Medicine* 169 (7): 467-73. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>.

Pour citer cet article : Pierre Schneider, Matthieu Hirschy, Romario Jacques, Louise Malot, Emeric Emonet. *Synthèse du dispositif DEPHY EXPE 2 : proposition méthodologique pour réaliser une synthèse transversale.* *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.237-247. [10.17180/ciag-2026-vol109-art19](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art19)



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.



DEPHY EXPE 2 : analyse transversale des performances de systèmes de cultures économes en produits phytopharmaceutiques

Pierre SCHNEIDER^{1,2}, Matthieu HIRSCHY^{1,2}, François BRUN¹, Romario JACQUES^{1,2}, Louise MALOT^{1,2}, Emeric EMONET^{1,2}

¹ ACTA - Les Instituts Techniques Agricoles, 149 rue de Bercy, 75012 Paris

² Cellule d'Animation Nationale DEPHY, Equipe EXPE, Paris

Correspondance : matthieu.hirschy@acta.asso.fr, emeric.emonet@acta.asso.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art20>

Résumé

DEPHY EXPE 2 est un dispositif expérimental couvrant toutes les filières végétales à l'échelle du territoire français. Il intègre des systèmes de cultures réduisant l'usage des produits phytopharmaceutiques. Ce travail propose une synthèse transversale, statistique et inférentielle en abordant la multi performance de ces systèmes, les leviers agroécologiques mobilisés et la situation de production. Elle met en évidence un non-antagonisme entre les performances environnementales, sociales, agronomiques et économiques, en cohérence avec la littérature. Des profils type de performances sont identifiés par des méthodes de clustering. Des algorithmes de classification supervisée – utilisant les leviers agroécologiques comme variables explicatives et les profils de performances comme variables à prédire – montrent de bonnes performances prédictives mais ne permettent pas de fournir des informations instructives sur les leviers d'intérêts ou leurs interactions. Ces limites soulignent la nécessité d'enrichir l'étude par des informations complémentaires sur les situations de production des systèmes de culture.

Mots-clés : agronomie, système de culture, jeu de données, leviers agroécologiques, performances, pesticides

Abstract: Summary of the DEPHY EXPE 2 network: analysis of the performance of crop systems that use fewer plant protection products, in relation to the agroecological levers employed

DEPHY EXPE 2 is an experimental network covering all plant sectors across the French territory. It includes cropping systems designed to reduce the use of plant protection products. This study provides a cross-sectional, statistical and inferential overview of the multi-performance of these systems, the agroecological levers used and the production situation. It highlights the non-antagonism between environmental, social, agronomic and economic performance, in line with the literature. Performance profiles are identified using clustering methods. Supervised classification algorithms - using agroecological levers as explanatory variables and performance profiles as variables to be predicted - show good predictive performance but are unable to provide meaningful information on the levers of interest or their interactions. These limitations highlight the need to enrich the study with additional information on the production situations of the cropping systems.

Keywords: agronomy, cropping system, data set, agroecological lever, performance, pesticides



1. Introduction

1.1. Le dispositif DEPHY EXPE 2

Dans le contexte des plans ECOPHYTO II et II+, la composante expérimentale du réseau DEPHY, DEPHY EXPE 2, constitue une action structurante pour évaluer et promouvoir des systèmes agricoles réduisant l'usage des pesticides tout en restant performants sur les plans économique, environnemental et social. Lancée entre 2017 et 2018, elle a mobilisé 41 projets couvrant l'ensemble des filières végétales — grandes cultures, arboriculture, viticulture, maraîchage, horticulture et cultures tropicales — sur près de 200 sites expérimentaux. Ce dispositif expérimental se place à l'échelle des systèmes de cultures (noté SdC par la suite).

L'appel à projets du dispositif DEPHY EXPE 2 indique : « Les projets, s'inscrivant dans une démarche systémique, combineront des solutions techniques et organisationnelles innovantes, dont les performances agronomiques, économiques, sociales, écologiques et environnementales devront être évaluées en continu pour observer les trajectoires campagne après campagne, et expliquer les processus en jeu." (Bureau du développement agricole et des chambres d'agriculture et Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises 2018). Il en découle la question d'intérêt suivante : *« Quelles solutions techniques et organisationnelles – ou quelles combinaisons de ces techniques – permettent d'expliquer les performances (économiques, sociales et environnementales) des SdC du dispositif DEPHY EXPE 2, en les replaçant dans leur situation de production ? »*.

1.2. Diminution de l'usage des produits phytopharmaceutiques, multi-performance et leviers mobilisés

Différentes initiatives ont visé à comparer des systèmes agronomiques réduisant l'usage des produits phytopharmaceutiques d'un point de vue de la multi performance et des leviers mobilisés. Dans le cadre du dispositif DEPHY FERME, réseau d'observation collectant des données d'exploitations agricoles visant à réduire l'usage des phytopharmaceutiques, différents travaux ont permis de proposer des synthèses comme par exemple pour la filière *grandes cultures / polyculture élevage* et la performance économique (Lechenet 2017 et Nandillon 2024) ou pour l'ensemble des filières et la multi performance (CAN DEPHY 2023). Ces travaux montrent globalement une diminution des IFT (hors biocontrôle et hors traitement de semences) dans les exploitations et une absence d'antagonismes entre diminution des IFT et autres performances (sociale, environnementale et économique). Néanmoins, ils se limitent à une filière et / ou à un point de vue économique et / ou à des statistiques descriptives (notamment concernant les leviers agroécologiques mis en place).

Concernant le dispositif DEPHY EXPE 1, des synthèses (voir par exemple pour la filière GCPE : Emonet et al. 2016) ont également été réalisées par filière. Chaque synthèse présente une approche descriptive concernant les leviers et les performances en mettant en avant les sujets d'intérêt propres à la filière.

A l'échelle du réseau expérimental DEPHY EXPE 2, hormis la synthèse de la filière légumes-maraîchage (Eckert 2024), aucune synthèse transversale n'avait été réalisée sur le sujet de la multi performance. On insiste alors sur l'aspect méthodologiquement exploratoire du présent travail, notamment du fait de la « transversalité » souhaitée.

Afin de pallier ces différents manques, le présent travail s'attarde avec un point de vue statistique sur la question de la multi performance des systèmes de l'ensemble des filières du dispositif. De plus, il pose un cadre inférentiel via l'explication de la multi-performance par les leviers mobilisés au sein des expérimentations (en tenant compte de la situation de production). Il propose également un cadre



réflexif sur les méthodes utilisées, sur le modèle agronomique suivi et sur l'acquisition des données utilisées.

Ce travail analytique s'appuie sur les experts filières¹⁷ identifiés dans le dispositif DEPHY EXPE 2, garantissant ainsi que les analyses restent ancrées dans le réseau et conformes aux pratiques et référentiels de chaque filière.

Contrairement aux travaux du dispositif DEPHY FERME, l'analyse ne peut pas se baser sur les données de la plateforme Datagrosyst (plateforme centralisant les données issues du réseau DEPHY et de l'outil de saisie Agrosyst). En effet, les données quantitatives issues du dispositif DEPHY EXPE 2 sont trop hétérogènes du fait d'un manque d'harmonisation de la collecte des données. Le présent travail se base donc sur un jeu de données *ex-post* (Schneider et al., s. d.). L'utilisation de ce jeu de données contraint à utiliser un cadre agronomique différent de celui des travaux précédemment cités (notamment sur l'évaluation des performances, voir section 0).

