



innovations agronomiques

n°110 / février 2026

Approches globales pour réduire l'utilisation de produits phytosanitaires

Réduire l'utilisation des produits phytosanitaires implique d'accompagner l'évolution des systèmes agricoles vers une moindre dépendance aux produits phytopharmaceutiques en se concentrant sur les méthodes préventives et sur les évaluations élargies des pratiques de protection des cultures et en les appréciant à travers leur durabilité. Dans ce numéro, nous abordons la conception d'outils et de stratégies de prévention, le développement de méthodes de lutte non chimique contre différents ravageurs et pathogènes, ainsi que l'évaluation, la définition d'indicateurs, la diffusion et la structuration de pratiques, depuis l'échelle de la parcelle jusqu'à celle des territoires et des filières.

Ces projets ont été financés dans le cadre des appels à projets Ecophyto Recherche & Innovation lancés en 2019 :

- Les approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques
- Durabilité des systèmes de productions agricoles alternatifs évitant ou limitant l'utilisation des produits phytopharmaceutiques

/// Crédit photo : Charday Penn / iStock



Innovations Agronomiques

Volume 110 – Février 2026

Approches globales pour réduire l'utilisation de produits phytosanitaires

Réduire l'utilisation des produits phytosanitaires implique d'accompagner l'évolution des systèmes agricoles vers une moindre dépendance aux produits phytopharmaceutiques en se concentrant sur les méthodes préventives et sur les évaluations élargies des pratiques de protection des cultures et en les appréciant à travers leur durabilité. Dans ce numéro, nous abordons la conception d'outils et de stratégies de prévention, le développement de méthodes de lutte non chimique contre différents ravageurs et pathogènes, ainsi que l'évaluation, la définition d'indicateurs, la diffusion et la structuration de pratiques, depuis l'échelle de la parcelle jusqu'à celle des territoires et des filières. Ces projets ont été financés dans le cadre des appels à projets Ecophyto Recherche & Innovation lancés en 2019 :

- les approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques ;
- durabilité des systèmes de productions agricoles alternatifs évitant ou limitant l'utilisation des produits phytopharmaceutiques.

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

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

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

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

Coordination scientifique du numéro : Marc Gallien, DREETS de Normandie ; Jean Guyot, CIRAD ; Sébastien Lemièrre, Université de Lille ; André Mirallès, Laurent Parrot, CIRAD.

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) : 978-2-7380-1495-5

ISBN (ePub) : 978-2-7380-1496-2

DOI : <https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol110>

Pour citer ce numéro : Collectif. Innovations Agronomiques. Approches globales pour réduire l'utilisation de produits phytosanitaires, 2026, 110. <https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol110>

Photo de couverture : Charday Penn / iStock

Licence : CC BY 4.0



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

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

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



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

Sommaire

Sonia LEQUIN, Maud BLANCK & Xavier REBOUD, 2026 - **Préventif, curatif et durabilité : repenser l'équilibre global en agriculture.**
Innovations Agronomiques 110, 1-5
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art01>

Prévention

Nathalie COLBACH, Frédérique ANGEVIN, Bastien BOQUET, Nicolas CAVAN, Stéphane CORDEAU, Quentin COURNAULT, Quentin DELACHAPPELLE, Violaine DEYTIEUX, Marie FLAMENT, Thibault LEFEUVRE, Thibault MAILLOT, Brice MOSA, Bertrand OMON, Sandrine PETIT, Wilfried QUEYREL, Alain RODRIGUEZ, Solègne SKORUPINSKI, Jean VILLERD, Delphine MOREAU, 2026 - **Co-produire des connaissances et des outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices. Partie I. Acquisition de données et synthèse dans des outils numériques.**
Innovations Agronomiques 110, 6-20
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art02>



Nathalie COLBACH, Delphine MOREAU, Bastien BOQUET, Nicolas CAVAN, Stéphane CORDEAU, Quentin COURNAULT, Quentin DELACHAPPELLE, Violaine DEYTIEUX, Marie FLAMENT, Thibault LEFEUVRE, Thibault MAILLOT, Brice MOSA, Bertrand OMON, Sandrine PETIT, Wilfried QUEYREL, Alain RODRIGUEZ, Solègne SKORUPINSKI, Jean VILLERD & Frédérique ANGEVIN, 2026 - **Co-produire des connaissances et des outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices. Partie II. Conception et évaluation d'idéotypes variétaux et de systèmes de culture.** Innovations Agronomiques 110, 21-35
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art03>

Territoires et acteurs

Laurent PARROT, Philippe BANCE, Olivier CARÊME, Angélique CHASSY, Cynthia HARAL, Hervé LEFAIX, Céline MARCELLIN, Hélène-Marie NELLY, Serge SIMON & Karen TORIS, 2026 - **Projet PUMAT - Pour Un Maraîchage Attractif en Martinique et en Guadeloupe : bilan et perspectives.** Innovations Agronomiques 110, 36-52
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art04>

Denis GAUCHER, Pierre DEROO, Didier ANDRIVON, Romain MABON, Michèle GUIBERT, Benoît HOUILLIEZ, Christine HACCART, Karine LELEU, Marie BERNARD, Jérôme MUCHEMBLED, Matthieu DESCAMPS & Fanny BRECHIGNAC, 2026 - **SYNAPTIC : Créer une synergie entre les acteurs pour la protection territoriale intégrée des cultures de pommes de terre contre le mildiou.** Innovations Agronomiques 110, 53-68
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art05>

Evaluation et indicateurs - outils et cadre conceptuel

Julie BORG, Isabelle GRECHI, Jean-Noël AUBERTOT, Pascal BORIOLI, Pierre FRANCK, Bertrand GAUFFRE, Hélène GAUTIER, Baptiste LABEYRIE, Françoise LESCOURRET, Vincent MERCIER, Frédéric NORMAND, Félix OURGAUD, Julien RUESCH, Marie-Hélène ROBIN, Antoine ROLLAND, Pierre VALSESIA, Gilles VERCAMBRE & Mohamed-Mahmoud MEMAH, 2026 - **L'outil ODACE. Accompagner la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques en vergers de pommiers.** Innovations Agronomiques 110, 69-80
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art06>

Kevin MOREL, Paul APPERT, Fabien MORITZ & Florence AMARDEILH, 2026 - **Quel numérique pour l'agroécologie ? Enseignements de la co-conception de la Pépinière-Mesclun, une application en ligne pour les maraîchers.** Innovations Agronomiques 110, 81-93
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art07>



Préventif, curatif et durabilité : repenser l'équilibre global en agriculture

Sonia LEQUIN¹, Maud BLANCK¹, Xavier REBOUD¹

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

Correspondance : xavier.reboud@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art01>

1. Prévenir ou réparer : le dilemme traverse tous les secteurs, mais en agriculture, il structure silencieusement les choix de production.

Posons quelques bases de ce qui est en jeu. Equilibrer démarches préventives et curatives, c'est un peu comme décider d'investir dans l'entretien d'un barrage pour éviter de réparer tout un village inondé. La prévention agit de façon proactive, pour éviter que le problème n'apparaisse... mais laisse rarement de traces visibles mis à part les coûts réguliers qu'elle cause, ce qui la rend difficile à valoriser. Le curatif, lui, intervient dans l'urgence, peut imposer un arrêt des activités, mobilise des moyens lourds, et s'impose souvent hors de tout calendrier maîtrisé.

En agriculture, notamment dans les stratégies de protection des cultures, il semble souvent être privilégié des solutions ponctuelles et techniques pour pallier l'urgence, alors que l'investissement et la mise en place d'un système de prévention, qui garantirait une gestion durable et efficace des risques à long terme, est négligé. Pour filer l'analogie du barrage, cela donne un peu l'impression que les choix faits, sont de réfléchir au plan d'évacuation du village pour prioriser alarme ou gilets de sauvetage sans se soucier d'investir davantage dans la solidité du barrage et sa surveillance régulière. Les effets des approches préventives en agriculture sont peu documentés, car ces approches sont rarement intégrées aux stratégies globales, et souvent jugées « non rentables » à court terme au regard de l'effort fourni, par manque de capacité de projection et d'analyse consolidée, face à des prix très bas des intrants de synthèse. Résultat : la focalisation sur le curatif – pesticides en tête – reste massive puisque les problèmes s'imposent fréquemment et leurs effets délétères d'autant plus majeurs que les régulations naturelles ont disparu. Chaque retrait d'une substance jugée trop dangereuse est vécu comme un handicap majeur lorsqu'aucune alternative chimique à usage analogue n'est immédiatement disponible. Les pesticides sont devenus la réponse réflexe, occultant le fait que la prophylaxie active pourrait réduire le besoin même d'intervenir. Cette prophylaxie s'est un peu empoussiérée, elle demeure dans l'esprit de beaucoup une base théoriquement obligatoire y compris dans les textes européens cadrant l'usage des pesticides mais en pratique très peu valorisée et dont le déploiement efficace est difficile à quantifier (principe 1 de la protection intégrée tel que défini dans la directive SUD 2009/128). Les pesticides sont ainsi devenus partie intégrante du système établi. Ils sont intégrés aux intrants agricoles au même titre que les engrais. Le symbole est fort : cela revient un peu à considérer les médicaments au même titre que les légumes dans la grande famille des aliments.

Le Comité d'orientation recherche & innovation (CSO R&I) y a vu un déficit de cadre conceptuel explicite et partagé qui appelle à replacer la prophylaxie active – considérer chaque action agricole comme étant une part de la stratégie de protection des plantes et la réaliser de façon à éviter d'avoir à traiter – au cœur des politiques agricoles et leur déclinaison sur le terrain.

De fait, la question n'est pas seulement technique. Elle est aussi économique et politique. Beaucoup de décisions agricoles répondent d'abord à l'intérêt immédiat de l'exploitant et/ou de la chaîne de valeur en affectant le rendement ou la qualité de ses productions. Or, cet intérêt ne coïncide pas toujours avec celui de la société voire même avec ses propres intérêts à long terme. Les impacts différés – sur la qualité de l'eau, sur la santé publique, sur la biodiversité et la diversité des paysages – sont assumés collectivement, via les factures d'eau ou la sécurité sociale. Ce décalage justifie des politiques publiques fortes, qu'elles passent par la réglementation ou par des incitations financières, afin d'aligner les intérêts et bénéfices privés et collectifs.



A la lecture des projets présentés dans ce numéro, une évidence se dégage : le changement à opérer pour replacer la prophylaxie active à sa juste place dépasse largement le seul monde agricole et il pourrait se traduire par des pratiques qui s'inscrivent dans un véritable contrat social du système agroalimentaire, reconnu par les politiques publiques. Par exemple, une lutte efficace du mildiou de la pomme de terre repose sur une combinaison de leviers de protection intégrée, incluant en particulier la gestion préventive de l'inoculum primaire. Cette approche nécessite la mobilisation de multiples acteurs, des agriculteurs aux jardiniers amateurs, en passant par les consommateurs et les industriels de la transformation. Les décisions de ces derniers, notamment concernant le choix variétal, peuvent représenter un frein majeur pour les agriculteurs souhaitant adopter des pratiques moins consommatrices de fongicides.

Diverses pistes peuvent accompagner cette dynamique, telles que l'accès des agriculteurs à un conseil intégrant pleinement la prévention et la mise en place de leviers par les collectifs locaux dont l'efficacité augmente avec l'échelle d'adoption, sans que l'on n'ait jamais cherché à savoir si la loi de Metcalfe (qui dit que les performances et l'intérêt augmente proportionnellement au carré du nombre de personnes impliquées) s'appliquait à ces processus. Derrière cette interrogation sur les bénéfices à engranger d'un taux croissant d'adoption se pose aussi la thématique de comment éviter les passagers clandestins : ceux qui comptent sur la prophylaxie exécutée par d'autres pour ne pas faire leur part. Les filières pourraient également envisager de reconnaître les pratiques durables, notamment par une rémunération et des cahiers des charges adaptés. Par ailleurs, il semble important que les consommateurs soient en mesure de prendre conscience que leurs achats influencent directement les modes de production.

Enfin, il incombe aux pouvoirs publics d'assurer la visibilité des bilans à moyen terme et des coûts réels liés à la préservation des ressources et de la santé.

Prévenir coûte souvent moins cher que réparer sur le long terme et à l'échelle des territoires. Si on regarde du côté de l'industrie, dans la plupart des contextes industriels, la maintenance préventive, lorsqu'elle est correctement planifiée et intégrée, est plus rentable que le recours exclusif à la maintenance corrective notamment lorsque les coûts indirects sont pris en compte. Avant d'analyser si les illustrations qui suivent éclairent la situation agricole, on peut considérer des situations issues de l'industrie ou de la santé humaine. Le bénéfice de la prévention a été montré par Stenström et al., en 2016, à travers une étude de cas sur les infrastructures ferroviaires. La maintenance préventive représentait 10 à 30 % des coûts totaux de maintenance avec un rapport coûts-avantages de 3,3 en faveur de la maintenance préventive. Cela se traduit aussi en termes de performance. L'étude de Thomas et Weiss en 2021 montre qu'une maintenance préventive et/ou prédictive sur des machines permet d'enregistrer 52,7 % de temps d'arrêt imprévus en moins et 78,5 % de défauts en moins par rapport à une maintenance réactive¹.

Il en est de même si on explore le domaine de la santé. Une étude a montré « qu'une augmentation de 10 \$ des dépenses en santé publique ou en éducation était associée à une diminution de 1,8 et 2,2 hospitalisations évitables (pour 100 000 habitants), respectivement [...] Ces investissements en amont peuvent influencer le recours aux soins et constituer un moyen d'améliorer les résultats de santé ou de remodeler la courbe des coûts des soins de santé » (McCullough et Curwick, 2020). De même, « des revues systématiques d'essais randomisés et la modélisation de leurs résultats montrent que le dépistage opportuniste et les interventions visant à favoriser un changement de comportement sont efficaces et économiques pour le sevrage tabagique ; efficaces et rentables pour réduire la consommation excessive d'alcool ; efficaces et rentables pour la perte de poids en cas d'obésité ; efficaces et potentiellement

¹ Les auteurs définissent les différents types de maintenance comme suit :

- maintenance réactive – la maintenance n'est effectuée qu'après la défaillance d'un processus ou d'un équipement, ou lorsque ceux-ci fonctionnent en dessous des spécifications requises ;
- maintenance préventive – des activités de maintenance spécifiques sont programmées en fonction des unités de temps ou/et des cycles prévus ;
- maintenance prédictive – des activités de maintenance spécifiques sont orchestrées en fonction de la surveillance des mesures ou des indicateurs qui pourraient indiquer une détérioration de l'état (ou des performances) d'un processus ou d'un équipement.



rentables pour lutter contre la sédentarité » (Heath et al., 2024). Il n'est pas certain que ces exemples s'appliquent à la situation de la protection des cultures et on peut même émettre des doutes sur la similitude du caractère prévisible. On soulignera que le fait même de ne pas disposer d'exemple établi et chiffré pour la situation qui nous concerne est en soi symptomatique. Une étude serait à conduire pour tenter de préciser ce qui peut être transposable entre des secteurs très différents.

Si on revient à l'agriculture via la santé animale, on pourrait souligner l'exemple de la gestion de la grippe aviaire qui soulève l'alternative de vaccination et abattage préventif versus abattage de masse. Il nous semble que prévenir doit surtout conduire à construire un système agricole plus robuste, moins dépendant des urgences, et capable d'anticiper plutôt que de subir. Cela permet aussi à des pratiques à effet partiel de trouver leur place là où elles seraient dépassées dans un système qui n'assurerait plus les contrôles élémentaires de base (car ultra-simplifié et basé sur le seul curatif). Dans un monde fluctuant du fait des marchés et du changement climatique, le fait de construire des systèmes plus résilients face à une diversité de stress croissante devient une propriété très précieuse qu'il reste à mieux valoriser.

2. Evaluer : la durabilité des solutions alternatives est un enjeu central de la transition

Pour assurer l'efficacité des systèmes construits pour être préventifs via une prophylaxie active menée sur le long terme, il est nécessaire de **tenir compte de leur durabilité**. Cette évaluation est d'autant plus importante que l'on travaille dans l'optique de maintenir la biodiversité et favoriser la santé des sols. Un environnement sain et diversifié est ainsi mieux armé face aux aléas biotiques et abiotiques du fait de l'existence de services écosystémiques. Il peut notamment mieux résister aux bioagresseurs dans la durée d'autant que la résistance croissante de ces derniers aux méthodes de lutte conventionnelles souligne l'importance d'identifier des stratégies qui temporisent cette évolution².

Les résultats des projets montrent que l'évaluation de la durabilité des systèmes préventifs nécessite un temps long car elle implique **de suivre des effets variables et souvent cumulatifs sur plusieurs années**. La non-réplication dans le temps et l'absence de suivi sur le « long terme » limitent considérablement la capacité d'évaluation des effets à long terme des combinaisons d'actions agroécologiques. Par exemple, pour la gestion du mildiou ou des adventices, les ajustements des outils de modélisation et d'aide à la décision ou ceux des seuils d'intervention doivent être testés sur plusieurs cycles afin d'obtenir des résultats fiables. De même, les expérimentations sur la gestion des populations de nuisibles ou la résistance aux maladies nécessitent souvent une échelle temporelle de plusieurs années voire une décennie pour établir une tendance appuyée par des résultats robustes. En considérant de plus, que l'efficacité de certaines pratiques risque de s'effriter au cours du temps ou qu'à l'inverse, il est possible de fortement corriger les principaux défauts de prototypage.

Les résultats des projets soulignent également la nécessité d'**adopter une approche globale**, systémique et multi-acteurs, adaptée à des échelles d'action territoriales étendues, pour ne pas omettre certains impacts, tels que les effets rebonds, reportés dans l'espace ou dans le temps. En effet, les modèles saisonniers actuels ne suffisent pas à saisir ces dynamiques élargies, notamment les effets différés des bioagresseurs comme par exemple les pucerons, qui peuvent impacter la floraison suivante. La mise en place de modèles pluriannuels ou paysagers, capables d'intégrer ces phénomènes, tout en tenant compte des obstacles techniques, économiques et organisationnels, constituerait une avancée majeure. Cette approche doit aussi prendre en considération diverses externalités impactant la société dans son ensemble, telles que le coût de la gestion de la pollution de l'eau, les effets sur la santé humaine, la biodiversité ou encore les émissions de gaz à effet de serre. Certains projets présentés dans ce numéro intègrent déjà en grande partie cette vision globale, notamment par l'utilisation de bases de données comme INDIC³ ou ECOFRUIT pour le développement d'outils de modélisation et de co-conception spécialisés en arboriculture,

² Autre pilier de la protection intégrée des cultures, principe 7 de stratégie d'anti-résistance.

³ <https://gis-grandes-cultures.hub.inrae.fr/publications/etudes-et-dossiers-thematiques/indic-R-une-base-de-donnees-telechargeable-sur-le-site-du-gis-gc>



ou à l'amélioration des outils d'évaluation multicritères existants (MASC⁴, DEXiFruits⁵), pour renforcer leur accessibilité. Ces méthodes d'évaluation, développées et/ou perfectionnées récemment par la recherche, doivent encore être consolidées et adaptées à des contextes variés pour devenir plus accessibles.

Il faut aussi considérer la complexité inhérente aux systèmes agricoles (diversité des parties prenantes, traditions culturelles, pratiques locales, parcellaires...) qui rend difficile la réalisation d'une évaluation intégrée de leurs impacts environnementaux, sanitaires, économiques et sociaux, pour les pratiques actuelles comme pour les alternatives. Cela implique que les innovations à développer ne se limitent pas à de simples substituts, mais prennent en compte des combinaisons de méthodes et des révisions systématiques, adaptées aux caractéristiques propres des exploitations et des filières.

Par ailleurs, le milieu agricole présente la particularité de cumuler des sources d'incertitude, telles que les conditions climatiques, les fluctuations du marché, le contexte géopolitique, les politiques économiques. En conséquence, il sera d'autant plus efficace d'outiller le monde agricole dans l'évaluation de la durabilité qu'il s'agit de suivre des systèmes complexes et évolutifs. Ces outils doivent en particulier faciliter la compréhension des impacts des pratiques avant leur mise en œuvre sur le terrain, aider à mesurer leur efficacité, et idéalement être co-développés avec les utilisateurs pour garantir leur adéquation aux besoins. En parallèle, afin que les solutions ne reposent pas uniquement sur le fait de disposer de tels outils avant d'agir, une gouvernance volontariste mettant à profit l'intelligence collective des acteurs serait une piste à mettre en place à court terme.

Enfin, dans le secteur de l'alimentation, l'accès à l'évaluation nutritionnelle a bouleversé les rapports de force et conduit à des évolutions rapides (Gauthier et al., 2025). On peut penser qu'il en sera de même sur le choix des modèles de protection des cultures (ou du bien-être animal). Savoir mesurer et évaluer revêt donc toute son importance pour amorcer/inciter à des transformations. Les projets financés mettent en avant une gamme nouvelle de métriques à considérer couvrant le qualitatif comme le quantitatif. L'ambition est donc de faire évoluer ces outils vers des méthodes plus intégrées, tout en favorisant un dialogue constructif entre les parties prenantes. L'enjeu dépasse la simple mise au point d'innovations prêtes à l'emploi ; il s'agit de générer des ressources, connaissances et outils qui permettront aux acteurs de participer à la conception pour ensuite piloter leurs systèmes en fonction d'objectifs de durabilité adaptés à leurs contraintes et aux contextes locaux. Une coopération interdisciplinaire entre agronomes, écologistes et économistes apparaît nécessaire pour développer des systèmes prophylactiques robustes et efficaces.

C'est dans cette perspective que le CSO R&I a ouvert la voie à l'étude de méthodes préventives et aux évaluations élargies des pratiques de protection des cultures, en les appréciant à travers leur durabilité. Deux appels à projets ont été lancés⁶. Ce numéro spécial en présente les principaux résultats et explore comment reconstruire la digue de façon durable et assurer la gouvernance de son entretien futur : repenser les pratiques, élargir le cercle des acteurs impliqués et aligner les responsabilités de chacun sur la préservation de notre santé et de nos ressources.

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

Les auteurs ont utilisé les technologies assistées par intelligence artificielle pour reformuler le texte afin de le rendre plus concis et percutant.

ORCID des auteurs

Xavier REBOUD : <https://orcid.org/0000-0001-6430-153X>

Contributions des auteurs

⁴ <https://means.inrae.fr/outils-emc/outils-dexi/masc/presentation-de-masc>

⁵ <https://means.inrae.fr/outils-emc/outils-dexi/dexifruits>

⁶ <https://ecophytopic.fr/recherche-innovation/pour-aller-plus-loin/appele-projets-de-recherche-et-innovation-les-approches> et <https://ecophytopic.fr/recherche-innovation/pour-aller-plus-loin/appele-projets-ecophyto-durabilite-des-systemes-de>



Sonia Lequin : co-rédaction de l'éditorial ; administration du projet

Maud Blanck : co-rédaction et relecture intégrant l'angle du projet européen Agrowise

Xavier Reboud : co-rédaction de l'éditorial ; relecture et validation de l'éditorial, supervision 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

Ce travail a bénéficié des discussions conduites au sein du Comité Stratégique d'Orientation Recherche & innovation (CSO RI) d'Ecophyto II+, tout particulièrement dans la phase de montage des appels et d'analyse des retours des projets candidats et lauréats.

Déclaration de soutien financier

Les auteurs ont bénéficié d'une enveloppe de l'OFB destinée à l'animation de l'axe Ecophyto RI du plan Ecophyto II+. Les projets présentés dans ce numéro ont également bénéficié du soutien financier de l'OFB.

Références bibliographiques

Gauthier C., Bally F. (2025). Digitalization and power shift in the food market. *Journal of Business Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.115039>

Heath L., Stevens R., Nicholson BD. *et al.* (2024). Stratégies pour améliorer la mise en œuvre des soins préventifs en soins primaires : revue systématique et méta-analyse. *Medecine BMC*, 22 (412). <https://doi.org/10.1186/s12916-024-03588-5>

McCullough J., Curwick K. (2020). Dépenses locales de santé et de services sociaux pour réduire les hospitalisations évitables. *Gestion de la santé des populations*, 23(6) <https://doi.org/10.1089/pop.2019.0195>

Stenström C., Norrbin P., Parida, A., Kumar U. (2016). Preventive and corrective maintenance – cost comparison and cost-benefit analysis. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12, 603 - 617. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1032983>

Thomas D., Weiss B. (2021). Maintenance Costs and Advanced Maintenance Techniques in Manufacturing Machinery: Survey and Analysis. *International journal of prognostics and health management*, 12. <https://doi.org/10.36001/ijphm.2021.v12i1.2883>.

Pour citer cet article : Sonia Lequin, Maud Blanck, Xavier Reboud. Préventif, curatif et durabilité : repenser l'équilibre global en agriculture. *Innovations Agronomiques*, 2026, 110, pp.1-5. [10.17180/ciag-2026-vol110-art01](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-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.



Co-produire des connaissances et des outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices

Partie I. Acquisition de données et synthèse dans des outils numériques

Nathalie COLBACH¹, Frédérique ANGEVIN², Bastien BOQUET³, Nicolas CAVAN¹,
Stéphane CORDEAU¹, Quentin COURNAULT¹, Quentin DELACHAPPELLE⁴, Violaine DEYTIEUX⁵,
Marie FLAMENT³, Thibault LEFEUVRE⁶, Thibault MAILLOT¹, Brice MOSA⁵, Bertrand OMON⁷,
Sandrine PETIT¹, Wilfried QUEYREL¹, Alain RODRIGUEZ⁸, Solèmne SKORUPINSKI¹,
Jean VILLERD¹, Delphine MOREAU¹

¹ Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne Europe, 21000 Dijon, France

² INRAE, Info&Sols, 45000, Orléans, France

³ Agro-Transfert Ressources et Territoires, 80200 Estrées-Mons, France

⁴ CIVAM de l'Oasis, 51000 Châlons en Champagne, France

⁵ U2E - Domaine expérimental d'Epoisses, 21110 Bretenière, France

⁶ IDEAS, AgroParisTech Innovation, 91120 Palaiseau, France

⁷ CRA Normandie, 6 rue des Rocquemonts, 14000 Caen, France

⁸ Acta, CDA 47, 271 rue de Péchabout, 47000 Agen, France

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art02>

Résumé

Le projet COPRAA visait à produire avec des acteurs de terrain des connaissances, outils et démarches de gestion préventive opérationnelles pour les conseillers et agriculteurs afin de concilier production agricole, rentabilité économique, biodiversité et faible usage, voire absence, d'herbicides en grande culture. Cet article présente (1) la production de connaissances sur les processus biophysiques déterminant les effets des techniques culturales et les régulations biologiques des adventices, avec des expérimentations en conditions contrôlées et au champ, puis (2) la synthèse de ces connaissances dans différents outils numériques (FLORSYS, DECIFLORSYS, OPTIFLORSYS, OdERA). L'évaluation et la conception d'idéotypes variétaux et systèmes de culture sera présentée dans la partie II de cet article.

Mots-clés : Adventice, Pratique préventive, Outil d'aide à la conception, Système de culture durable, Évaluation multicritère

Abstract: COPRAA, a project aiming to produce knowledge and tools for preventive operational approaches for agroecological weed management. I. Data acquisition and synthesis in digital tools

The COPRAA project aimed to produce knowledge, tools and operational preventive approaches, together with advisors and farmers, to reconcile agricultural production, economic profitability, biodiversity and low or no herbicide use in arable crops. This first paper presents (1) the production of knowledge on the biophysical processes driving the effects of cropping techniques and biological weed regulation, with experiments in controlled conditions and fields, (2) the synthesis of this knowledge in various digital tools (FLORSYS, DECIFLORSYS, OPTIFLORSYS, OdERA) designed for virtual experiments and decision support. The evaluation and design of crop ideotypes and cropping systems will be presented in the second part of this paper.



Keywords: Weed, Preventive practice, Design support tool, Sustainable cropping system, Multicriteria evaluation

1. Introduction

Les adventices sont des bioagresseurs majeurs dans les systèmes de grande culture actuels dans lesquels elles induisent des pertes de rendement et des problèmes de qualité des récoltes (Oerke 2006). Les phénomènes de résistances aux herbicides sont en augmentation, le nombre de produits utilisables est en diminution à la suite du retrait acté ou potentiel de substances actives herbicides⁷. Un changement dans les modes de gestion est nécessaire en réduisant, voire supprimant, le recours à ces intrants chimiques, ce qui répond aussi à une demande sociétale. Cependant, à ce jour, aucune autre technique curative n'est aussi efficace et simple à mettre en œuvre que les herbicides pour maîtriser les adventices. Leur gestion non-chimique demande un raisonnement pluriannuel car les semences adventices survivent pendant des années dans le sol (Lewis 1973). Elle doit combiner de nombreuses techniques à effets partiels et préventifs (diversification des cultures, faux semis, labour, retard de semis, variété étouffante, densité et inter-rang de semis...) qui interagissent entre elles, avec le sol et les conditions météorologiques (Liebman et Gallandt 1997). De plus, l'évaluation de l'effet des adventices ne doit pas se limiter aux seuls disservices, comme la perte de rendement. Elle doit aussi inclure les services rendus pour la protection de l'environnement (ex. réduction de l'érosion des sols) ou pour la biodiversité (ex. offre trophique aux auxiliaires ou pollinisateurs) (Yvoz et al. 2021).

Lors de projets précédents, nous avons combiné essais au champ et modélisation mécaniste pour mieux comprendre et prédire le fonctionnement de l'agroécosystème, notamment les mécanismes régissant la dynamique des adventices (voir numéro spécial d'Innovations Agronomiques 81⁸). Les approches à base de modèles de simulation sont essentielles pour synthétiser les résultats des expérimentations et tester facilement une large gamme de systèmes à l'échelle pluriannuelle et dans des contextes de production divers. Elles permettent ainsi d'identifier les systèmes répondant à des objectifs techniques (Meynard et al. 2012) ou de durabilité (Craheix et al. 2012). Les modèles sont alors des alliés et peuvent servir d'outils d'aide à la conception dans des groupes d'agriculteurs accompagnés (Omon et al. 2025). Ils sont, pour les concepteurs praticiens, des yeux capables de voir avec une acuité démultipliée et dans le futur. Ils renforcent ainsi leur expertise (Cavan et al. 2019).

Le projet COPRAA (2021-2024, <https://projet-copraa.hub.inrae.fr/>) continue dans cette optique, afin de produire des connaissances, outils et démarches opérationnelles de gestion préventive des adventices pour les agriculteurs et leurs conseillers, visant à concilier production agricole, rentabilité économique, biodiversité et faible usage (voire absence) d'herbicide en grande culture. Deux aspects étaient ciblés : (1) **l'étude de mécanismes de régulation biologique des adventices** (par exemple, la compétition pour les ressources ou l'allélopathie) et (2) une **forte implication des agriculteurs et conseillers**, pour co-décider des questions à traiter, co-développer des outils d'aide à la décision, tenir compte des situations d'usage et ainsi assurer l'opérationnalité des outils et des stratégies de gestion identifiées et leur application par les acteurs de terrain.

La première partie de cet article présente (1) les approches et la structure du projet, (2) la production de connaissances sur les mécanismes déterminant les effets des techniques culturales et les régulations biologiques des adventices, avec des expérimentations en conditions contrôlées et au champ, puis (3) la synthèse de ces connaissances dans différents outils numériques destinés à réaliser des expérimentations virtuelles (simulations) et/ou accompagner la réflexion et la décision des acteurs de

⁷ <https://agriculture.gouv.fr/mission-dappui-au-plan-danticipation-du-retrait-de-substances-actives-et-de-developpement-des>

⁸ <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques/volume-81-decembre-2020>

terrain. L'évaluation et la conception d'idéotypes variétaux et systèmes de culture sera présentée dans la deuxième partie de l'autre article (Colbach et al. 2026).

2. Approche scientifique et technique – organisation du projet

2.1. Les partenaires et approches

Le projet regroupe des partenaires de la recherche et de l'enseignement supérieur (INRAE, Institut Agro Dijon, Univ. Bourgogne, AgroParisTech), du développement et conseil (Agro-Transfert Ressources & Territoires, Chambre d'Agriculture de Normandie, Acta) et des agriculteurs (et leurs conseillers ou facilitateurs) pour la conduite d'expérimentation, et la participation à des ateliers de co-conception d'outils numériques et de systèmes de culture ainsi qu'au comité d'experts du projet.