2. Matériel et méthode

2.1. Jeu de données utilisé et cadre agronomique

$$L = P \mid SP, \quad \text{avec} \quad \begin{cases} L = \text{ensemble de leviers tels que : leviers} \approx SdC \\ P \mid SP = \text{évaluation subjective de la performance remise} \\ \text{en contexte dans sa situation de production} \end{cases}$$

Équation 2 : Modèle agronomique (d'après Schneider et al. (2026))

Schneider (2026) fournit un cadre conceptuel agronomique à l'échelle SdC et un jeu de données correspondant comportant un large échantillon de 120 SdC du dispositif DEPHY EXPE 2. Le cadre agronomique est défini par l'**Équation 2**. L'ensemble des termes est défini dans Schneider (2026). Le jeu de données contient alors pour chaque SdC :

- les leviers mobilisés dans le SdC (information binaire, nomenclature de 100 leviers fournie par le projet AGROWISE (Heinen et al. 2024)) ;
- l'évaluation de 15 performances (économique, sociale, agronomique, environnementale) sous la forme de 15 distributions permettant de jauger l'incertitude et la variabilité de chaque performance ;
- quelques métadonnées (filière concernée, période d'expérimentation, localisation, conduite : AB, 0 produits phytopharmaceutiques, conventionnelle, etc.)

En se basant sur l'**Équation 2**, on cherche à expliquer $P \mid SP$ par un ensemble de leviers avec un modèle qui prend en compte les interactions entre leviers et sans connaître *a priori* la nature du lien entre ces variables.

¹⁷ Expert filière : professionnel issu des instituts techniques ou des centres de recherche, chargé d'assurer le lien entre les réseaux EXPE et FERME, d'accompagner le réseau dans sa réflexion méthodologique en collectant des références, et de valoriser les références ainsi que l'expertise propre à chaque filière.



2.2. Classification non supervisée sur les performances

Un clustering, méthode de classification non supervisée, est réalisé uniquement sur la base des performances des SdC – et laisse donc de côté pour un temps les leviers. Une classe issue du clustering correspond alors conceptuellement à un profil homogène de SdC aux performances proches (sur les 15 performances à la fois).

2.2.1. Clustering sur les performances moyennes

Les analyses ont été réalisées à partir des notes moyennes de performance des SdC (Schneider et al. 2026). Cette information agrégée permet l'utilisation d'algorithmes classiques. La méthodologie décrite ici se base donc sur 15 notes moyennes pour chaque SdC.

La structure interne des données a été analysée afin d'évaluer la pertinence d'une approche de classification non supervisée en comparant les matrices de distances (euclidienne, Manhattan, Pearson, Spearman) afin de vérifier que le jeu de données n'est pas aléatoire.

Une pondération des performances est réalisée par la suite pour que chaque groupe de performances ait le même poids (*économique, social, environnemental, agronomique*).

Le choix d'une méthode de clustering appropriée pour la suite de l'analyse se base sur trois différents types de clustering : hiérarchique, par partition et par densité (Makowski 2021). Plusieurs algorithmes sont pris en compte pour ce choix au sein de ces familles (e.g. les méthodes *k-medoid* (Kaufman et Rousseeuw 1990) et *k-means* (MacQueen 1967)). Certains paramètres des méthodes le sont également (comme le nombre de groupes par exemple, noté *k* par la suite). Les critères de sélection se basent sur (1) la visualisation *ante-clustering* des performances des SdC, (2) la visualisation *post-clustering* des performances des SdC après une analyse en composantes principales et l'application d'une enveloppe convexe par groupe, (3) la cohérence agronomique évaluée visuellement via des diagrammes en violon des performances par groupe et (4) la séparabilité des groupes.

La significativité des corrélations (coefficient de Pearson) entre performances a été évaluée par des tests de Pearson avec correction de Bonferroni (seuil 5%) dans l'objectif d'apporter une meilleure interprétation agronomique des groupes.

2.2.2. Clustering sur les distributions

Les analyses sont conduites à partir des distributions des performances des SdC. La méthodologie décrite ici se base donc sur 15 distributions marginales pour chaque SdC.

Afin de réaliser le clustering, la distance de Wasserstein – distance adaptée aux distributions – est utilisée. Dans le cas multivarié présent, la distance de Wasserstein somme les distances sur chaque composante. L'indépendance des variables est donc un préalable vérifié par un test de corrélation entre les variables. Zhuang et al. (2022) justifient l'utilisation d'une méthode de clustering uniquement basée sur la matrice des distances dans le cas de l'utilisation de la distance de Wasserstein. La méthode des *k-medoid* est donc utilisée. Son principal paramètre est le nombre total de groupes.

Un optimum du nombre total de groupes est recherché en faisant varier le nombre total de groupes et en analysant visuellement la façon dont les groupes réagissent à cette variation (scission, fusion, disparition ou émergence de groupes). Celui-ci est comparé à des optima théoriques applicables dans le cadre de l'utilisation de la méthode *k-medoid* avec distance de Wasserstein (via l'indice de Dunn, l'indice de Calinski-Harabasz, le C-index et l'indice silhouette qui ne nécessitent que la matrice des distances pour être calculés).

Cet optimum est également évalué par la pertinence de l'interprétation agronomique. Une visualisation pertinente des performances par clusters est utilisée. Pour chaque SdC, 3 000 tirages aléatoires sont réalisés sur les 15 distributions marginales des performances. Les distributions du cluster résultent alors de l'agrégation des tirages des SdC correspondants.



Les groupes sont ensuite décrits par les profils de performances observés et par l'ensemble des métadonnées à disposition. Les interprétations des profils type de performances issus du clustering sont ensuite soumis à un panel de 5 *experts filières* afin de valider la cohérence du clustering et d'affiner l'interprétation des groupes. Ces profils et groupes sont ensuite utilisés pour la classification supervisée (voir section 0).

2.2.3. Stabilité des classes résultantes

Une analyse de sensibilité utilisant le principe de validation croisée est menée. Une étude est réalisée sur l'ARI (Adjusted Rand Index (Hubert et Arabie 1985)) comme métrique de stabilité du clustering. L'ARI est une mesure de similarité entre deux partitions de données (qui corrige les effets du hasard). Afin de prendre en compte la structure de dépendance entre les individus, à chaque fois qu'un SdC est retiré, l'ensemble des SdC du projet est retiré et un ARI est associé.

2.3. Classification supervisée

La classification supervisée est ici utilisée afin de discriminer les variables explicatives (leviers) et les interactions de variables qui expliquent les groupes issus du clustering sur les distributions (voir section 0 ; les groupes peuvent encore être regroupés si besoin afin de faciliter la prédiction). Ces algorithmes sont intéressants dans le cadre de ce travail car ils ne nécessitent pas d'hypothèse sur la distribution des données, gèrent les relations non linéaires entre les variables et les interactions, ne nécessitent pas l'explicitation du modèle (Makowski 2021).