Différentes approches étaient combinées (**Figure 1**) :

- des expérimentations en conditions contrôlées et au champ pour étudier la régulation biologique des adventices en fonction des techniques culturales appliquées ;
- de la modélisation pour synthétiser et combiner les connaissances produites au sein du modèle "champ virtuel" FLORSYS (section 2.2) ;
- des simulations avec ce modèle pour produire des nouvelles connaissances sur le fonctionnement de l'agroécosystème, des règles pour la conception de nouveaux systèmes de culture ainsi que des outils d'aide à la décision ;
- des ateliers participatifs avec des acteurs de terrain (agriculteurs, conseillers...) pour co-concevoir ces outils d'aide à la décision ainsi que des systèmes de culture innovants peu ou pas consommateurs d'herbicides.

Dans la suite sont présentés des exemples illustrant ces différents objectifs et étapes en relation avec la production de connaissances et d'outils numériques, avec les numéros de la **Figure 1** renvoyant aux sections de cet article. La **Figure 1** indique aussi les étapes qui seront illustrées dans la deuxième partie de l'article sur le projet COPRAA (Colbach et al. 2026). Les travaux ont aussi été décrits plus en détail dans le numéro spécial 101 d'Innovations Agronomiques⁹.

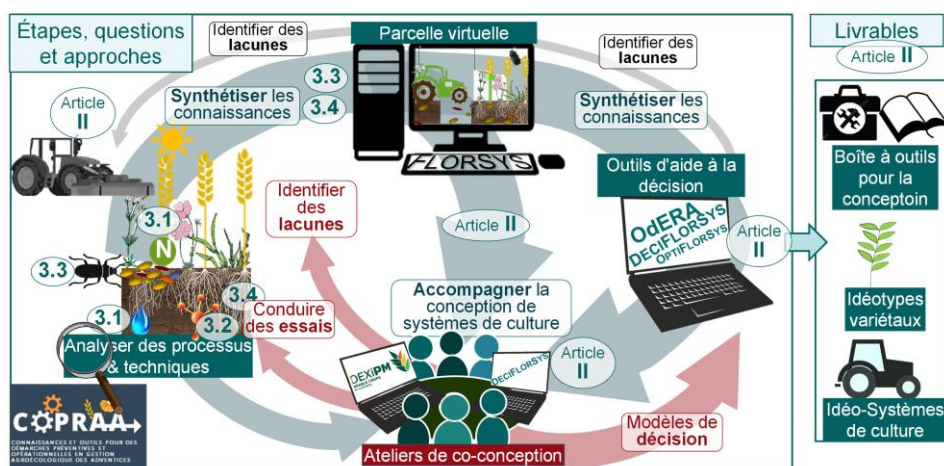


Figure 1 : Organisation des étapes du projet COPRAA, avec les questions, approches, outils et livrables. Les numéros renvoient aux sections de cet article qui illustre des exemples de ces étapes. « Article II » fait référence

aux travaux décrit dans la deuxième partie de cet article (Colbach et al. 2026)

⁹ <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques/volume-101-avril-2025>



2.2. Le modèle FLORSYS, un jumeau numérique des parcelles de grande culture

2.2.1. Structure du modèle

Le modèle FLORSYS (Figure 2) est un modèle mécaniste en 3D, basé sur l'individu (plante), qui simule la dynamique quotidienne des graines et des plantes adventices et cultivées sur plusieurs années ou décennies, à partir des caractéristiques du système de culture, du pédoclimat et du stock semencier adventice initial (Colbach et al. 2019; Colbach et al. 2021). Il produit des sorties très détaillées (par jour et en 3D) semblables à des mesures réalisées sur des couverts réels dans des champs expérimentaux ou agricoles. Ces sorties sont essentielles pour comprendre le fonctionnement de l'agroécosystème et diagnostiquer la multiperformance des systèmes de culture testés. Pour simplifier la comparaison des systèmes de culture, ces sorties détaillées sont traduites en indicateurs de production des cultures ainsi que de services et disservices des adventices.

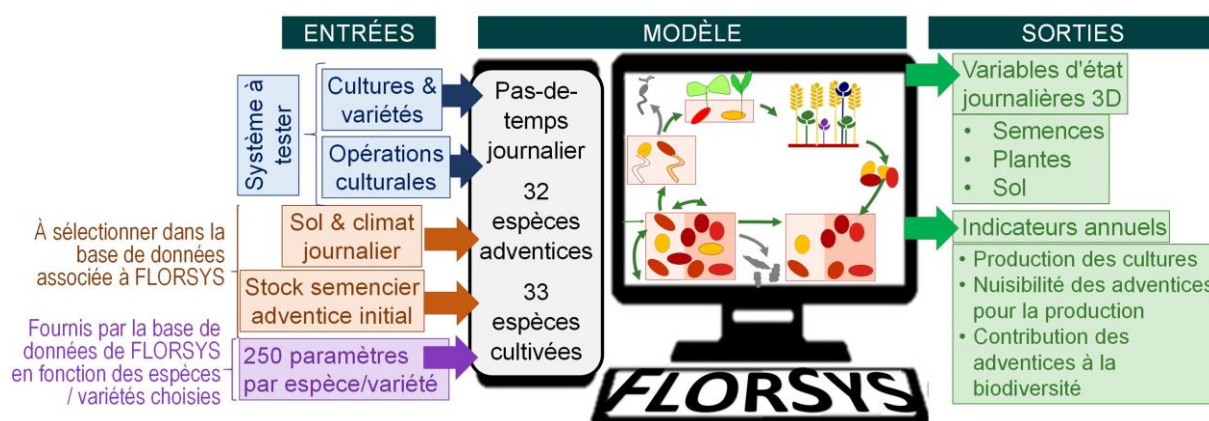


Figure 2 : Le modèle « parcelle virtuelle » FLORSYS simule le développement et la croissance des cultures et des adventices à partir du système de culture, de la météo et du sol, avec une représentation mécaniste des processus biophysiques au jour le jour et en 3D individu-centré (Colbach et al. 2019 ; Colbach et al. 2021).

Pour commencer, l'utilisateur entre une liste d'opérations culturales couvrant plusieurs années, similaire à l'enregistrement des opérations d'un champ réel en station expérimentale ou dans une exploitation agricole, le tout accompagné de la latitude, de relevés météo et de caractéristiques du sol (dont le pool d'espèces adventices). Cette liste comprend toutes les opérations (travail du sol, semis, désherbage mécanique, fertilisation, pesticides, fauche, récolte) décrites en détail en termes de dates et options (e.g., profondeur de travail, produit et dose herbicide).

Ces entrées influencent le cycle de vie des adventices et des cultures en fonction de différents processus (ex. germination, photosynthèse, remplissage des graines), avec un pas de temps journalier. Les stades prélevés dépendent des conditions du sol (structure, température, potentiel hydrique). Le couvert cultures-adventices est modélisé en 3D avec une représentation simplifiée de chaque plante, qu'elle soit cultivée ou adventice. Les processus post-levée de chaque plante dépendent de la température de l'air ainsi que de la lumière et de l'azote disponible dans le sol en fonction de la compétition avec les plantes voisines. Au début du projet COPRAA, le modèle était paramétré pour 32 espèces adventices annuelles ainsi que 33 espèces cultivées (de rente et de services). Les processus du cycle de vie sont modulés en fonction des techniques culturales, des caractéristiques biologiques de chaque semence ou plante et de leur environnement.

2.2.2. Rôle dans l'organisation des travaux de recherche

Même si le modèle est fonctionnel depuis des années, il continue d'évoluer pour répondre aux lacunes de connaissances identifiées par les chercheurs lors de sa construction ou de son utilisation, et à des



nouvelles questions des acteurs de terrain. Dans le cadre du projet COPRAA, des nouveaux modules ont ainsi été ajoutés pour intégrer :

- la compétition plante-plante pour l'eau, un mécanisme qui devient de plus en plus influent avec le changement climatique (section 3.1.1) ;
- la prédation des semences adventices par les carabes (section 3.3.2), pour corriger la surestimation du stock semencier adventices en cas d'absence totale et prolongée de travail du sol identifiée lors de la confrontation du modèle à des observations de terrain ;
- la multiplication végétative des adventices vivaces et des espèces vivaces fréquentes (section 0), pour tenir compte des changements de flore dans les systèmes de culture à faible / zéro usage d'herbicide et/ou de travail du sol.

3. Production de connaissances sur les mécanismes de régulation des adventices et synthèse de connaissances sous forme de modèles

L'objectif de ces travaux était d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement des systèmes de culture réduisant les intrants chimiques au profit des régulations biologiques pour gérer les adventices. Les processus, techniques et cultures étudiées ont été choisis en fonction des lacunes de connaissances existantes sur la prévention des infestations adventices (ex. limitation du retour au stock semencier) et en fonction de la demande des agriculteurs et conseillers (ex. gestion des adventices en semis direct, alternatives au glyphosate).

3.1. Compétition pour les ressources du sol

La compétition pour les ressources du sol a été étudiée en conditions contrôlées et au champ dans la finalité (1) d'identifier comment favoriser la compétitivité des cultures (seules ou associées) envers les adventices, notamment dans un contexte de changement climatique, (2) d'optimiser le choix des espèces dans les associations de cultures de rente ou de service.

3.1.1. Compétition pour l'eau

Pour mieux comprendre la diversité de comportement des espèces en situation de limitation en eau et/ou de compétition pour l'eau entre plantes, plusieurs expérimentations ont été menées sur la plateforme de phénotypage à haut-débit 4PMI à INRAE Dijon¹⁰. Elles ont permis d'étudier la réponse morphologique de 15 espèces (5 cultivées et 10 adventices) à une diminution de la ressource hydrique, montrant qu'en cas de stress, les plantes adaptent leur morphologie pour réduire la perte d'eau par transpiration : augmentation de la hauteur par unité de biomasse, allocation préférentielle de la biomasse aux tiges aux dépens des feuilles, épaississement des feuilles aux dépens de leur surface pour une biomasse foliaire donnée (Cournault et al. 2025). Pour compenser la faible humidité du sol, elles explorent un volume de sol plus grand (allocation préférentielle de la biomasse aux racines aux dépens de la partie aérienne). Ces réponses sont différentes entre espèces végétales mais elles ne sont pas structurées en fonction des clades (mono- vs. dicotylédone) ou du statut (cultivé ou adventice) des espèces. Elles ne sont pas non plus structurées en fonction du stade de développement des plantes.

Ces résultats ont été intégrés dans FLORSYS (cf. section 0) sous forme d'un nouveau module sur la nutrition hydrique des plantes et la compétition pour l'eau. Il simule, pour chaque jour, le prélèvement de l'eau par chaque plante du couvert (qu'elle soit cultivée ou adventice) et les conséquences d'un stress hydrique sur la photosynthèse et la morphologie des plantes (Cournault et al. 2025). Les premiers résultats de l'évaluation de la qualité prédictive du modèle complété par ce nouveau module

¹⁰ <https://plateforme4pmi.dijon.hub.inrae.fr/description-technique/phenotypage-haut-debit>



indiquent une amélioration de la prédiction de la densité et de la biomasse des adventices mais aussi une légère dégradation de la prédiction de la biomasse et du rendement des cultures.

3.1.2. Spatialisation des apports azotés

Deux essais au champ ont été mis en place chez des agriculteurs pour étudier les conséquences d'un apport d'azote spatialisé sur le rang de la culture sur la compétition culture–adventices, en prenant l'exemple de la betterave sucrière en Picardie (Boquet et al. 2024). Les résultats ont montré que la quantité d'azote dans le sol était plus importante autour du point d'application lorsque l'engrais azoté était apporté sur la ligne de semis (par opposition à l'apport en plein). Cet effet a persisté dans le temps, mais s'est estompé. Il était visible dans la couche superficielle du sol au cours des deux années d'expérimentation, et n'était visible dans la couche plus profonde que pendant l'année pluvieuse. Malgré ses effets sur la dynamique de l'azote dans le sol, l'application d'engrais azoté sur le rang de semis (par rapport à l'apport en plein) n'a pas significativement modifié la biomasse des betteraves sucrières et des plantes adventices. Cependant, ce sont les résultats d'une seule situation, et une revue de la littérature est en cours pour compléter ces résultats et tester leur généralité.

3.2. Allélopathie

Déterminer dans quelle mesure l'allélopathie peut contribuer à réguler les adventices au champ permettrait de répondre à une question qui revêt un intérêt majeur en agroécologie et qui est soumise à controverse. La principale difficulté réside dans la dissociation des effets de l'allélopathie (se référant ici à tout effet néfaste d'une plante sur une autre via la production de composés chimiques exsudés par les racines) de ceux de la compétition pour les ressources (lumière, eau et minéraux). Nous avons mené la première revue systématique de la littérature visant à déterminer s'il existe des éléments de preuve au champ des effets de l'allélopathie dans la régulation des adventices (Moreau et al. 2025). Notre analyse montre que, dans un grand nombre d'articles, le rôle de la compétition est ignoré ou insuffisamment caractérisé par les auteurs. Ainsi, contrairement aux conclusions de nombreux articles analysés, il n'est pas possible de déterminer si la régulation des adventices est due à la compétition ou l'allélopathie. *In fine*, nous avons identifié seulement sept articles fournissant des éléments de preuve des effets de l'allélopathie dans la régulation des adventices au champ. Toutefois, même dans ces articles, des effets de la compétition ne peuvent néanmoins pas être totalement exclus.

Pour aller plus loin, de nouvelles expérimentations pourront être menées en s'appuyant sur les recommandations de protocoles que nous avons formulées suite à cette étude. Nous avons par ailleurs démarré la modélisation des processus allélopathiques dans FLORSYS à partir d'expérimentations en conditions contrôlées pour ensuite discriminer, par simulation, les effets de l'allélopathie de la compétition et ainsi évaluer la contribution relative de l'allélopathie à la régulation biologique des adventices au champ.

3.3. Contribution de la prédation à la régulation des adventices

La pluie de graines des plantes adventices crée une ressource alimentaire disponible sur le sol qui est utilisée par de nombreux animaux granivores, à la fois des vertébrés (petits mammifères) et invertébrés (coléoptères carabiques, fourmis). Si cette prédation s'observe dans toutes les parcelles, on connaît mal son impact sur les niveaux d'infestation en adventices et le rendement de la culture. Par ailleurs, il reste à déterminer si l'implantation d'infrastructures agroécologiques en bordure de parcelles augmente cette prédation, en favorisant ces granivores. Pour répondre à ces questions, nous avons mobilisé deux approches complémentaires, l'expérimentation au champ et la modélisation-simulation avec FLORSYS.

3.3.1. Caractérisation de la prédation sur le terrain

Les expérimentations consistaient à évaluer les taux de prédation de graines au champ en exposant au sol des cartes de prédation sur lesquelles étaient collées des graines et en comptant les graines



restantes à la fin de la période d'exposition. Nous avons ainsi évalué l'effet de la présence d'infrastructures agroécologiques sur les taux de prédation à différentes distances dans la parcelle voisine. La prédation de semences de pâturin a été ainsi significativement plus importante en présence d'infrastructure début mai (p value < 0.002) mais pas début juin (Figure 3). L'effet positif de l'infrastructure agroécologique était maximal à une distance de 16 m et se maintenait au moins jusqu'à 32 m à l'intérieur de la parcelle. Cet effet distance a été observé sur d'autres espèces adventices (notamment *Viola arvensis*).

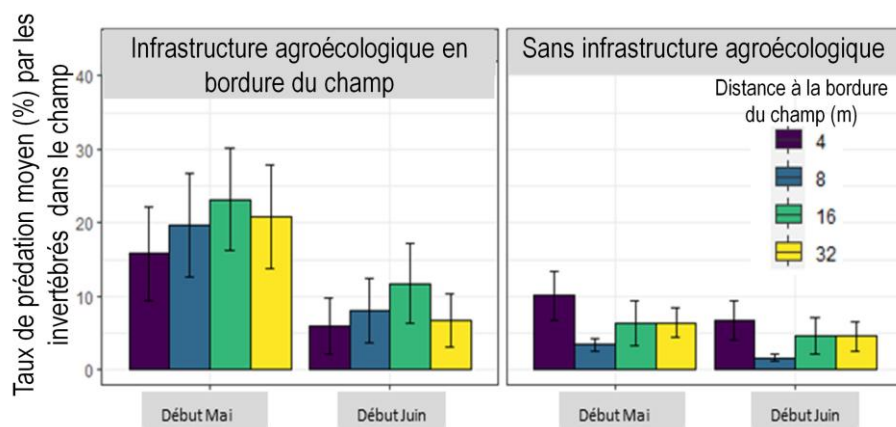


Figure 3 : Taux de prédation de *Poa annua* (moyenne et erreur standard) en blé d'hiver en présence ou absence d'infrastructure agroécologique en bordure de parcelle et en fonction de la distance à la

bordure ($n = 60$ transects avec, sur chaque transect, 4 mesures respectivement à 4, 8, 16 et 32 mètres de la bordure) (Petit et al. 2023).

3.3.2. Synthèse des connaissances dans le modèle FLORSys

Les essais de la section 3.3.1 et d'autres études ont été utilisés ensuite pour développer un nouveau module de prédation des semences (Perthame et al. 2025) qui s'intègre dans FLORSys (section 2.2). Il calcule le taux de prédation journalier pour chaque espèce adventice à partir des traits des semences (qui sont des paramètres du modèle), des données météorologiques (fournies par l'utilisateur), des variables décrivant le couvert (simulées par FLORSys) et des opérations culturales (renseignées par l'utilisateur). Ce taux de prédation est appliqué quotidiennement aux semences adventices nouvellement tombées à la surface du sol, réduisant ainsi le retour de la pluie de semences au stock semencier.

De manière simplifiée, le taux de prédation des semences adventices dans FLORSys est plus élevé pour les semences riches en lipides avec des enveloppes fines que pour les semences pauvres en lipides à enveloppes épaisses, moins riches en énergie et plus difficiles à prédateur pour les carabes. Mais le taux de prédation est davantage corrélé à l'abondance qu'à l'attractivité des semences, ce qui limite le déplacement des carabes et donc leur dépense énergétique pour s'alimenter. Le taux de prédation augmente les jours chauds et diminue avec le rayonnement incident perçu par les carabes. Un couvert dense favorise la prédation des semences en protégeant les carabes de leurs propres prédateurs. Le taux de prédation des semences adventices est plus faible au milieu de l'été car les carabes qui ont émergé au printemps sont en fin de cycle alors que ceux se reproduisant en automne n'ont pas encore émergé. De nombreuses opérations culturales (travail du sol, pesticides, récolte) perturbent l'activité des carabes et réduisent ainsi le taux de prédation alors que les infrastructures agroécologiques favorisent la prédation de semences jusqu'à 40 m du bord du champ (cf. section 0).

Des simulations sont actuellement en cours pour évaluer la contribution de la prédation des semences à la régulation des adventices (Colbach et al. 2026).



3.4. Intégration d'un nouveau type d'adventices : les vivaces

Jusqu'à présent, les recherches sur les adventices se sont surtout concentrées sur les espèces annuelles. Or, dans un contexte de faible/zéro usage d'herbicides et de simplification du travail du sol, la question des adventices vivaces devient cruciale. Ces espèces se reproduisent et se régénèrent rapidement par multiplication végétative, généralement à partir d'organes de stockage (ex. rhizomes). Les vivaces ont été étudiées ici afin de (1) produire et synthétiser les connaissances sur les effets des systèmes de culture sur la multiplication végétative, (2) inclure des nouveaux formalismes dans le modèle FLORSYS pour, à terme, (3) identifier des règles de choix et de combinaisons de techniques culturales et des systèmes de culture permettant de gérer les adventices vivaces avec peu ou pas d'herbicides.

Un essai a été mis en place au champ pour étudier l'effet de six outils de travail du sol sur la fragmentation des organes de stockage d'une adventice vivace, le chardon des champs (*Cirsium arvense* L. Scop.) (Skorupinski et al. 2025). Deux essais en serre ont évalué le potentiel de régénération de fragments d'organes de stockage souterrains de différentes longueurs, diamètres et biomasses de deux adventices vivaces (le chardon des champs et le chiendent rampant, *Elymus repens* (L.) Gould). Les résultats montrent, par exemple, que l'allongement maximum des pousses souterraines dépend surtout de la biomasse du fragment d'origine et est plus élevé pour le chardon que pour le chiendent pour une biomasse équivalente (Skorupinski 2024).

Ces résultats ont été complétés par une analyse bibliographique puis formalisés dans un nouveau module qui prédit la formation, la survie, la fragmentation et la régénération des organes de stockage ainsi que la date de levée et l'emplacement des nouvelles plantes dans le couvert cultures-adventices simulé par FLORSYS (Skorupinski 2024). Les autres étapes du cycle de vie (communes avec les espèces annuelles) ont été paramétrées pour le chardon et le chiendent. FLORSYS est donc maintenant paramétré pour 34 espèces adventices et des simulations sont actuellement en cours pour identifier des systèmes de culture adaptés à la gestion des adventices vivaces (Colbach et al. 2026).

4. Co-développement d'outils d'aide à la décision pour la conception et l'évaluation de stratégies préventives de gestion des adventices

À partir des connaissances produites et synthétisées dans le modèle de recherche FLORSYS dans les étapes précédentes, trois outils d'aide à la décision (OAD) autour de la gestion agroécologique des adventices ont été développés ou améliorés. Tous sont destinés aux agriculteurs et conseillers : ils correspondent à une demande de leur part (Colas et al. 2020) et sont co-construits avec eux.

Les quatre outils numériques développés ou améliorés dans le cadre du projet COPRAA sont complémentaires en termes d'appui à la conception de systèmes de culture (**Tableau 1**) :

- FLORSYS (section 2.2) est un modèle « parcelle virtuelle » qui permet de tester une diversité de systèmes de culture à long-terme et avec différents pédoclimats et flores adventices, en les évaluant à l'aide de nombreuses "mesures" virtuelles sur les cultures, les adventices et le milieu. Ce modèle mécaniste a été amélioré dans le cadre de COPRAA, pour inclure des nouveaux processus (sections 3.1.1, 3.3, 3.4) ou techniques culturales (ex. écimage). Il permet de comparer et choisir des options stratégiques sur la base d'indicateurs de services et disservices écosystémiques (production des cultures, biodiversité...) et répond à la question « que se passe-t-il si ... ». Par contre cet outil de recherche est lent et n'a pas d'interface, et ne peut donc pas être utilisé en routine pour la construction du conseil ou le diagnostic d'une situation ;
- deux outils d'aide à la décision (OdERA, section 4.1, et DECIFLORSYS, section 4.2), plus rapides et ergonomiques que FLORSYS, permettant de sélectionner des options stratégiques en répondant également à la question « que se passe-t-il si ... », mais construits avec deux



approches différentes (expertise vs méta-modélisation d'un modèle mécaniste) et utilisant des critères d'évaluation différents (risque malherbologique pour une série d'espèces préoccupantes vs des indicateurs de services et disservices écosystémiques) ;

- un outil d'aide à la conception de systèmes de culture (OPTIFLORSYS, section 4.3) pour répondre à question « que faut-il faire pour ... ». Cet outil combine la parcelle virtuelle FLORSYS à des algorithmes d'optimisation pour proposer des systèmes de culture répondant aux objectifs de production et/ou de biodiversité recherchés par l'utilisateur.

Tableau 1 : Résumés des caractéristiques et complémentarités des 4 outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices dans le projet COPRAA (Colbach et al. 2025)

	FLORSYS	OdERA	DECIFLORSYS	OPTIFLORSYS
Objectifs	Comprendre les déterminants de la multiperformance des systèmes de culture et guider la conception de systèmes multiperformants.	Comparaison de systèmes de culture par rapport au risque d'enherbement → conception de systèmes à faible pression en adventices	Comparaison de systèmes de culture par rapport à la production et biodiversité → guider la conception de systèmes multiperformants	Proposition de systèmes de culture multiperformants en fonction des objectifs de l'utilisateur
Structure	Modèle de simulation du fonctionnement biophysique, mécaniste, combinant relations déterministes et stochastiques	Modèle empirique des risques malherbologiques en fonction des pratiques culturales	Modèle statistique des indicateurs de production et biodiversité en fonction des pratiques culturales	Couplage FLORSYS – algorithmes d'optimisation
Évaluation	Comparaison à des observations de terrain	Comparaison à des observations de terrain	Comparaison aux simulations de FLORSYS	Comparaison à des observations de terrain
Échelle spatiale	Parcelle, îlot de parcelles	Parcelle		
Pas-de-temps de calcul	Jour	Décade		Jour
Échelle temporelle	Pluriannuelle	Pluriannuelle	Pluriannuelle : notes par système de culture	Pluriannuelle
Entrées	Liste exhaustive des opérations culturales, climat journalier, sol, flore adventice initiale	Principales pratiques culturales ayant un effet sur les adventices	Similaires (mais moins détaillées) à FORSYS	Objectifs de production et/ou biodiversité
Sorties	Densités de semences et plantes (par jour) Indicateurs d'impact sur la production agricole et la biodiversité (par an)	Risque en adventices, effet des différents leviers agronomiques (par système de culture)	Indicateurs d'impact sur la production agricole et la biodiversité (par système de culture)	Proposition de systèmes de culture répondant aux objectifs
Interface humain machine	Non	Interface co-conçue avec utilisateurs		
Limites biophysiques	Peu d'espèces bien paramétrées pour la compétition pour l'eau et l'azote	Pas de prise en compte des conditions pédoclimatiques	Celle de la version de FLORSYS ayant servi aux simulations initiales	Comme FLORSYS
Limites ergonomiques	Lenteur, complexité des entrées, absence d'interface humain -	Pas d'approche multicritère dans l'évaluation	Pas de diagnostic des causes des performances	Temps de calcul long, complexité des sorties



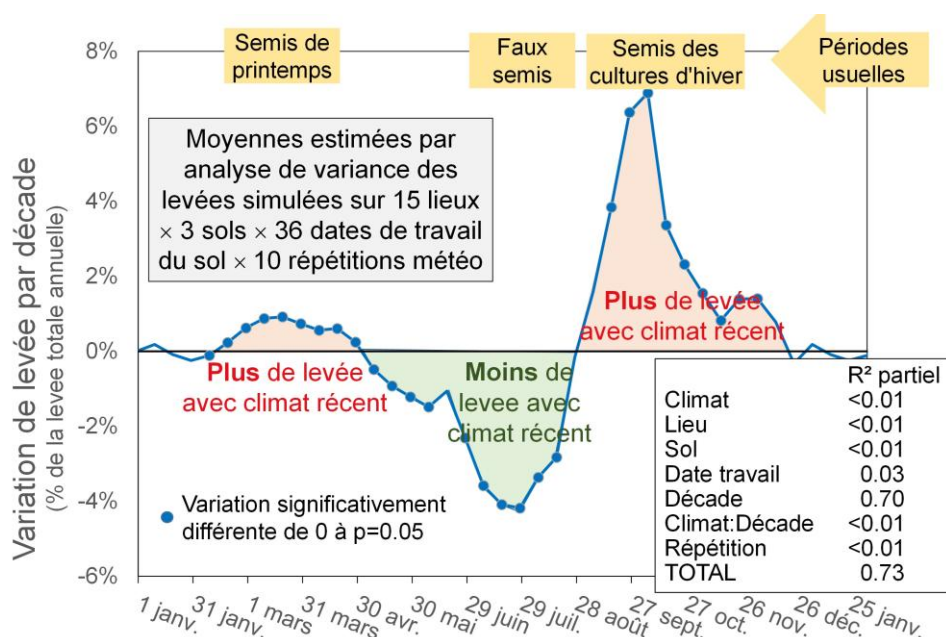
	machine			
Domaine de validité	Grande culture, France tempérée	Grande culture, France	Comme FLORSYS (sauf cultures associées, cultures mineures)	Comme FLORSYS
Utilisateurs	Chercheurs & instituts techniques	Conseillers, enseignants, étudiants & agriculteurs	Conseillers, agriculteurs, enseignants & chercheurs	Chercheurs, conseillers & agriculteurs dans le futur
Utilisation avec les agriculteurs	Occasionnelle	Fréquente, usage pour du conseil		Outil en cours de développement

4.1. Mise à jour de l'outil d'aide à la décision OdERA

OdERA¹¹ est un outil de diagnostic et d'aide à la conception construit à dire d'experts. Il évalue des leviers agronomiques en termes d'impact sur la pression en adventices à l'échelle du système de culture. L'objectif ici était (1) d'actualiser les références sur la biologie des adventices au regard du changement climatique et (2) de mieux prendre en compte les résistances des adventices aux herbicides.

4.1.1. Adaption de l'outil OdERA au changement climatique

Les références sur les levées adventices actuellement contenues dans l'outil ont été construites à dire d'expert et correspondent supposément à un climat passé. Pour les actualiser, les levées d'adventices ont été simulées avec FLORSYS dans des climats passés et présents et différents sols de la moitié Nord de la France. Les premiers résultats sur le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds.) montrent dans le climat présent (2010-2020) des levées plus importantes en automne et, dans une moindre mesure, au printemps, et des levées plus faibles en été (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Par conséquent, le faux semis et le retard de semis risquent d'être moins efficaces et les levées plus importantes en culture, surtout dans les cultures d'hiver. Ces différences peuvent s'expliquer par un climat plus doux entrée d'hiver et des sécheresses plus fréquentes en été. Les réflexions sont encore en cours pour savoir comment agréger les sorties simulées pour produire une



unique courbe de levées potentielles similaire à celle initialement proposée par les experts.

Figure 4 : Effet du changement climatique sur la répartition saisonnière des levées de vulpin en Hauts-de-France. Différence par décade des levées simulées avec FLORSYS avec un climat des années

2010–2020 vs. 1980–1990.

¹¹ <http://www.agro-transfert-rt.org/outils/odera-systemes-2/>



4.1.2. Tenir compte du stock semencier pour gérer la résistance aux herbicides

Gérer la résistance des adventices aux herbicides nécessite une prise en compte du stock semencier de la parcelle pour pondérer l'impact des pratiques culturales, calculé par OdERA. Un prototype d'estimation du stock semencier en parcelle a donc été construit en partenariat avec le projet Adventurh, à partir de simulations de systèmes de cultures réalisées avec FLORSYS. Il permet d'estimer des classes de stock semencier par espèce adventices à partir des observations de flore levée, pour 7 espèces actuellement. La pondération de la note OdERA par la classe de stock semencier reste encore à construire.

4.2. Mise à jour de DECIFLORSYS et développement d'une interface graphique

DECIFLORSYS vise à aider à (re)concevoir et évaluer des systèmes de culture pour une gestion agroécologique des adventices. Le prototype existant au début de COPRAA avait été co-construit avec des utilisateurs (Colas et al. 2020), à partir de simulations avec FLORSYS (section 0). L'outil comprend un calculateur rapide des indicateurs de services et disservices des adventices en fonction du système de culture ainsi que des tables de conseil sur les effets des techniques culturales et les raisons de ces effets. Le calculateur est basé sur des analyses de sensibilité et de la fouille de données (arbres de régression et classification, forêts aléatoires) appliquées à des milliers de simulations réalisées avec FLORSYS. Au lieu de la liste détaillée des opérations culturales utilisée par FLORSYS, DECIFLORSYS utilise des méta-règles de décision (ex. la proportion des cultures de printemps dans la rotation ou la fréquence de labour). Ces entrées sont directement liées aux indicateurs d'impacts des adventices grâce à des forêts aléatoires (Breiman 2001), c'est-à-dire des combinaisons d'arbres de régression. Ces arbres de classification et régression sont construits en divisant successivement le lot de simulations en deux à l'aide de règles sur les méta-règles (ex. % de cultures d'hiver ≥ 21 % vs < 21 %) pour maximiser la différence entre lots en termes d'indicateurs (ex. perte de rendement moyenne de 53 % vs 12 %).