Trois algorithmes différents sont testés : CART (Breiman et al. 1984), Random Forest (Breiman et Cutler 2004), et Gradient Boosting (Friedman 2001), afin de vérifier la stabilité des résultats et d'analyser des tendances.

Les CART sont utilisés avec élagage afin de limiter le sur-apprentissage. L'évaluation de la performance du CART est réalisée avec une validation croisée sur la proportion de prédiction correcte à partir d'une partition selon un schéma respectant la structuration des SdC par projets (échantillon de test à environ 30% de l'échantillon total, un projet étant entièrement inclus dans un seul des échantillons *test* et *train*).

Les méthodes de machine learning Random Forest et Gradient Boosting sont mobilisés pour gagner en performance de prévision (Makowski 2021). La performance (proportion de prédictions correctes) des deux modèles est évaluée via une validation croisée par groupe où chaque projet est retiré à tour de rôle pour servir de test. À chaque itération, le classifieur a été ajusté et la précision sur le projet laissé de côté a été calculée. Les performances globales sont comparées à un classifieur naïf utilisant la prédiction de la classe majoritaire.

Si la prédiction est satisfaisante, l'importance des leviers et des interactions de leviers est analysée. L'importance des variables a été extraite à chaque itération afin d'évaluer leur contribution moyenne et leur stabilité. Trois méthodes sont utilisées : les scores d'importance issus du modèle (réduction d'impureté de Gini pour le Random Forest et somme des réductions de la variance (MSE) pour le Gradient Boosting), les valeurs SHAP (SHapley Additive exPlanations, Lundberg et Lee (2017)) permettant d'interpréter les contributions locales et globales de chaque levier, et les interactions SHAP qui identifient les effets combinés entre leviers. On insiste sur le fait que cette analyse est transversale et n'est que peu informative pour un acteur du terrain sans le recours précis aux situations de production (SP) et des descriptions de la mise en place des leviers.

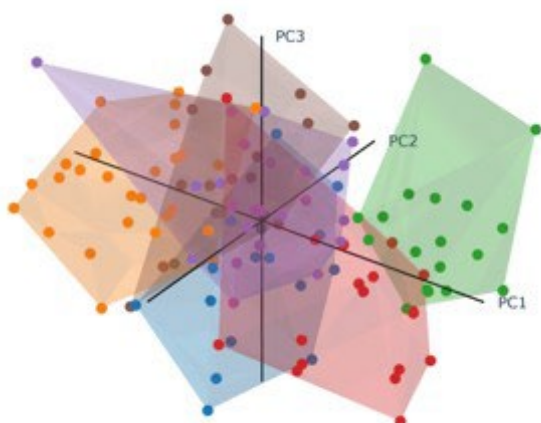
3. Résultats

3.1. Classification non supervisée

3.1.1. Pertinence du clustering, choix de la méthode

Le jeu de données paraît structuré et non aléatoire d'après la matrice des distances (pour les distances Manhattan et euclidienne). On confirme l'intérêt des méthodes de clustering.

Le clustering par partition est retenu pour la suite de l'analyse. L'ACP préliminaire (les 2 premières composantes expliquant 41,7% de la variance) montre une densité d'individus homogène. De plus, d'après la Figure 1, les groupes sont globulaires, se recouvrent peu et semblent de taille et de densité similaires. C'est le cas également pour k variant de 2 à 10. Les diagrammes en violon des



performances moyennes par groupe ne permettent néanmoins pas une interprétation approfondie des groupes. En effet, les distributions sont très bruitées et ne permettent pas vraiment de trancher entre différentes méthodes. Ceci montre qu'une analyse plus fine des distributions de performances (et pas juste des performances moyennes) est nécessaire.

Figure 1 : Représentation des SdC dans l'espace défini par les 3 premières composantes de l'ACP. Les clusters issus du clustering k-medoid ($k = 6$) y sont visualisés au moyen de leurs enveloppes convexes.

L'analyse en composantes principales va dans le sens d'une non-incompatibilité entre les performances sociales, économiques, agronomiques et environnementales (au premier ordre et à l'échelle de l'ensemble des SdC). En effet, toutes les performances représentées ont des coordonnées positives sur la première composante principale (notée PC1, 29.8% de la variance expliquée). Une attention doit toutefois être portée à la représentativité de cette projection. Les aspects sociaux et économiques sont mal représentés sur PC1 et l'analyse ci-dessus doit donc être nuancée. De plus, après projection sur PC2 (deuxième composante principale), les aspects sociaux, agronomiques et économiques sont à l'opposé des aspects environnementaux – c'est cette fois les aspects environnementaux qui sont mal représentés. Ce premier résultat n'était pas recherché initialement via la réalisation d'une ACP et constitue de fait un résultat inattendu.

Enfin, la positivité des coefficients de Pearson (voir Figure 2) confirme la non-incompatibilité globale entre performance sociale, environnementale, agronomique et économique. De plus, les performances environnementales sont significativement corrélées entre elles et certaines le sont avec les variables *Difficulté physique et risque pour la santé* et *Maîtrise de la fertilité physico-chimique* (coefficients entre 0.4 et 0.7 et corrélation significative). Il faudra donc prendre garde par la suite à ne pas interpréter indépendamment ces différentes performances. La corrélation entre *Maîtrise des ravageurs* et *Maîtrise des maladies* est également notable et suit la même recommandation. De plus, ces corrélations montrent une non-indépendance des variables de performance, ce qui nuit à la bonne représentativité des distances de Wasserstein qui sont utilisées par la suite.

3.1.2. Clustering sur les distributions

Le choix final se porte sur $k = 4$ pour l'application de l'algorithme des *k-medoid*. Les indices statistiques ne permettent néanmoins pas, ici, un choix de k . En effet, ils donnent $k = 2, 9$ ou 10 groupes et présentent des instabilités. Afin de choisir un k optimal, il est alors jugé préférable de se référer à



l'étude des interprétations agronomiques des groupes en fonction de k (pour k allant de 2 à 10). $k = 4$ donne alors le meilleur compromis entre nombre de groupes, séparabilité des groupes (en termes de performances) et interprétabilité.