Dans le cadre de COPRAA, le prototype de DECIFLORSYS a été transformé en un outil d'aide à la décision fonctionnel, disponible en ligne (<https://florsys.hub.inrae.fr/modeles-et-oad/deciflorsys>). Pour ce faire, des ateliers ont été organisés avec des futurs utilisateurs (des conseillers, des ingénieurs ARVALIS, des chercheurs INRAE et des élèves-ingénieurs à l'Institut Agro Dijon). Ces ateliers avaient pour objectif de tester et manipuler le prototype de l'interface de DECIFLORSYS et d'amener les futurs utilisateurs à se projeter dans des situations d'usages qu'ils pourraient rencontrer dans le cadre de leur activité professionnelle (Lefeuvre et al. 2023) : atelier de conception, accompagnement individuel ou collectif d'agriculteurs, évaluation de la pertinence de la mise en œuvre de certains essais systèmes, travaux pratiques ou formation dans l'enseignement technique ou supérieur. Ces ateliers ont permis d'identifier des adaptations de l'outil aux besoins des utilisateurs et ont souligné la nécessité de tenir compte des usages pour faire évoluer l'outil et développer en environnement d'accompagnement des futures utilisatrices (Cerf et al. 2025; Omon et al. 2025). Par exemple, il a été décidé de remplacer les arbres de décision initialement présents dans DECIFLORSYS par des tableaux simples permettant de déterminer rapidement les principales pratiques culturales à changer pour améliorer la gestion des adventices.

L'interface graphique a été codée sous R-Shiny et est hébergée par INRAE¹². La page d'accueil comprend aussi un guide d'utilisation et divers matériel pédagogique pour une formation-action conçue avec des futurs formateurs (Pleux et al. 2022). Cette formation est composée d'un guide pour les formateurs, de diaporamas avec audio sur l'histoire de l'outil et le fonctionnement des adventices dans les agroécosystèmes (Queyrel et al. 2025).

¹² <https://deciflorsys.sk8.inrae.fr/>



4.3. Co-conception de l'outil OPTIFLORSYS (structure et interface)

OPTIFLORSYS (Maillot et al. 2025) couple FLORSYS avec des algorithmes d'optimisation multi-objectifs. Pour construire cet outil (structure et interface), le cahier des charges a été établi lors de plusieurs séries d'ateliers avec des utilisateurs potentiels (conseillers, chercheurs), déjà impliqués dans le développement de l'outil DECIFLORSYS. Le principe d'OPTIFLORSYS revient à « inverser » FLORSYS : au lieu de prédire la multi-performance à partir d'un système de culture proposé par l'utilisateur, OPTIFLORSYS propose une série de systèmes de culture produisant la multi-performance recherchée par l'utilisateur (Figure 5). Pour ce faire, l'utilisateur renseigne les mêmes variables d'entrée et paramètres d'espèces et variétés que pour FLORSYS et choisit en plus les indicateurs d'impact des adventices à optimiser (ex. limiter les pertes de rendement, augmenter l'offre trophique aux abeilles) ainsi que les éléments du système de culture qui peuvent être modifiés (ex. date de semis, dose d'azote). À partir de là, OPTIFLORSYS lance une boucle de conception-évaluation où des systèmes de culture sont créés (par variations successives des composantes indiquées comme modifiables) et les indicateurs choisis initialement sont évalués par des simulations avec FLORSYS.

L'outil est amené à évoluer avec, entre autres, les retours des futurs utilisateurs. L'outil sera à terme disponible sur la page web dédiée (<https://florsys.hub.inrae.fr/modeles-et-oad/optiflorsys>).

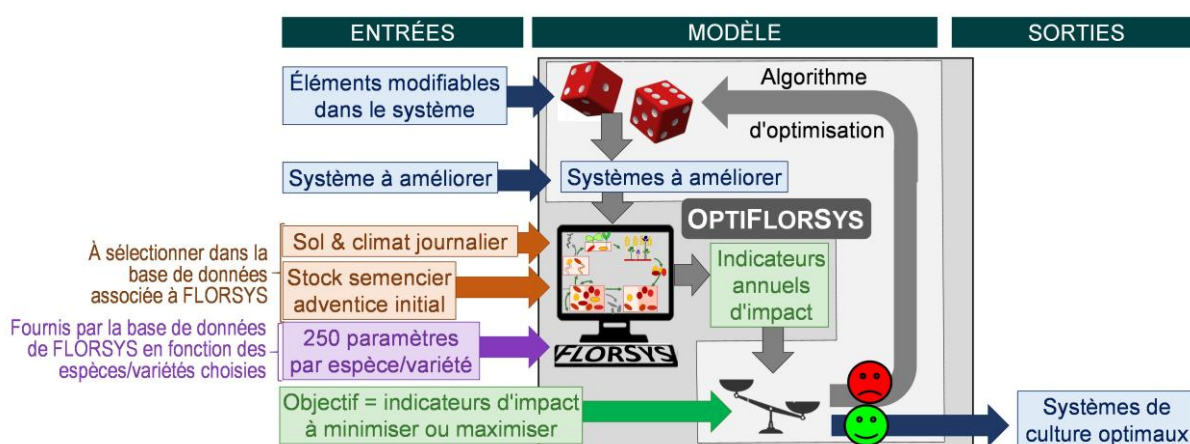


Figure 5 : Schéma fonctionnel de l'outil d'aide à la décision OPTIFLORSYS qui propose des systèmes de culture permettant de maximiser ou minimiser des indicateurs d'impact des adventices préalablement choisis. Cet outil combine des algorithmes d'optimisation avec FLORSYS (extrait de Maillot et al. 2025)

5. Conclusion et perspectives

Le projet COPRAA a permis de produire des nouvelles connaissances sur les mécanismes déterminant les effets des techniques culturales et les régulations biologiques des adventices, avec des expérimentations en conditions contrôlées et au champ. Le modèle mécaniste FLORSYS y a joué un rôle-clé, pour : (1) identifier des lacunes de connaissances à combler en priorité, (2) synthétiser les résultats afin de tenir compte des interactions avec d'autres mécanismes ou techniques ainsi que des effets à long-terme. Cette synthèse a été faite à deux échelles, tout d'abord au niveau du mécanisme dans le modèle FLORSYS. La métamodélisation via des fonctions de prédiction des levées pour OdERA ou des forêts aléatoires pour DECIFLORSYS constitue un deuxième niveau de synthèse. Les acteurs de terrain, conseillers et agriculteurs, sont intervenus dans ces différentes étapes, avec l'identification de lacunes de connaissances, la conduite d'expérimentations et, surtout, le co-développement des structures des outils d'aide à la décision. L'étape suivante était la mise à l'épreuve de ces connaissances et outils numériques pour la co-conception d'idéotypes variétaux et systèmes de culture pour la gestion agroécologique des adventices (Colbach et al. 2026).



Ethique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

ORCIDs des auteurs

Frédérique ANGEVIN : <https://orcid.org/0000-0002-1555-9160>, Nathalie COLBACH ; <https://orcid.org/0000-0002-3791-037X>, Stéphane CORDEAU : (0000-0003-1069-8388), Thibault MAILLOT : <https://orcid.org/0000-0002-9689-9860>, Sandrine PETIT : <https://orcid.org/0000-0001-8781-8873>, Delphine MOREAU : <https://orcid.org/0000-0003-2640-9931>, Jean VILLERD : <https://orcid.org/0000-0001-7156-7512>

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont contribué à une ou plusieurs tâches du projet qui était géré par NC, DM et FA. NC : première version du manuscrit, tous : compléments et amélioration.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas ne 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.

Déclaration de soutien financier

Le projet COPRAA (www6.inrae.fr/projet-copraa/) a été financé avec le soutien financier de l'OFB dans le cadre de l'APR « Les approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques : Coupler le préventif et le curatif au sein des filières, des agriculteurs jusqu'aux consommateurs » lancé dans le cadre du plan Écophyto II+ et co-piloté par les ministères de la transition écologique, de l'agriculture et de l'alimentation, des solidarités et de la santé et de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les personnes sans qui ce travail n'aurait pu être réalisé : les participants et participantes aux ateliers de co-conception de systèmes de culture, les agriculteurs ayant accueillis des essais, les experts du comité de pilotage (Nicolas Chartier, Quentin Delachapelle, Didier Pellet, Jean-Luc Verdier), les CDD et stagiaires (Jeanne Alexandre, Aurélie Baquet, Morgane Bieslin, Mathieu Chanis, Zoé Etcheverria, Thomas Forestier, Claire Goetz, Taïna Larmure, Pierre Lebreton, Inès Mahé, Morgane Mayne, Eugène Motton, Alice Nidriche, Laurène Perthame, Marjorie Pleux, Pauline Souche-Suchovsky, Lucille Trinh Quy).



Références bibliographiques

Boquet B., Mayne M., Flament M., Colbach N., & Moreau D. (2024). Does the application of nitrogen fertilizers on the crop sowing row change the crop-weed competition in low-herbicide cropping systems? In: 18th Congress of the European Society for Agronomy, Rennes, France (26-30 Aug 2024).

Breiman L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.

Cavan N., Omon B., Colbach N., & Angevin F. (2019). Utilisation du modèle FLORSYS comme outil d'aide à la conception de systèmes de culture innovants performants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure. *Agronomie, Environnement & Société*, 9, 131-144.

Cerf M., Jeuffroy M.-H., Meynard J.-M., Lefeuvre T., Queyrel W., & Prost L. (2025). Une analyse des situations d'usage pour concevoir des outils d'aide au changement de pratiques. *Innovations Agronomiques*, 101, 135-148.

Colas F., Queyrel W., Van Inghelandt B., Villerd J., & Colbach N. (2020). DeciFlorSys : un outil pour accompagner les agriculteurs dans la transition agroécologique. *Innovations Agronomiques*, 81, 91-100.

Colbach N., Cavan N., Flament M., Maillot T., Moreau D., Pernel J., Queyrel W., & Villerd J. (2025). La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides. *Innovations Agronomiques*, 101, 119-134.

Colbach N., Colas F., Cordeau S., Maillot T., Queyrel W., Villerd J., & Moreau D. (2021). The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research*, 261, 108006.

Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., Maillot T., Villerd J., & Moreau D. (2019). Du champ virtuel au champ réel - ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies de gestion durables des adventices? *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 9, 111-128.

Colbach N., Moreau D., Boquet B., Cavan N., Cordeau S., Cournault Q., Delachapelle Q., Deytieux V., Flament M., Lefeuvre T., Maillot T., Mosa B., Omon B., Petit S., Queyrel W., Rodriguez A., Skorupinski S., Villerd J., & Angevin F. (2026). Co-produire des connaissances et des outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices : Partie II. Conception et évaluation d'idéotypes variétaux et de systèmes de culture. *Innovations Agronomiques*.

Cournault Q., Colbach N., & Moreau D. (2025). Modéliser la compétition entre cultures et adventices pour l'eau pour la conception de stratégies de gestion des adventices agroécologiques et résilientes au changement climatique. *Innovations Agronomiques*, 101, 1-15.

Craheix D., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., & Doré T. (2012). MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques*, 20.

Lefeuvre T., Prost L., Alaphilippe A., Angevin F., Colbach N., Pasquier C., Queyrel W., Villerd J., & Cerf M. (2023). Mieux appréhender les situations d'usages d'outils et indicateurs agronomiques pour mieux les concevoir : retour d'expériences menées avec l'appui d'IDEAS. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 13.

Lewis J. (1973). Longevity of crop and weed seeds: survival after 20 years in soil. *Weed Research*, 13, 179-191.

Liebman M., & Gallandt E.R. (1997). Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions. In: Jackson L.E. (éd.) *Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions*, 1997. 291-343.

Maillot T., Chanis M., Cavan N., Perthame L., Queyrel W., Villerd J., Vioix J.-B., & Colbach N. (2025). OPTIFLORSYS : Un outil pour aider à la conception de stratégies de gestion d'adventices agroécologiques. *Innovations Agronomiques*, 101, 149-162.

Meynard J.M., Dedieu B., & Bos A.P. (2012). Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: Darnhofer I., Gibons D., & Dedieu B. (éd.) *Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices*, 2012. 407-432.

Moreau D., Mahé I., Chauvel B., Colbach N., Cordeau S., Gfeller A., & Reiss A. (2025). Le rôle de l'allélopathie dans la régulation des adventices : entre rêve et réalité. *Innovations Agronomiques*, 101, 28-37.



Oerke E.-C. (2006). Crop losses to pests. JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE, 144, 31-43

Omon B., Cavan N., Colbach N., & Angevin F. (2025). Mobilisation de la connaissance, pour accompagner la transition vers des systèmes de culture gérant les adventices avec moins d'herbicides. *Innovations Agronomiques*, 101, 201-216.

Perthame L., Petit S., & Colbach N. (2025). La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture. *Innovations Agronomiques*, 101, 38-47.

Petit S., Carbonne B., Etcheverria Z., Colbach N., & Bohan D.A. (2023). Field margins enhance weed seed predation in adjacent fields in early spring. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1228395.

Pleux M., Queyrel W., Colbach N., & Villerd J. (2022). Guide de formation – DECIFLORSYS à destination des formateurs et futurs formateurs à l'outil DECIFLORSYS. (p. 37).

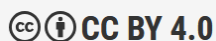
Queyrel W., Nidriche A., Lefeuvre T., Colbach N., Cavan N., & Angevin F. (2025). Élaboration d'un guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice. *Innovations Agronomiques*, 101, 186-200.

Skorupinski S., 2024. Modélisation du cycle de vie des adventices vivaces en interaction avec les systèmes de culture pour l'identification de leviers de gestion agroécologiques, Doctorat de Sciences agronomiques, 238 p.

Skorupinski S., Busset H., Moreau D., Mosa B., Motton E., & Colbach N. (2025). Effets des opérations de travail du sol sur la fragmentation des racines du chardon des champs (*Cirsium arvense*). *Innovations Agronomiques*, 101, 16-27.

Yvoz S., Cordeau S., Ploteau A., & Petit S. (2021). A framework to estimate the contribution of weeds to the delivery of ecosystem (dis)services in agricultural landscapes. *Ecological Indicators*, 132, 108321.

Pour citer cet article : Nathalie Colbach, Frédérique Angevin, Bastien Boquet, Nicolas Cavan, Stéphane Cordeau, et al.. Co-produire des connaissances et des outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices Partie I. Acquisition de données et synthèse dans des outils numériques. *Innovations Agronomiques*, 2026, Vol_110, pp.6-20. [10.17180/ciaq-2026-vol110-art02](https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol110-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.



Co-produire des connaissances et des outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices :

Partie II. Conception et évaluation d'idéotypes variétaux et de systèmes de culture

Nathalie COLBACH¹, Delphine MOREAU¹, Bastien BOQUET², Nicolas CAVAN¹,
Stéphane CORDEAU¹, Quentin COURNAULT¹, Quentin DELACHAPPELLE³, Violaine DEYTIEUX⁴,
Marie FLAMENT², Thibault LEFEUVRE⁵, Thibault MAILLOT¹, Brice MOSA⁴, Bertrand OMON⁶,
Sandrine PETIT¹, Wilfried QUEYREL¹, Alain RODRIGUEZ⁷, Solègne SKORUPINSKI¹,
Jean VILLERD¹, Frédérique ANGEVIN⁸

¹ Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne Europe, 21000 Dijon, France

² Agro-Transfert Ressources et Territoires, 80200 Estrées-Mons, France

³ CIVAM de l'Oasis, 51000 Châlons en Champagne, France

⁴ U2E - Domaine expérimental d'Epoisses, 21110 Bretenière, France

⁵ IDEAS, AgroParisTech Innovation, 91120 Palaiseau, France

⁶ CRA Normandie, 6 rue des Rocquemonts, 14000 Caen, France

⁷ Acta, CDA 47, 271 rue de Péchabout, 47000 Agen, France

⁸ INRAE, Info&Sols, 45000, Orléans, France

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art03>

Résumé

Le projet COPRAA visait à produire avec des acteurs de terrain des connaissances, outils et démarches de gestion préventive opérationnelles pour les conseillers et agriculteurs afin de concilier production agricole, rentabilité économique, biodiversité et faible usage, voire absence, d'herbicides en grande culture. La partie I de cet article a présenté les expérimentations conduites sur les mécanismes impliqués dans la régulation des adventices et les outils numériques développés. Ici sont présentés les essais au champ, les simulations avec le modèle FlorSys et les ateliers de co-conception avec des conseillers et agriculteurs pour évaluer et concevoir des techniques culturales, des idéotypes variétaux et des systèmes de culture innovants pour la gestion agroécologique des adventices.