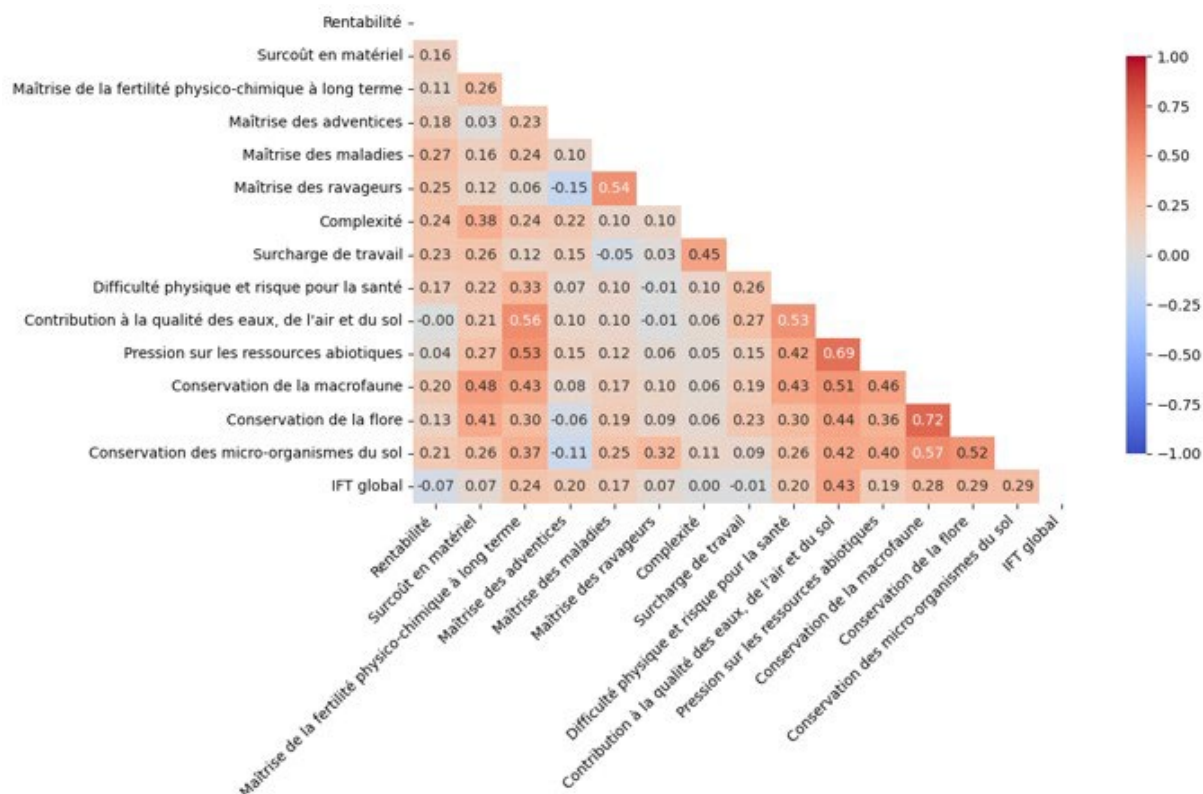


Figure 2 : Heatmap des corrélations entre performances (coefficients de Pearson), la mention * précise que la p-valeur (corrigée avec la méthode de Bonferroni) est inférieure à 5 %. Cette p-valeur représente la probabilité d'observer une corrélation au moins aussi extrême que celle mesurée si les variables étaient en réalité indépendantes.

Les résultats ne sont donc que partiellement stables. Le clustering montre un ensemble de projets stables mais présente quelques signes d'instabilité. Sur les 35 ARI calculés (un par projet retiré), 19 ARI se situent aux abords de 1, 2 ARI sont aux alentours de 0.8 et 14 ARI sont proches de 0.5 - 0.6.

Description et analyse des groupes (pour $k = 4$ groupes)

Un aperçu des informations agrégées à l'échelle des groupes sont présentées en Figure 3 et Figure 4 afin de décrire les profils. Cette description permet de définir des profils type de performances utilisés par la suite (voir section 0).

Les groupes sont interprétables et discernables en ce qui concerne les distributions de performances. Ceci confirme l'intérêt de ne pas se cantonner aux performances moyennes pour le *clustering* (ce qui confirme les conclusions de la partie 0). Les effectifs des groupes sont similaires (par ordre des groupes : 28, 26, 28, 38 SdC). Au sein des quatre groupes, il n'y a pas de biais visuellement constaté concernant les périodes d'expérimentations et la localisation des SdC. Dans chaque groupe, au moins 10 projets sont représentés et même si certains projets prédominent parfois en nombre de SdC (exemple pour le groupe 2 : un projet cumule 8 SdC sur les 26 représentés), ils ne comptent jamais pour plus de 30% des SdC du groupe. Il n'y pas de biais trop importants liés aux projets dans les groupes formés.

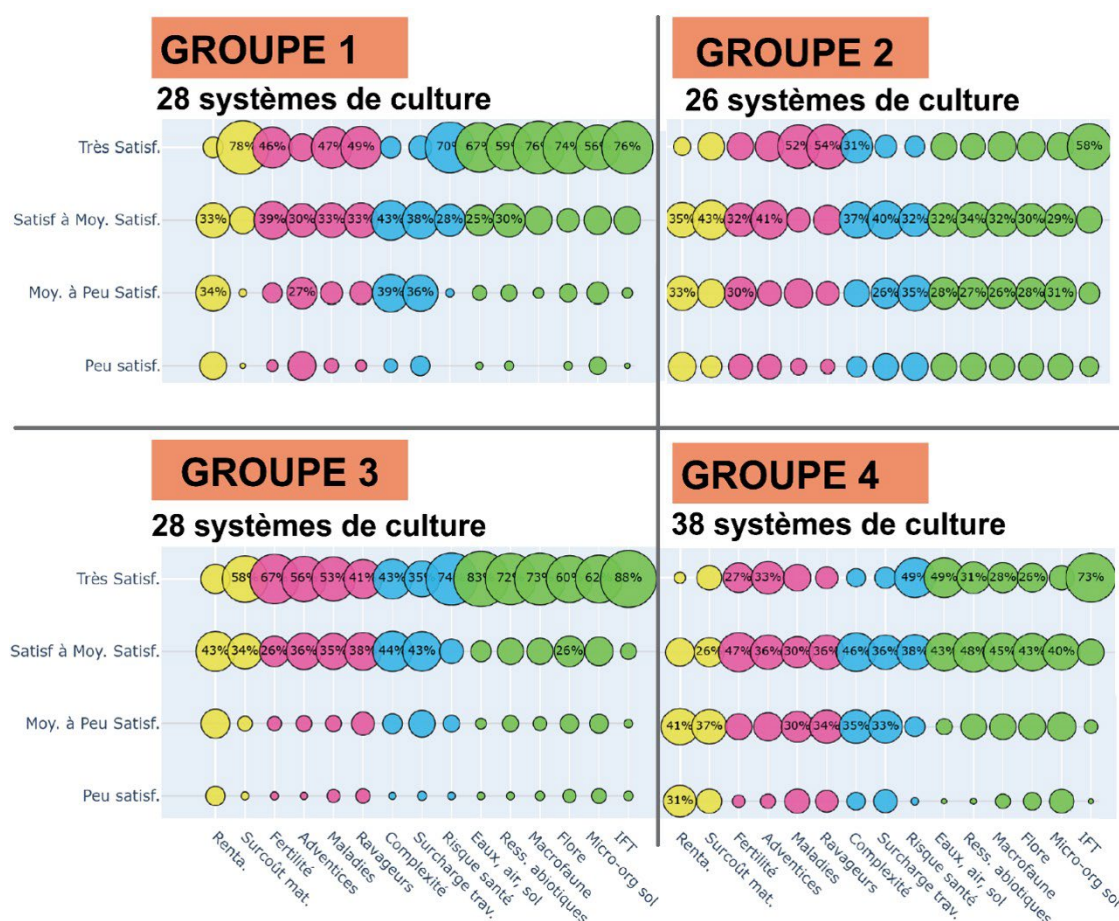


Figure 3 : Performances agrégées des SdC, par groupe issu du clustering. Le pourcentage est issu d'un bootstrap sur les distributions de performances des SdC. Ils représentent donc le nombre de SdC qui a été évalué à note correspondante en prenant en compte l'incertitude liée à cette évaluation. Seuls les pourcentages supérieurs à 25 % sont affichés, les cercles sont de taille proportionnelle aux pourcentages.

Le groupe 3 montre les performances les plus élevées et les plus concentrées. L'incertitude évaluée par les répondants est donc très faible. Ce groupe montre également qu'il est possible de maximiser (ou presque) chacun des aspects de la tri-performance (économique, social et environnemental). De plus, les conduites en AB y sont surreprésentées (50% contre 25% dans le jeu de données complet) au détriment des conduites conventionnelles (25% contre 50% dans le jeu de données complet). De plus, même si toutes les filières sont représentées dans ce groupe, les GCPE sont très largement sous-représentées et l'horticulture est surreprésentée. Ce sont l'arboriculture et le maraîchage qui dominent. Ce groupe est à mettre en regard avec le groupe 1.

Le groupe 1 montre des performances environnementales très élevées tout comme le groupe 3. Néanmoins, ses notes s'abaissent pour la gestion des adventices, la complexité, la surcharge de travail et la rentabilité. C'est cette fois-ci la conduite 0 PPP qui est surreprésentée (43% contre 25% dans le jeu de données complet) au détriment de la conduite conventionnelle (32% contre 50% dans le jeu de données complet). Les SdC en GCPE dominent avec le maraîchage au détriment des autres filières (tout de même présentes, mais en plus faible effectif).

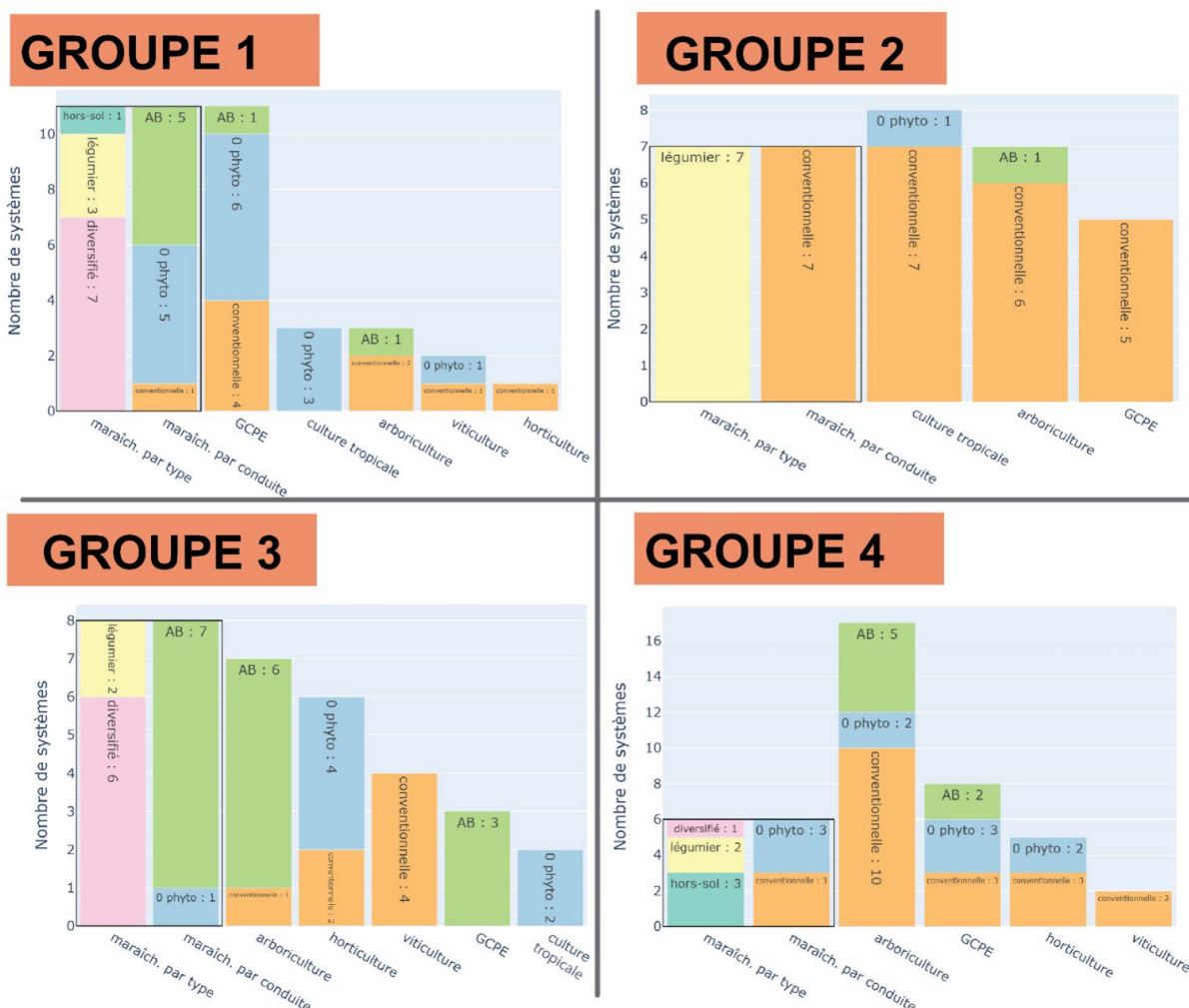


Figure 4 : Histogrammes des modes de conduite des SdC et des filières associées. 0 phyto = 0 PPP (voir Schneider 2026) pour l'explicitation des modes de conduites). Les détails des types de conduites en maraîchage sont précisés en parallèle de la barre des modes de conduite en maraîchage

Ces deux groupes sont similaires sur les aspects environnementaux. On interprète le décalage sur les autres performances ainsi : les filières GCPE et maraîchage sont très sensibles aux adventices. En effet, d'une part, ces filières ont des cultures assolées (souvent, voire toujours de plein champ) et d'autre part la compétition des adventices avec leurs cultures est plus importante que dans le cas des cultures pérennes (arboriculture, viticulture) qui peuvent chercher davantage de ressources (lumière, éléments du sol...) et pour lesquelles on peut assez facilement mécaniser le désherbage tout au long du cycle cultural. Le maraîchage se retrouve ainsi dans les deux groupes du fait de son statut intermédiaire entre culture de plein champ et culture protégée sous serre. La sensibilité aux adventices entraîne une augmentation du travail coûteux en main d'œuvre (le désherbage manuel par exemple) ou du travail complexe (plus d'opérations à réaliser) ce qui entraîne dans les deux cas, des charges importantes et donc une rentabilité affaiblie (sans compter la potentielle baisse de rendement, non montrée ici, mais qui peut être un facteur caché). Les profils 1 et 3 sont donc les suivants : ce sont des SdC qui maximisent les performances environnementales, mais qui selon leur contexte de production (filières et conduites AB ou 0 PPP et niveau d'intégration de toutes les composantes du SdC) subissent plus ou moins la pression des adventices ; ce qui entraîne des résultats différents en termes de travail et de rentabilité.