Mots-clés : Adventice, Pratique préventive, Outil d'aide à la conception, Système de culture durable, Évaluation multicritère

Abstract: COPRAA, a project aiming to produce knowledge and tools for preventive operational approaches for agroecological weed management. II. Design and evaluation of crop ideotypes and cropping systems

The COPRAA project aimed to produce knowledge, tools and operational preventive approaches, together with advisors and farmers, to reconcile agricultural production, economic profitability, biodiversity and low or no herbicide use in arable crops. The first part of this paper presented the experiments conducted on the mechanisms implicated in weed regulation as well as digital tools synthesizing the new knowledge. This second paper describes the field trials, simulations with the FlorSys model and co-design workshops with farmers and advisors aiming to evaluate and design

innovative cropping techniques, crop ideotypes and cropping systems for agroecological weed management.

Keywords: Weed, Preventive practice, Design support tool, Sustainable cropping system, Multicriteria evaluation

1. Introduction

Les adventices sont des bioagresseurs majeurs dans les systèmes de grande culture actuels dans lesquels elles induisent des pertes de rendement et des problèmes de qualité des récoltes (Oerke 2006). Pour des raisons techniques, sanitaires et environnementales, la gestion de ces adventices doit aujourd'hui être repensée. Il faut remplacer les herbicides, qui constituent une technique curative relativement simple et hautement efficace, par des combinaisons de nombreuses techniques à effets partiels, préventifs et long-terme qui interagissent entre elles, avec le sol et les conditions météorologiques (Liebman et Gallandt 1997). L'évaluation de l'effet des adventices doit aussi inclure les services rendus pour la protection de l'environnement (ex. réduction de l'érosion des sols) ou pour la biodiversité (ex. offre trophique aux auxiliaires ou pollinisateurs) (Yvoz et al. 2021).

C'est dans ce contexte qu'a été conduit le projet COPRAA (2021-2024, <https://projet-copraa.hub.inrae.fr/>) dont l'objectif était de produire des connaissances, outils et démarches opérationnelles de gestion préventive des adventices pour les agriculteurs et leurs conseillers, visant à concilier production agricole, rentabilité économique, biodiversité et faible usage (voire absence) d'herbicide en grande culture. La première partie de l'article (Colbach et al. 2026) décrivait (1) les approches et la structure du projet, (2) la production de connaissances sur les mécanismes déterminant les effets des techniques culturales et les régulations biologiques des adventices, avec des expérimentations en conditions contrôlées et au champ, puis (3) la synthèse de ces connaissances dans différents outils numériques destinés à réaliser des expérimentations virtuelles (simulations) et/ou accompagner la réflexion et la décision des acteurs de terrain. Cette partie-ci de l'article rappelle d'abord les outils numériques utilisés (section 0). Ensuite, elle décrit comment les connaissances et outils numériques ont servi pour évaluer (section 0) et concevoir (section 0) des techniques culturales innovantes, des idéotypes variétaux et des systèmes de culture pour la gestion agroécologique des adventices. Une attention particulière est portée sur l'implication des agriculteurs et conseillers dans ces travaux, pour co-décider des questions à traiter, co-développer une boîte à outils pour la conception d'idéotypes et systèmes de culture, en tenant compte des situations d'usage, pour assurer l'opérationnalité des outils et des stratégies de gestion identifiées et leur application par les acteurs de terrain. La **Figure 1** montre comment les différentes étapes du projet interagissent. Les travaux ont aussi été décrits plus en détail dans le numéro spécial 101 d'Innovations Agronomiques¹³.

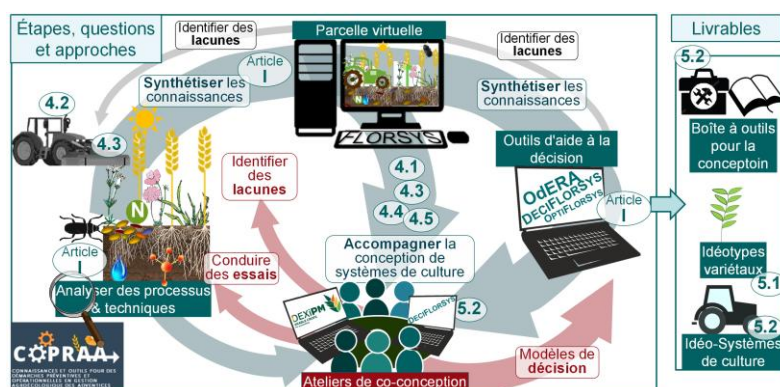


Figure 1 : Organisation des étapes du projet COPRAA, avec les questions, approches, outils et livrables. Les numéros renvoient aux sections de cet article qui illustre des exemples de ces étapes. « Article I » fait référence aux travaux décrits dans la première partie de cet article (Colbach et al. 2026).

¹³ <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques/volume-101-avril-2025>



2. Les outils numériques utilisés

La **Figure 1** illustre la place centrale des outils numériques dans le projet COPRAA pour faire le lien entre la production de connaissances à partir d'expérimentations d'une part, et les acteurs et la gestion des adventices sur le terrain d'autre part. Les quatre outils numériques développés ou améliorés dans le cadre du projet COPRAA sont complémentaires en termes d'appui à la conception de systèmes de culture (Colbach et al. 2025b). Deux d'entre eux ont été utilisés ici (**Tableau 1**).

FlorSys est un modèle de simulation qui représente une parcelle virtuelle et permet de tester une diversité de systèmes de culture à long-terme et avec différents pédoclimats et différentes flores adventices, en les évaluant à l'aide de nombreuses « mesures » virtuelles sur les cultures, les adventices et le milieu. Ce modèle mécaniste construit à partir d'expérimentation permet de comparer et choisir des options stratégiques sur la base d'indicateurs de services et disservices écosystémiques (production des cultures, biodiversité...) et répond à la question « que se passe-t-il si ... ». Par contre cet outil de recherche est lent et n'a pas d'interface, et ne peut donc pas être utilisé en routine pour la construction du conseil ou le diagnostic d'une situation.

Tableau 1 : Résumés des caractéristiques et complémentarités des deux outils d'accompagnement des acteurs utilisés pour évaluer et concevoir des idéotypes variétaux et des systèmes de culture pour la gestion des adventices dans le projet COPRAA (extrait de Colbach et al. 2025b)

	<i>FlorSys</i>	<i>DeciFlorsys</i>
Objectifs	Comprendre les déterminants de la multiperformance des systèmes de culture et guider la conception de systèmes multiperformants.	Comparaison de systèmes de culture par rapport à la production et biodiversité → guider la conception de systèmes multiperformants
Structure	Modèle de simulation du fonctionnement biophysique, mécaniste, combinant relations déterministes et stochastiques	Modèle statistique des indicateurs de production et biodiversité en fonction des pratiques culturelles
Évaluation	Comparaison à des observations de terrain	Comparaison aux simulations de FlorSys
Échelle spatiale	Parcelle, îlot de parcelles	Parcelle
Échelle temporelle	Pluriannuelle	Pluriannuelle : notes par système de culture
Entrées	Liste exhaustive des opérations culturales, climat journalier, sol, flore adventice initiale	Similaires (mais moins détaillées) à ForSys
Sorties	Densités de semences et plantes (par jour) Indicateurs d'impact sur la production agricole et la biodiversité (par an)	Indicateurs d'impact sur la production agricole et la biodiversité (par système de culture)
Interface humain machine	Non	Interface co-conçue avec utilisateurs
Limites biophysiques	Peu d'espèces bien paramétrées pour la compétition pour l'eau et l'azote	Celle de la version de FlorSys ayant servi aux simulations initiales
Limites ergonomiques	Lenteur, complexité des entrées, absence d'interface humain -machine	Pas de diagnostic des causes des performances
Domaine de validité	Grande culture, France tempérée	Comme FlorSys (sauf cultures associées, cultures mineures)
Utilisateurs	Chercheurs & instituts techniques	Conseillers, agriculteurs, enseignants & chercheurs
Utilisation avec les agriculteurs	Occasionnelle	Fréquente, usage pour du conseil



L'outil d'aide à la décision DeciFlorSys est plus rapide et ergonomique que FlorSys, permettant de sélectionner des options stratégiques en répondant également à la question « que se passe-t-il si... ». Il a été construit par méta-modélisation de FlorSys et prédit les mêmes indicateurs de services et disservices écosystémiques que FlorSys.

Pour aller de l'évaluation multicritère de l'impact des adventices vers celle des systèmes de culture, le modèle DEXiPM (Pelzer et al. 2012) est utilisé. Celui-ci évalue les durabilités économique, sociale et environnementale de systèmes de culture, à partir de leurs caractéristiques-clé.

3. Évaluation de techniques et systèmes de culture innovants avec des essais réels et virtuels

Des essais au champ et des simulations ont été mis en place afin :

- d'améliorer nos connaissances sur le fonctionnement de l'agroécosystème ;
- d'évaluer les innovations identifiées chez les agriculteurs et expérimentateurs ;
- d'explorer des variétés et systèmes de culture virtuels pour identifier des combinaisons de traits et/ou techniques innovantes conciliant au mieux réduction d'usage herbicide, production, contrôle de la nuisibilité des adventices et biodiversité.

3.1. Analyse de mécanismes de régulation des adventices

3.1.1. La prédation des semences adventices par les carabes

Pendant le projet COPRAA, un nouveau module a été introduit dans FlorSys permettant de simuler l'effet du système de culture et du pédoclimat sur la prédation des semences par les carabes, puis les conséquences sur la dynamique des carabes (Perthame et al. 2025). Ensuite, des simulations ont été menées sur 412 systèmes de cultures provenant de toutes les régions de grande culture en métropole, sur 30 ans et avec 10 séries climatiques. Ces systèmes ont été simulés deux fois, une fois en incluant la prédation et une fois sans. La comparaison des deux séries a montré que la prédation peut effectivement contribuer à la gestion des adventices, en réduisant l'infestation des champs et en améliorant les rendements des cultures (**Tableau 2**). L'ajout d'infrastructures agroécologiques autour des champs augmente les taux de prédation (+17% en moyenne) et améliore ainsi encore la régulation biologique des adventices.

Tableau 2 : Effet de la prédation des semences adventices par les carabes et de l'introduction d'infrastructures agroécologiques autour des champs sur la production des cultures et l'impact des adventices. Moyennes sur 432 systèmes de grande culture métropolitains simulés avec FlorSys sur 30 ans et avec 10 séries climatiques.

Facteur testé en simulation (vs témoin)	Rendement (en présence d'adventices)	Ressources trophiques pour abeilles	Contrôle de la perte de rendement	Suppression des adventices
Prédation (vs sans prédation)	+18%	+23%	+20%	+22%
Bandes enherbées (vs sans bandes)	+8%	-17%	+39%	+28%

Tableau 3 : Effet de la suppression de techniques-clé sur la production des cultures et l'impact des adventices en présence de prédation des semences adventices comparé aux mêmes indicateurs dans les systèmes non-modifiés en l'absence de prédation.

Technique supprimée	Rendement (en présence d'adventices)	Ressources trophiques pour abeilles	Contrôle de la perte de rendement	Suppression des adventices
Herbicides	-17%	±64%	-39%	-44%
Travail du sol	-14%	+257%	-48%	-57%



Cependant, cette prédation ne permet pas de compenser la suppression du travail du sol ou des herbicides, même si cette suppression augmente les taux de prédation. En effet, même si la suppression des herbicides et du travail du sol augmente le taux de prédation annuel en moyenne de 13% et 31%, respectivement, la perte de rendement et le salissement du champ sont considérablement moins bien maîtrisés que dans les systèmes non-modifiés, même lorsque ceux-ci sont simulés sans prédation d'adventices (**Tableau 3**). Des analyses sont maintenant en cours pour déterminer quelles pratiques culturales permettent de maximiser la régulation des adventices via la prédation des semences.

3.1.2. Gérer les organes de stockage des vivaces par le travail du sol

Pendant le projet COPRAA, un nouveau module a été introduit dans FlorSys permettant de simuler l'effet du système de culture et du pédoclimat sur la multiplication végétative des adventices vivaces et FlorSys a été paramétré pour deux espèces vivaces (Skorupinski 2024 ; Skorupinski et al. 2025). Ensuite, des simulations ont été réalisées pour comparer les réponses de différentes espèces vivaces aux stratégies de gestion et systèmes de culture. Dans l'exemple du **Tableau 4**, 6 systèmes de culture avec une rotation colza/blé/orge et différant en termes de fréquence de travail du sol et d'agressivité des outils ont été simulés sur 12 ans et répétés avec 10 scénarios climatiques. Ces simulations montrent l'importance du travail du sol pour le contrôle du chiendent et du chardon dont les densités sont multipliées par plus de 10000 en non-travail du sol comparé au programme classique déchaumage–labour–reprise au semis.

Cet exemple montre aussi que la fréquence et la date du travail du sol sont plus importantes que le choix de l'outil. Une unique opération au semis est l'option la plus défavorable, créant des fragments d'organes de stockage qui donnent lieu à des "repousses" dans la culture, i.e. des nouvelles plantes vivaces poussées à partir des fragments d'organes de stockage. Un travail du sol précoce a un effet similaire au "faux semis" sur les adventices vivaces : la fragmentation des organes de stockage déclenche la repousse de plantes qui sont alors détruites par un nouveau travail du sol avant le semis. Les fragments ayant produit ces repousses n'ont en général plus assez de réserve pour une repousse post-semis, réduisant ainsi la levée en culture.

Des simulations sont actuellement en cours pour déterminer quelles pratiques culturales permettent de limiter la multiplication végétative et l'infestation des cultures par les vivaces, surtout dans des systèmes de culture économes en herbicides.

Tableau 4 : Effet de travail du sol sur deux adventices vivaces simulé avec FlorSys pour une rotation colza/blé/orge en Bourgogne. Comparaison de moyennes de 12 années de simulation et 10 séries climatiques (ls-means après analyse de variance suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes $p=0.05$), en relatif par rapport à la stratégie composée de deux opérations de travail du sol superficiel et d'un labour (référence en gras dans le tableau).

Travail du sol	Plantes (/m²)		Biomasse des plantes (g/m²)					
			Aérienne		Racinaire		Stockage	
A. Chiendent rampant (<i>Elymus repens</i> (L.) Gould)								
2 travaux sup (post-récolte, semis) + labour (mi-été)	1	A	1	A	1	A	1	C
3 travaux sup (post-récolte, mi-été, semis)	0.59	A	0.57	A	0.28	A	0.32	BC
2 travaux sup (post-récolte, semis)	1.10	A	1.16	A	0.99	A	0.61	BC
1 travail sup (au semis)	243	CD	760	CD	2.85E+04	D	5.70E+03	D
Labour (au semis)	690	D	2.85E+03	D	1.23E+05	D	4.74E+04	E
0 travail	4.73E+05	F	2.54E+07	F	1.02E+09	F	1.68E+10	G
B. Chardon des champs (<i>Cirsium arvense</i> L. Scop.)								
2 travaux sup (post-récolte, semis) + labour (mi-été)	1	A	1	A	1	A	1	A
3 travaux sup (post-récolte, mi-été, semis)	0.73	A	0.63	A	0.58	A	0.65	A



2 travaux sup (post-récolte, semis)	0.85	A	0.74	A	0.78	A	0.47	A
1 travail sup (au semis)	12.5	B	22.0	B	128	B	0.56	A
Labour (au semis)	136	C	525	C	9.07E+03	C	3.71	AB
0 travail	1.04E+04	E	1.65E+05	E	7.48E+06	E	4.31E+09	F

3.2. Limiter le retour des semences adventices au stock semencier par écimage

L'écimage est une technique curative qui consiste à couper les parties aériennes hautes des plantes adventices après floraison et avant grenaison, limitant ainsi le retour au stock semencier de graines viables et la gêne ou les impuretés à la récolte. L'efficacité de l'écimage, son effet sur la compétition entre culture et adventices ainsi que son incidence sur le stock des semences sont peu documentés. Pourtant, ces informations sont essentielles. Cette technique est supposée efficace si elle empêche une majorité de graines adventices d'alimenter le stock semencier, mais son succès dépend de la date et de la hauteur de l'écimage. Ces facteurs, en interaction avec le stade phénologique des adventices, déterminent la proportion de semences déjà formées et écimées ainsi que leur viabilité, mais aussi la proportion de la production de semences potentielle qui n'est pas produite à cause de la coupe des tiges.