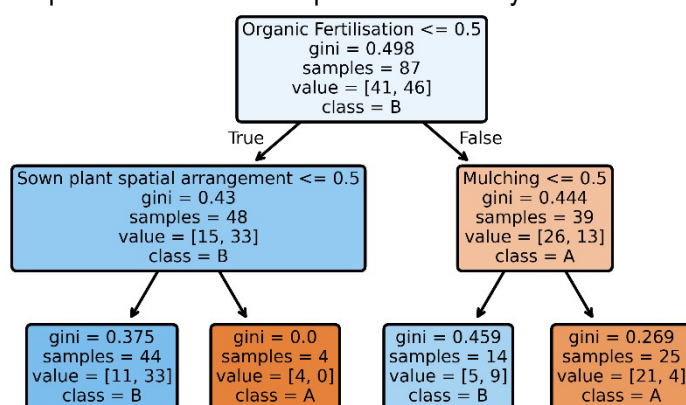
Le groupe 2 présente des distributions très étendues. Au niveau environnemental, elles se concentrent sur les notes de moyenne satisfaction (seul l'IFT est globalement Très satisfaisant). Même si la complexité et la gestion du duo maladie / ravageur sont un peu plus satisfaisantes, les autres performances sont également moyennes. Ce groupe est composé à 92% de SdC en conduite conventionnelle. Quatre des six filières sont représentées de manière quasi-égale (les filières viticoles et horticolas sont absentes). Ce troisième groupe est composé de SdC avec des débouchés en circuit long qui empêchent l'amélioration ou la diminution des performances à cause d'autres standards imposés (qualité visuelle du produit, qualité organoleptique, etc). Ceci peut être argumenté par le fait que plus de 50% des SdC du groupe sont issues de la filière exportatrice canne à sucre et que les projets maraîchers sont également très intégrés dans l'amont et l'aval (SdC légumes notablement ancrés dans un circuit de commercialisation long). Ces informations complémentaires qualitatives sur les SdC sont issues d'une base de données interne en complément du jeu de données.

Le groupe 4 est un groupe dont les performances sont satisfaisantes d'un point de vue environnemental (sans toutefois atteindre les notes des groupes 1 et 2). Les autres performances sont pour la plupart entre Satisfaisantes et Peu satisfaisantes. La rentabilité est au plus bas (72% des effectifs en dessous de Moyennement satisfaisant). La gestion des adventices est plutôt satisfaisante. Les conduites sont globalement représentatives de l'ensemble du jeu de données. L'arboriculture est surreprésentée et les filières horticole, maraîchère, viticole et GCPE composent également le groupe. Ce profil correspond à des systèmes qui ont su augmenter un peu leurs résultats environnementaux, mais qui ont subi des dégâts de ravageurs résultant en de grandes pertes économiques. Un manque de régulation biologique peut être suspecté, les performances environnementales n'ayant pas permis un développement suffisant. Dans le cadre de l'arboriculture par exemple, les solutions pour lutter contre les ravageurs sont coûteuses (main d'œuvre et coûts des pièges par exemple) et parfois insuffisantes dans un contexte très strict sur la qualité des fruits. Ceci explique peut-être les notes environnementales et la gestion moyennement satisfaisante des ravageurs et maladies. Ce dernier groupe peut aussi être vu comme un groupe relativement hétérogène et regroupant donc les SdC qui ne s'incluent pas dans les profils précédents.

3.2. Classification supervisée

3.2.1. Arbre CART

Les groupes 1 et 3 (respectivement 2 et 4) sont associés pour donner la classe prédictive A (resp. B) afin de simplifier la prédiction et pour regrouper les systèmes les plus performants. Le paramètre de complexité maximisant la performance moyenne est $\alpha = 0.03201$ avec une proportion moyenne de prédictions correctes d'environ 80%. L'arbre est représenté en Figure 5.



La performance de l'arbre CART étant jugée satisfaisante, les algorithmes de Random Forest et de Gradient Boosting sont mis en place afin d'améliorer la stabilité de la prédiction.

Figure 5 : Arbre CART obtenu pour la prédiction des classes A et B (pureté des nœuds via indice de Gini)

3.2.2. Random Forest et Gradient Boosting

Les deux méthodes de classification supervisée ont de meilleures performances que le classifieur naïf (Figure 6) et affichent globalement des performances comparables entre elles.

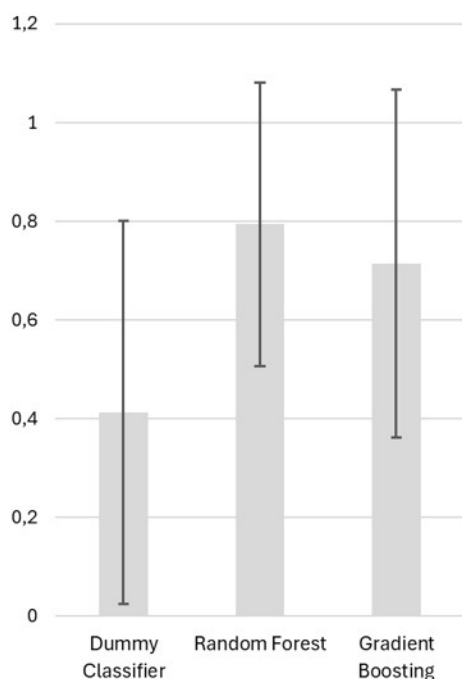


Figure 6 : Proportion de prédictions correctes par méthode de classification ; barres d'erreurs = écart-types (validation croisée de type LOO)

L'analyse des valeurs SHAP révèle que les leviers permettent de discriminer les groupes de performances (Figure 7, même conclusion pour le *Gradient Boosting*). Concernant l'importance des leviers : seul le levier *Organic fertilisation* présente une importance significativement différente de celle des autres leviers dans les deux méthodes de classification. L'importance des autres leviers sont similaires et faibles, suggérant qu'aucun ensemble de leviers ne se distingue pour classer un SdC dans un niveau de performance.

Trois interactions (à deux leviers) dominent les valeurs des interactions SHAP dans les deux algorithmes de classification supervisée (*bio-pesticides / botanical pesticides & stale seed bed ; cost of control measure & temperature management ; mulching & organic fertilisation*).

Les autres interactions ont des importances faibles et comparables. Des interactions à plus de deux leviers sont donc suspectées d'être importantes. Il est également possible que l'effet combiné de plusieurs interactions, chacune faible individuellement, influence la performance du modèle.

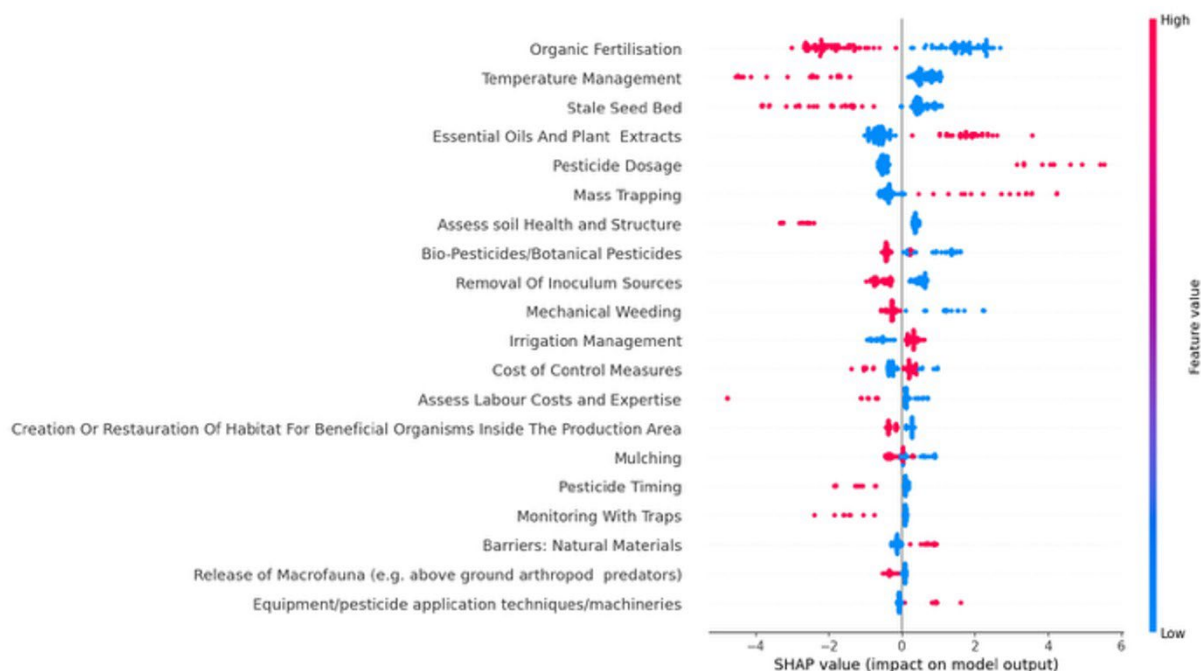


Figure 7 : Valeurs SHAP des 20 premiers leviers (par ordre d'importance) pour l'algorithme de *GradientBoosting*

4. Discussion

Le présent travail permet d'amener un faisceau de réponses concernant la problématique d'étude mais permet également une analyse réflexive des modèles agronomiques et statistiques utilisés ainsi que du point de vue transversal choisi.



Il suggère d'abord une non incompatibilité de la maximisation de toutes les performances à l'échelle globale (toute filière, tout SdC). Ceci est montré par les analyses préalables au clustering et par le clustering lui-même (groupe 3 notamment). Cette conclusion semble plus hasardeuse dans certains systèmes maraîchers et dans les systèmes en grandes cultures / polyculture élevage. Ces résultats concordent avec ceux du réseau DEPHY FERME (CAN DEPHY (2023) pour l'ensemble des filières et avec quelques indicateurs de multi performance, Nandillon (2024) pour la filière GCPE et les indicateurs économiques). Il convient d'être prudent quant à la traduction locale (à l'échelle du SdC) de cette conclusion, qui n'est pas étudiée ici. En effet, cette conclusion se base sur l'axe majoritaire de l'ACP et sur les corrélations entre performances et des antagonismes locaux peuvent se compenser à l'échelle globale étudiée.

Ce travail montre également que des profils type de performances émergent à l'échelle transversale. Les SdC dont ils sont issus semblent avoir une signature en termes de filière et de conduite. Ces signatures pourraient être plus approfondies avec une meilleure description de la situation de production, par exemple avec un indicateur de l'intégration des SdC dans des filières de commercialisation longue (voir Nandillon (2024) pour une description de la situation de production avec des variables explicatives). Toutes les filières sont représentées dans les groupes avec les meilleurs profils de performances (1 et 3). On voit néanmoins une sur-représentation des conduites en *0 PPP* et *AB*. L'analyse agronomique des groupes n'a pas vocation à expliquer les performances des groupes mais permet de dresser un premier profil des SdC concernés. Ces profils sont essentiels avec la considération des leviers dans le schéma d'analyse proposé.

La classification supervisée donne des résultats de prédiction satisfaisants. Néanmoins, cette prédiction est peu informative concernant la problématique d'étude qui concerne les leviers ou combinaisons de leviers. En effet, on conclut simplement qu'il n'y a pas unicité des leviers mis en place et que les interactions sont probablement très influentes. Cette prédiction permet toutefois de valider le fait que la classification supervisée peut donner dans ce cadre transversal de bons résultats (toutes années, incertitudes de réponses, toutes filières, etc.). Une précision de la situation de production semble indispensable également ici afin de discriminer les leviers (ou leurs interactions) selon le contexte.

L'évaluation des performances étant subjective, certains biais des répondants peuvent altérer l'analyse. Un sujet a notamment suscité l'attention de plusieurs *experts filières* lors de l'analyse des profils de performances et des métadonnées associées : les performances des conduites *AB* dans les groupes 1 et 3. En effet, comme montré par le clustering, les conduites *AB* sont sur-représentées dans le groupe 3 (notamment par rapport au groupe 1 où les conduites *0 PPP* sont sur-représentées). La différence entre ces groupes tient au fait que les SdC du groupe 1 sont sujets à des problèmes *adventices*, *sociaux* et de *rentabilité* et que la filière GCPE y est sur-représentée. Deux hypothèses subsistent alors : (1) la conduite *AB* permet effectivement de maximiser les performances, (2) il existe une tolérance plus importante des répondants issus des conduites *AB* à l'évaluation de l'importance du problème *adventices* (notamment dû à la forte valorisation en commercialisation). Afin de lever ces hypothèses, le recours à des entretiens semi-directifs permettrait d'interroger le répondant sur ses tolérances potentielles afin de vérifier s'il s'agit ou non de véritables biais. Cet exemple très précis reflète en réalité un problème de biais potentiels plus large que celui concernant la conduite *AB* et toutes les filières ou conduites sont concernées.

5. Conclusions et perspectives

Cette étude vise à produire une première synthèse transversale du dispositif DEPHY EXPE 2 via des outils statistiques. Elle s'interroge plus précisément sur le lien entre leviers agronomiques mis en place dans les SdC et performances (évaluées subjectivement selon la situation de production). Un premier résultat va dans le sens d'un non-antagonisme entre les performances environnementales, sociales, agronomiques et économiques et est concordant avec la littérature. Ce travail montre aussi que les



données consolidées issues du dispositif ne sont pas aléatoires et que des algorithmes de clustering et de classifications supervisées permettent d'établir des profils type de performances et de prédire les performances à partir des leviers mis en place au sein des SdC. Néanmoins, aucune information instructive sur les leviers ou leurs interactions ne découle de cette analyse. Ceci montre que cette étude et le jeu de données utilisé doivent être consolidés avec des informations complémentaires sur la situation de production des SdC. De plus, un des principaux freins à l'intérêt de l'analyse peut résider dans la subjectivité de l'évaluation des performances. Cette évaluation devrait se rapprocher de méthodes d'enquête sociologique afin de limiter les biais dans l'analyse.

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

Pierre SCHNEIDER : <https://orcid.org/0009-0004-0888-731X>

Matthieu HIRSCHY : <https://orcid.org/0000-0002-2711-7714>

François BRUN : <https://orcid.org/0000-0002-1079-2385>

Contributions des auteurs

Pierre Schneider : Conceptualization, Data curation, Investigation, Methodology, Supervision, Software, Visualisation, Writing – original draft, Writing – review & editing ; *Matthieu Hirschy* : Project administration, Funding acquisition, Writing – review & editing, Ressources, Supervision, Methodology ; *Romario Jacques* : Writing – original draft, Writing – review & editing, Methodology ; *Louise Malot* : Writing – review & editing, Methodology ; *François Brun* : Methodology, Writing – review & editing ; *Emeric Emonet* : Writing – review & editing.