Des essais au champ ont été menés sur le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) en blé d'hiver (2021–2023, avec un total de 19 parcelles), orge et pois de printemps (2 parcelles en 2021) et sur ray-grass (*Lolium sp.*) en blé d'hiver (2021, 2023, 3 parcelles). Pour l'instant, seules les données sur vulpin des champs collectées en 2022 ont été analysées (Cordeau et al. 2025a). Le taux d'écimage augmente avec le décalage de la date d'écimage, de 35 % à 55 % entre le 20/05 et le 15/06 en moyenne sur les différents modes de coupe. Ce taux peut atteindre presque 70% pour un écimage tardif à la hauteur de la culture (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Un écimage agressif (à la hauteur de l'épi de la culture) impacte peu le rendement du blé. La viabilité des graines écimées augmente aussi avec le décalage de la date d'écimage mais ne dépend pas de la hauteur de l'épi.

Au final, l'écimage mi-mai fait tomber relativement peu de semences viables au sol au moment de l'opération mais laisse mûrir plus de la moitié des semences (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Un écimage mi-juin supprime 50 % de semences en plus mais leur taux de viabilité est bien plus élevé, faisant tomber au sol 20 % de la production de graines d'adventices, en plus des 33 % non écimées. Une exportation des semences écimées permettrait de considérablement réduire le retour au stock semencier. Ces résultats (entre autres) ont permis la rédaction d'une fiche technique dans la plateforme dédiée à la transition agroécologique GECO

(<https://geco.ecophytopic.fr/geco/Concept/Ecimage>).

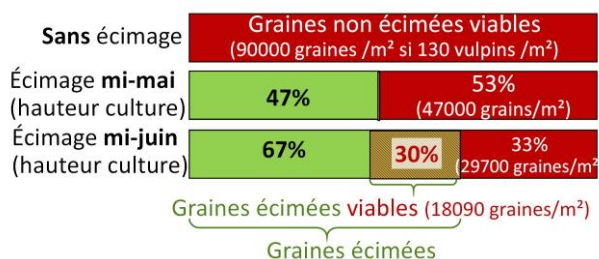


Figure 2 : Effet d'un écimage à la hauteur de la culture sur la proportion de semences de vulpin retournant au stock semencier. Moyenne sur 19 parcelles de blé d'hiver et application à une production de semences de vulpin théorique de

90 000 semences par m².

3.3. Gestion et destruction non-chimique des couverts

De nombreuses études scientifiques montrent que les couverts d'interculture réduisent l'abondance des adventices en interculture (Osipitan et al. 2019), notamment par compétition pour les ressources. Dans la culture suivante, les effets de ces couverts sont moins connus. De plus, ils sont souvent détruits mécaniquement ou chimiquement, ce qui masque leurs effets potentiels sur les adventices. Deux



expérimentations, d'une durée de deux ans chacune, ont été mises en place sur deux parcelles et deux années différentes sur le site expérimental de INRAE Dijon-Époisses (Cordeau et al. 2025b) afin d'identifier les pratiques de gestion des couverts pour réduire les adventices dans les cultures suivantes et de quantifier les effets intentionnels ou non de méthodes de destruction des couverts.

Dans cette étude, les couverts d'interculture ont réduit les adventices en interculture de 68% à 94% selon leur composition, mais ces effets sont moins visibles dans les cultures suivantes. La fertilisation des couverts a augmenté leur biomasse mais sans avantage compétitif sur les adventices. Irriguer les couverts au semis a été inefficace ou contreproductif, car cela a augmenté la biomasse adventice en interculture mais sans impacter les cultures suivantes. Le travail du sol (tout comme le désherbage électrique et l'utilisation de bioherbicide) détruit bien le couvert en place, mais stimule aussi de nouvelles germinations adventices qui lèvent alors en culture. Contrairement aux rouleaux, le désherbage électrique ne génère pas un effet mulch avec le couvert et favorise aussi des levées d'adventices. Par ailleurs, les rouleaux détruisent mal les couverts peu développés ou trop ligneux. Les résultats sont donc très inféodés au couvert semé, au stade de destruction et aux conditions météorologiques.

Tableau 5 : Classement de couverts d'interculture en fonction de leur compétitivité face aux adventices, à partir de simulations avec le modèle FlorSys. Des notes allant de 0 (situation la plus défavorable) jusqu'à 1 (meilleure situation) ont été attribuées pour chaque variable analysée, Seuls les 5 meilleurs, 3 plus défavorables et quelques couverts intermédiaires sont montrés ici.

Couvert d'interculture		Performance des couverts			
Composition	Nombre d'espèces	Après destruction du couvert		Perte de rendement de la culture suivante	Moyenne des notes
		Chimique	Gel		
Ray-grass d'Italie	1	1,00	0,91	0,80	0,90
Moutarde	1	0,81	0,90	0,80	0,84
Fétuque	1	1,00	0,89	0,60	0,83
Trèfle blanc	1	0,79	0,96	0,60	0,78
Luzerne cultivée	1	0,85	0,78	0,69	0,77
...					
Moutarde + 2 ^{ème} espèce (10 cas)	2	0,40	0	0,53	0,49
...					
Groupes B-C [§]	16	0	0,25	0,29	0,18
Groupes B-D	16	0	0,25	0,29	0,18
Sol nu	0	0,16	0	0	0,05

§ B et C désignent deux groupes fonctionnels d'espèces de couverts, établis à partir de leur saisonnalité et de leurs traits de semences et de morphologie des plantes.

Pour compléter les résultats de terrain, la diversité des espèces et mélanges d'espèces de couvert d'interculture a été étudiée en simulation avec FlorSys. Au total, 30 couverts monospécifiques et 126 couverts plurispécifiques (combinant de 2 à 30 espèces) ont été testés avec différentes préparations du semis et modes de destruction (mécanique, chimique, gel), puis intégrés dans deux rotations, chacune simulée sur 12 ans et avec 5 scénarios climatiques. Les couverts ont ensuite été classés en fonction de deux critères : la biomasse adventice après destruction du couvert et le ratio de biomasse adventice divisée par la biomasse de la culture suivant le couvert à la floraison. Ce ratio est proxy de la perte de rendement due aux adventices (Colbach et Cordeau 2018).

Dans ces simulations, la régulation biologique des adventices par le couvert d'interculture était maximale pour des couverts mono-spécifiques (raygrass, luzerne, trèfle blanc, moutarde, fétuque),

moins bonne pour les couverts bi-spécifiques incluant de la moutarde et la plus défavorable pour les mélanges de 3 espèces ou plus (Tableau 5). Dans tous cas, l'effet de la composition du couvert restait assez faible comparé à celui des autres caractéristiques des itinéraires techniques, notamment la rotation et le mode de destruction.

3.4. Optimiser les combinaisons et proportions d'espèces et motifs de semis en associations légumineuses-céréales

Les cultures associées – plusieurs espèces cultivées dans un même champ pendant une partie significative de leur cycle – constituent un levier intéressant pour le contrôle des adventices. Des simulations avec le modèle FlorSys ont été réalisées pour évaluer les effets des cultures associées bispécifiques légumineuses-céréales sur la dynamique des adventices et leur impact sur la production des cultures (Lebreton et al. 2025a). Différents mélanges d'espèces (blé-féverole, blé-pois, orge-pois, triticale-féverole), différentes proportions d'espèces et différents motifs de semis ont été testés, dans des rotations simulées sur 30 ans et répétés avec 10 scénarios climatiques de Toulouse (sud-ouest de la France), soit sans adventices, soit avec une flore adventice typique de la région et abondante. Ces mêmes systèmes ont été simulés aussi en remplaçant les cultures associées par les cultures pures, par exemple l'association blé-féverole a été remplacée par du blé pur ou par de la féverole pure.

Ce plan de simulation a permis d'analyser des rendements potentiels des cultures en association vs en pur, les pertes de rendement des cultures dues à la compétition pour la lumière avec une culture compagne ou avec les adventices, la suppression des adventices due à une culture compagne. Les simulations montrent que (1) les associations orge-pois et triticale-féverole contrôlent le mieux les adventices, (2) le motif alternant un rang de céréale et un rang de légumineuse, d'une part, et les proportions d'espèces avec deux tiers de céréales, d'autre part, maximisent les rendements (ex. du blé-féverole dans la **Figure 3**) et minimisent les pertes de rendement dues aux adventices, (3) la biomasse adventice en association est supérieure ou égale à celle en céréale pure mais toujours inférieure à celle en légumineuse pure et (4) l'association bénéficie surtout aux légumineuses grâce à la compétition exercée sur les adventices par la céréale associée.

La prochaine étape sera de refaire cette étude en tenant compte aussi de la compétition plante-plante pour les ressources du sol.

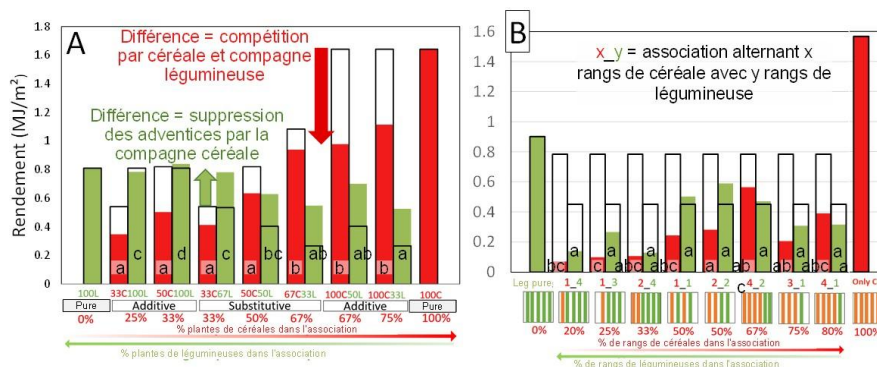


Figure 3 : Effet des proportions d'espèces (A) et motif de semis (B) sur les rendements des céréales (barres rouges) et des légumineuses (barres vertes) en présence d'adventices. Les barres vides montrent les rendements attendus tenant compte des densités de semis de l'espèce dans l'association, estimés en multipliant le rendement de l'espèce en pur par sa densité relative en association. Les barres pleines ayant des lettres identiques ne sont pas significativement différentes à $p=0,05$ (test de Tukey après analyse de la variance) (extrait de Lebreton et al. 2025a).



3.5. Évaluer des systèmes de culture d'agriculteurs pour identifier des systèmes performants sans travail du sol ni herbicides

Les analyses précédentes ne se sont intéressées qu'à des leviers individuels de gestion des adventices. Cette dernière étude a simulé, avec FlorSys, les performances de 395 systèmes de culture provenant d'enquêtes auprès d'agriculteurs, de statistiques agricoles et de conseillers de terrain. L'objectif était de traquer des systèmes de culture conciliant à la fois zéro/faible usage d'herbicides, zéro/faible usage de travail du sol et faible nuisibilité des adventices (tiré de Colbach et Cordeau 2025). Pour étendre la gamme des systèmes testés et décorréler les facteurs majeurs, les 395 systèmes originaux ont été simulés aussi une fois en supprimant tous les herbicides, sans aucun autre changement, puis en supprimant tous les travaux du sol, sans autre changement.

Dans les 395 systèmes de culture pratiqués chez les agriculteurs, l'usage d'herbicide augmente quand l'intensité de travail du sol baisse, une tendance générale observée par ailleurs en grande culture (Cavan et al. 2019). Supprimer le travail du sol (ou les herbicides) sans autre changement de pratiques a doublé la perte de rendement due aux adventices dans les simulations. Nous avons ensuite identifié (1) les caractéristiques ("traits") des adventices qui prédominent après la suppression du travail du sol, (2) les systèmes de culture les plus robustes à la suppression du travail du sol et (3) les combinaisons de techniques culturales pour réduire à la fois le travail du sol, l'utilisation des herbicides et les pertes de rendement (**Tableau 6**). Aucun système ne comportant ni travail du sol ni herbicide ne permet de limiter la perte de rendement due aux adventices. Deux piliers de l'agriculture de conservation des sols (rotations diversifiées, couverture du sol) ont été confirmés comme essentiels pour gérer les adventices dans des systèmes réduisant à la fois le travail du sol et les herbicides.

Tableau 6 : Leviers-clés (classés du plus au moins influents) identifiés à l'aide de simulations avec FlorSys et de fouille de données pour réduire simultanément la perte de rendement due aux adventices, l'usage d'herbicides et du travail du sol, ainsi que les raisons et risques associés (tiré de Colbach et Cordeau 2025). Leviers liés à la rotation (en vert), au semis et la récolte (violet), aux opérations destructrices (en bleu) et aux autres techniques (en noir).

Levier	Raisons	Risques
Diversité de cultures et de variétés dans la rotation. Alternier cultures d'hiver et de printemps	Alterne les conditions favorisant différentes espèces adventices. Diversifie les techniques culturales	Peu de conseil disponible pour cultures mineures. Systèmes plus complexes à gérer
Semer tôt (surtout blé et maïs)	Meilleure levée & production des cultures	Plus de levée adventice en culture
Récolter tôt	Les adventices ont moins de temps pour se reproduire en culture	Maturité incomplète des cultures
Couvert permanent (couverts d'interculture, doubles cultures, cultures pluriannuelles)	Compétition permanente pour les adventices	Moins de perturbations des adventices par les opérations culturales
Cultures printanières et estivales fréquentes	Plus de germination adventice en interculture → moins de semences adventices restantes pour lever en culture. Cycle cultural court → moins de temps pour la croissance /reproduction des adventices	Stress hydrique en fin de cycle des cultures
Roulage fréquent en interculture	↗ le contact sol-semences adventices de surface → plus de	Levée en culture si roulage d'un sol humide juste avant semis



germination adventice en
interculture → moins de
semences restantes pour lever
en culture

**Augmenter la surface désherbée
mécaniquement (désherber aussi
proche ou sur le rang)**

Meilleure destruction non-
chimique des adventices en
culture de rente

Difficile si présence de mulch. Peut
endommager la culture. Peut
déclencher des germinations
adventices en culture

Inter-rang étroit

↘ l'espace vide où les
adventices peuvent pousser

Désherbage mécanique + difficile

**Ne pas irriguer ou irriguer tard après
le semis**

↘ levée des adventices

↘ levée / croissance des cultures

Broyer souvent en interculture

Destruction des adventices en
interculture

**Écimer assez tardivement pour couper
les inflorescences adventices (surtout
en blé)**

↘ reproduction des adventices &
↘ réalimentation du stock
semencier

Peut endommager la culture. Les
semences adventices peuvent déjà
être viables

4. Conception d'idéotypes et de systèmes de culture pour la transition agroécologique

4.1. Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices

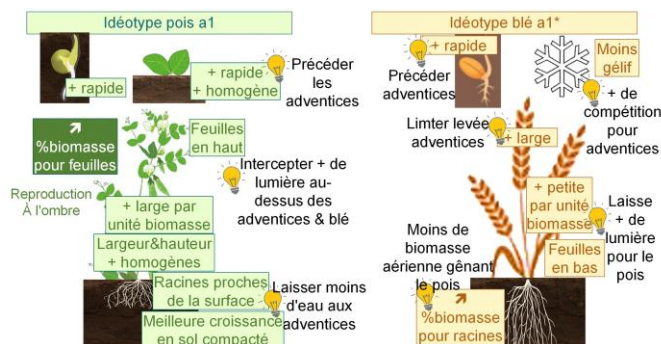
Deux études de simulation ont été réalisées avec FlorSys, l'une sur le blé en agriculture biologique (Lebreton et al. 2025b) et l'autre sur le pois associé au blé des systèmes conventionnels et biologiques (Colbach et al. 2025a), afin d'identifier des idéotypes variétaux pour aider à la gestion agroécologique des adventices. Ces idéotypes ou "variétés idéales" sont des combinaisons idéales de traits, c'est-à-dire des caractéristiques morphologiques, phénologiques, etc. des variétés ou espèces. Le principe était similaire dans les deux cas :

- créer des variétés virtuelles pour étendre la diversité variétale dans les simulations, en tirant au hasard les valeurs de paramètres dans la gamme des valeurs observées sur les variétés existantes,
- simuler ces variétés dans plusieurs milliers de systèmes de culture contrastés (en termes de rotations, travail du sol, etc.), avec ou sans adventices, sur 12–30 années (suivant les études) et avec 5–10 scénarios météo
- utiliser de la fouille de données ("data mining") pour (1) identifier et classer les caractéristiques variétales les plus influents et les combinaisons idéales de valeurs de paramètres en fonction des objectifs (rendement, tolérance aux adventices, suppression des adventices) et des types de systèmes de culture (voir exemple dans la Figure 4), et (2) établir des règles de décision pour gérer les adventices en blé bio et dans les associations pois-blé.