Déclaration d'intérêt

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

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été financé dans le cadre du dispositif DEPHY : action de la Stratégie Écophyto 2030 pilotée par les ministères chargés de l'Agriculture, de l'Environnement, de la Santé et de la Recherche, avec le soutien financier de l'Office français de la biodiversité.



Remerciements

Nous remercions les porteurs et porteuses de projet et l'ensemble de la *Cellule d'Animation Nationale DEPHY* pour leur aide méthodologique et conceptuelle. Nous saluons particulièrement l'aide des *Experts filières*, de la *Cellule Référence* et de l'*Equipe Agrosyst*. Nous remercions également Jean-Noël Aubertot, président du *CST DEPHY*, Marie-Cathy Eckert, ancienne *Experte filière*, Alexandra Jullien, enseignante chercheuse à AgroParisTech et Nicolas Guilpart, enseignant chercheur à AgroParisTech, pour leur aide sur la conception méthodologique de la récolte des données.

Nous remercions également les 41 projets (et les structures qui les accueillent) dont notre travail se nourrit. Merci à l'INRAE et ses partenaires pour la nomenclature de leviers AGROWISE et pour le développement de l'outil MASC 2.0.

Enfin, nous remercions les personnes impliquées dans la publication de cet article, et particulièrement, Aurélie Gauguery, pour son accompagnement.

Références bibliographiques

Breiman, Leo, et Adele Cutler. 2004. *Random forest-manual*. https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc_manual.htm.

Breiman, Leo, Jerome Friedman, R. A. Olshen, et Charles J. Stone. 1984. *Classification and Regression Trees*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>

Bureau du développement agricole et des chambres d'agriculture et Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises. 2018. *Instruction technique DGPE/SDPE/2018-65*. DGPE/SDPE/2018-65

CAN DEPHY. 2023. *Fermes du réseau DEPHY : 10 ans de résultats. Trajectoires et performances des systèmes de culture*. <http://ecophytopic.fr/sites/default/files/2023-06/Synth%C3%A8se%20DEPHY%20FERME%202023.pdf>.

Eckert, Marie-Cathy. 2024. *Seconde vague de projets (2018-2023) : quelles performances obtenues ? Réseau DEPHY EXPE Légumes-Fraise-Framboise*. INFOS CTIFL. <https://www.ctifl.fr/seconde-vague-de-projets-2018-2023-quelles-performances-obtenues-infos-ctifl-400>.

Emonet, Emeric, Marie Rougier, et Emeric Pillet. 2016. « Réseau DEPHY EXPE : Synthèse des résultats à mi-parcours à l'échelle nationale - filière Grandes Cultures – Polyculture Elevage ». Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto.

Friedman, Jerome H. 2001. « Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine ». *The Annals of Statistics* 29 (5): 1189-232.

Heinen, Janina, Anna Berlin, et Riccardo Bommarco. 2024. *Guidelines for Farm-Specific or Crop-Specific Rules for Mitigating Pesticide Impacts While Ensuring Sustainable Agricultur*. No. 101148740. AGROWISE. Sveriges Lantbruksuniversitet – Swedish University of Agricultural Sciences for the European Project AGROWISE coordinated by INRAE. <https://eng-agrowise.hub.inrae.fr/results/harmonised-taxonomy-of-the-innovative-practices-and-systems-d2.1>.

Hubert, Lawrence, et Phipps Arabie. 1985. « Comparing Partitions ». *Journal of Classification* 2 (1): 193-218. <https://doi.org/10.1007/BF01908075>.

Kaufman, Leonard, et peter Rousseeuw. 1990. *Finding Groups in Data: An Introduction To Cluster Analysis*. John Wiley&Sons, Inc., Hoboken. New Jersey. https://www.researchgate.net/publication/220695963_Finding_Groups_in_Data_An_Introduction_To_Cluster_Analysis.

Lechenet, Martin. 2017. « Peut-on concilier un faible usage de pesticides, une bonne performance économique et environnementale ? Analyse d'un réseau national de fermes de démonstration Ecophyto ». Phdthesis, Université de Bourgogne Franche-Comté (COMUE). <https://hal.inrae.fr/tel-02789142>.



Lundberg, Scott M, et Su-In Lee. 2017. « A unified approach to interpreting model predictions ». In *Advances in neural information processing systems*, édité par I. Guyon, U. Von Luxburg, S. Bengio, et al., vol. 30. Curran Associates, Inc. https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Paper.pdf.

MacQueen, J. 1967. « Some methods for classification and analysis of multivariate observations ». In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*, 5.1. University of California Press. <https://projecteuclid.org/ebooks/berkeley-symposium-on-mathematical-statistics-and-probability/Proceedings-of-the-Fifth-Berkeley-Symposium-on-Mathematical-Statistics-and/chapter/Some-methods-for-classification-and-analysis-of-multivariate-observations/bsmsp/1200512992>.

Makowski, David. 2021. *Data science pour l'agriculture et l'environnement: méthodes et applications avec R et Python*. Formations & techniques. Ellipses.

Nandillon, Romain. 2024. « Réduction d'usage de pesticides : évolution des pratiques et des performances technico-économiques au sein du réseau de fermes DEPHY ». n° 2024UBFCK043. Theses, Université Bourgogne Franche-Comté. <https://theses.hal.science/tel-04871061>.

Schneider, Pierre, François Brun, Louise Malot, Romario Jacques, et Matthieu Hirschy. s. d. « DEPHY EXPE 2 : performances et leviers agroécologiques de 120 systèmes de culture utilisant les produits phytopharmaceutiques en ultime recours ». Recherche Data Gouv. <https://doi.org/10.57745/I9KELA>.

Schneider, Pierre, Louise Malot, Jacques Romario, Matthieu Hirschy, François Brun, et Emeric Emonet. 2026. *Dispositif DEPHY EXPE 2 : un jeu de données sur les performances et les leviers agroécologiques de 120 systèmes de culture utilisant les produits phytopharmaceutiques en ultime recours*. <https://doi.org/10.57745/I9KELA>.

Zhuang, Yubo, Xiaohui Chen, et Yun Yang. 2022. « Wasserstein K-means for clustering probability distributions ». In *Advances in neural information processing systems*, édité par S. Koyejo, S. Mohamed, A. Agarwal, D. Belgrave, K. Cho, et A. Oh, vol. 35. Curran Associates, Inc. https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/file/4a1d69d1f64c6b6df105b15984ca527a-Paper-Conference.pdf.

Pour citer cet article : Pierre Schneider, Matthieu Hirschy, François Brun, Romario Jacques, Louise Malot, et al.. DEPHY EXPE 2 : analyse transversale des performances de systèmes de cultures économes en produits phytopharmaceutiques. *Innovations agronomiques*, 2026, 109, pp.248-262. [10.17180/ciag-2026-vol109-art20](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol109-art20)



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.