Dans le cas du blé bio (Lebreton et al. 2025b), les caractéristiques variétales-clés sont liées à une couverture du sol précoce, dense et homogène, avec une bonne tolérance au froid et une maturité tardive. La précocité de la levée était un critère plus important que la taille des plantes, particulièrement en non-travail du sol.



Associer le pois avec du blé (Colbach et al. 2025a) réduit les pertes de rendement du pois dues aux



adventices en moyenne jusqu'à 30% pour la variété de pois la moins compétitrice face aux adventices. Les caractéristiques variétales-clés pour le pois (Figure 4) sont liées à une implantation précoce et une meilleure interception de la lumière.

Figure 4 : Caractéristiques variétales idéales (et impacts) de pois et de blé (en association) pour maximiser le rendement de pois en présence d'adventices. Seules

les caractéristiques les plus influentes et les plus différentes des variétés existantes sont montrées. Basé sur (Colbach et al. 2025a).

4.2. Conception de systèmes de culture innovants grâce à des ateliers participatifs

4.2.1. Mise en œuvre des résultats du projet pour la conception de systèmes de culture

L'objectif de ces travaux dans COPRAA était de proposer des démarches intégrant les connaissances et outils provenant des autres étapes du projet. Celles-ci sont destinées à accompagner des groupes d'agriculteurs et leurs conseillers ou facilitateurs dans la conception et l'évaluation de stratégies de gestion des adventices, basées sur combinaisons de leviers agronomiques à effets partiels, qui soient cohérentes et performantes.

Des ateliers de conception ont été organisés avec trois groupes d'agriculteurs de deux régions différentes (cf. **Tableau 7**). Après le diagnostic d'un ou plusieurs systèmes de culture existants avec les outils DeciFlorSys et DEXiPM (section 0), des stratégies ont été conçues par les agriculteurs en fonction des objectifs qu'ils avaient définis et de leurs cadres de contraintes. Elles ont été évaluées avec les deux outils pour connaître leurs performances vis-à-vis de la maîtrise des adventices mais aussi des différents aspects de la durabilité ainsi que pour identifier les synergies à différents niveaux résultant du changement de pratiques (mais aussi les compromis éventuels à mettre en œuvre).

Tableau 7 : Caractéristiques des groupes d'agriculteurs ayant participé à la conception de stratégies de gestion agroécologique des adventices dans le cadre du projet COPRAA (basé sur Cavan et al. 2025).

Groupe	Département	Objectifs de conception	Adventice dominante	Agriculteurs soumettant un système à reconcevoir
GDA Brienne	52	Maîtrise des adventices, faible dépendance aux herbicides, rentabilité et durabilité	Ray-grass (ivraie)	1
CIVAM Oasis	51	Dans un contexte de conversion au bio, maîtrise des adventices & rentabilité, autonomie azotée	Ray-grass (ivraie), vulpin, chardon, chénopode	2
Groupe DEPHY Eure	27	Réduction pas-à-pas des herbicides, maîtrise du salissement	Ray-grass (ivraie)	Plusieurs au sein du groupe

Ces expériences ont montré différents modes de fonctionnement dans les groupes d'agriculteurs mais aussi la diversité des modes d'appropriation et de remobilisation des outils et de leurs résultats par les

conseillers dans leurs pratiques d'accompagnement. La combinaison d'outils numériques et d'expertise a permis d'identifier des points de vigilance dont il faut tenir compte lors de la conception de systèmes de culture à dire d'experts. La comparaison de l'évaluation des prototypes par les agriculteurs et DeciFlorSys ou FlorSys a, par exemple, montré que les experts classent bien les systèmes en fonction des pertes de rendement dues aux adventices (Cavan et al. 2025) mais qu'en revanche, ils ont du mal à appréhender les effets de combinaisons de techniques culturales ou l'évolution des effets des techniques sur la flore adventice à long terme.

Les outils numériques ont aussi permis d'élargir les points de vue des participants des ateliers, de la simple maîtrise de l'abondance des adventices vers une vision centrée sur leur impact, de la seule vision de bioagresseur vers une intégration de la contribution des adventices à la biodiversité. L'évaluation de la durabilité globale des prototypes avec le modèle DEXiPM a permis de discuter de compromis entre objectifs (par exemple, entre l'autonomie azotée et la maîtrise des adventices). Cette étape d'interprétation des résultats des évaluations multicritères est essentielle lors d'un processus de conception car elle permet d'aller au-delà de la seule faisabilité technique et d'aborder l'acceptabilité des changements en analysant l'ensemble des impacts qu'ils peuvent impliquer (économiquement, socialement et environnementalement).

4.2.2. Prise en compte des retours des utilisateurs

L'utilisation de DeciFlorSys en conditions réelles pour évaluer *in itinere* les propositions des agriculteurs a permis d'identifier des améliorations à réaliser. Ces tests ont aussi conduit à définir les conditions nécessaires à un usage efficace de cet outil :

- fournir une formation préalable à l'usage, notamment sur le raisonnement à l'échelle système ;
- s'assurer de la présence d'au moins deux animateurs lors d'un atelier de conception pour gérer les différentes tâches ;
- prévoir un temps minimum pour interpréter les résultats.

Les résultats et les outils obtenus dans COPRAA ont permis des apports spécifiques à différentes étapes du processus de conception de systèmes de culture ayant pour objectif une gestion durable des adventices (**Figure 5**). Un guide méthodologique correspondant à ces étapes et outils a été rédigé (Queyrel et al. 2025) à destination de conseillers. Il détaille différents parcours possibles (rapide, intermédiaire et expert), en fonction des besoins et contraintes de ces derniers (données et temps disponibles, par exemple).

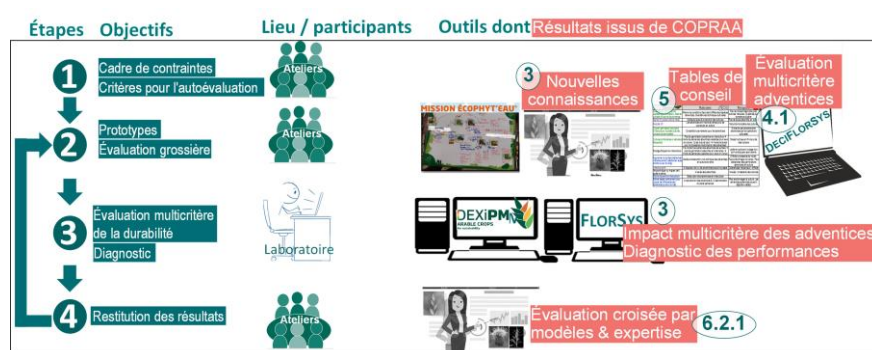


Figure 5 : Apports du projet COPRAA dans un processus de conception de stratégies de gestion agroécologique des adventices. Les numéros renvoient vers les paragraphes de cet article.

5. Conclusion et perspectives

La gestion préventive des adventices doit intervenir à trois niveaux : faire lever les adventices en interculture (que ce soit à partir de graines ou d'organes de stockage pour les vivaces), éviter leur levée lors de la culture principale et prévenir leur reproduction (pour protéger les cultures suivantes). Ces points d'action se traduisent en termes de conception de stratégies par la nécessité de raisonner à l'échelle du système de culture ou, *a minima*, de la rotation, de diversifier les cultures et les techniques culturales mais aussi de faire évoluer la perception qu'ont les acteurs des adventices, du court-terme



vers le long-terme, et de la maîtrise de l'abondance vers la gestion des impacts. Cette diversité de leviers, d'échelles (temporelles mais aussi spatiales) et de points de vue fait qu'il est difficile de quantifier tous les bénéfices des approches préventives uniquement par des expérimentations de terrain. Ce type d'évaluation requiert donc une approche de modélisation globale telle que celle utilisée dans les outils numériques améliorés ou développés dans le projet. **Si cette approche peut sembler théorique, COPRAA a été l'occasion de montrer que modéliser est un mode d'intégration et de compréhension de résultats d'expérimentation en station ou chez des agriculteurs mais aussi de capitalisation et de partage des connaissances sur les adventices.**

Outre une boîte à outils, les travaux menés dans COPRAA ont permis de produire une méthodologie et un guide à destination des conseillers et agriculteurs pour les aider à concevoir des stratégies conciliant production agricole, rentabilité économique, biodiversité et faible usage, voire absence, d'herbicides en grande culture. L'opérationnalité de cette approche a été démontrée dans plusieurs cas d'étude mais sa diffusion à plus large échelle reste soumise à deux verrous majeurs : la réalisation des formations nécessaires par des acteurs autres que les auteurs initiaux (i.e. issus de la recherche) et aussi la maintenance et l'amélioration des outils informatiques produits au-delà de la durée du projet. La co-conception avec les usagers mise en œuvre lors du projet est une première étape pour répondre à cette nécessité d'appropriation et de transfert. La suivante devra être le déploiement de la méthode à grande échelle, ce qui nécessite l'implication d'autres acteurs de la R&D.

Ethique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

ORCIDs des auteurs

Frédérique ANGEVIN : <https://orcid.org/0000-0002-1555-9160> ; Nathalie COLBACH : <https://orcid.org/0000-0002-3791-037X> ; Stéphane CORDEAU : [0000-0003-1069-8388](https://orcid.org/0000-0003-1069-8388) ; Thibault MAILLOT : <https://orcid.org/0000-0002-9689-9860> ; Sandrine PETIT <https://orcid.org/0000-0001-8781-8873> ; Delphine MOREAU : <https://orcid.org/0000-0003-2640-9931>, Jean VILLERD : <https://orcid.org/0000-0001-7156-7512>

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont contribué à une ou plusieurs tâches du projet qui était géré par NC, DM et FA. NC : première version du manuscrit, tous : compléments et amélioration.

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.



Déclaration de soutien financier

Le projet COPRAA (www6.inrae.fr/projet-copraa/) a été financé avec le soutien financier de l'OFB dans le cadre de l'APR « Les approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques : Coupler le préventif et le curatif au sein des filières, des agriculteurs jusqu'aux consommateurs » lancé dans le cadre du plan Écophyto II+ et co-piloté par les ministères de la transition écologique, de l'agriculture et de l'alimentation, des solidarités et de la santé et de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les personnes sans qui ce travail n'aurait pu être réalisé : les participants et participantes aux ateliers de co-conception de systèmes de culture, les agriculteurs ayant accueillis des essais, les experts du comité de pilotage (Nicolas Chartier, Quentin Delachapelle, Didier Pellet, Jean-Luc Verdier), les CDD et stagiaires (Jeanne Alexandre, Aurélie Baquet, Morgane Bieslin, Mathieu Chanis, Zoé Etcheverria, Thomas Forestier, Claire Goetz, Taïna Larmure, Pierre Lebreton, Inès Mahé, Morgane Mayne, Eugène Motton, Alice Nidriche, Laurène Perthame, Marjorie Pleux, Pauline Souche–Suchovsky, Lucille Trinh Quy).

Références bibliographiques

- Cavan N., Alexandre J., Goetz C., Nidriche A., Trinh-Quy L., Queyrel W., Colbach N., & Angevin F. (2025). Apports d'outils d'évaluation dans des démarches de co-conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices. *Innovations Agronomiques*, 101, 174-185.
- Cavan N., Labreuche J., Cousin I., Wissocq A., & Angevin F. (2019). Overview of Tillage Practices and Correlations with Other Agricultural Practices in France: an Analysis of the Agreste Survey (2011). (p. np).
- Colbach N., Angevin F., Boquet B., Cavan N., Cordeau S., Cournault Q., Delachapelle Q., Deytieux V., Flament M., Lefeuvre T., Maillot T., Mosa B., Omon B., Petit S., Queyrel W., Rodriguez A., Skorupinski S., Villerd J., & Moreau D. (2026). Co-produire des connaissances et des outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices : Partie I. Acquisition de données et synthèse dans des outils numériques. *Innovations Agronomiques*.
- Colbach N., Burstin J., & Moreau D. (2025a). Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : exemple du pois associé au blé. *Innovations Agronomiques*, 101, 60-73.
- Colbach N., Cavan N., Flament M., Maillot T., Moreau D., Pernel J., Queyrel W., & Villerd J. (2025b). La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides. *Innovations Agronomiques*, 101, 119-134.
- Colbach N., & Cordeau S. (2018). Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy*, 94, 67-78.
- Colbach N., & Cordeau S. (2025). Gérer les adventices sans travail du sol ni herbicides n'est pas possible en systèmes de grande culture. *Innovations Agronomiques*, 101, 94-106.
- Cordeau S., Boquet B., Chamoy P., Matejicek A., Mosa B., Omon B., & Deytieux V. (2025a). Effet de l'écimage des adventices sur leurs nuisibilités. *Innovations Agronomiques*, 101, 85-93.
- Cordeau S., Rouge A., Adeux G., Busset H., Colombet C., Hugard R., Laurent E., Martin J., Matejicek A., Mosa B., Vieren E., Moreau D., & Guillemain J.-P. (2025b). Rôle des couverts d'interculture et de leurs modes de destruction dans la régulation des adventices. *Innovations Agronomiques*, 101, 48-59.
- Lebreton P., Baquet A., Bedoussac L., Bonnet C., Journet E.-P., Justes E., & Colbach N. (2025a). Motifs de semis, traits et proportions d'espèces pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations légumineuse-céréale. *Innovations Agronomiques*, 101, 74-84.
- Lebreton P., Moreau D., Perronne R., & Colbach N. (2025b). Tracking ideal varieties for agroecological weed management in organic wheat. A simulation study. *European Journal of Agronomy*, 164, 127501.



Liebman M., & Gallandt E.R. (1997). Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions. In: Jackson L.E. (éd.). *Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions*, 1997. 291-343.

Oerke E.-C. (2006). Crop losses to pests. *JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE*, 144, 31-43

Osipitan O.A., Dille J.A., Assefa Y., Radicetti E., Ayeni A., & Knezevic S.Z. (2019). Impact of Cover Crop Management on Level of Weed Suppression: A Meta-Analysis. *Crop Science*, 59, 833–842.

Pelzer E., Fortino G., Bockstaller C., Angevin F., Lamine C., Moonen C., Vasileiadis V., Guérin D., Guichard L., Reau R., & Messéan A. (2012). Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators*, 18, 171-182.

Perthame L., Petit S., & Colbach N. (2025). La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture. *Innovations Agronomiques*, 101, 38-47.

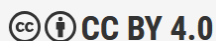
Queyrel W., Nidriche A., Lefeuvre T., Colbach N., Cavan N., & Angevin F. (2025). Élaboration d'un guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice. *Innovations Agronomiques*, 101, 186-200.

Skorupinski S., 2024. *Modélisation du cycle de vie des adventices vivaces en interaction avec les systèmes de culture pour l'identification de leviers de gestion agroécologiques*, Doctorat de Sciences agronomiques, 238 p.

Skorupinski S., Busset H., Moreau D., Mosa B., Motton E., & Colbach N. (2025). Effets des opérations de travail du sol sur la fragmentation des racines du chardon des champs (*Cirsium arvense*). *Innovations Agronomiques*, 101, 16-27.

Yvoz S., Cordeau S., Ploteau A., & Petit S. (2021). A framework to estimate the contribution of weeds to the delivery of ecosystem (dis)services in agricultural landscapes. *Ecological Indicators*, 132, 108321.

Pour citer cet article : Nathalie Colbach, Delphine Moreau, Bastien Boquet, Nicolas Cavan, Stéphane Cordeau, et al.. Co-produire des connaissances et des outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices : Partie II. Conception et évaluation d'idéotypes variétaux et de systèmes de culture. *Innovations Agronomiques*, 2026, 110, pp.21-35. [10.17180/ciag-2026-vol110-art03](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-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.



Projet PUMAT - Pour Un Maraîchage Attractif en Martinique et en Guadeloupe : bilan et perspectives

Laurent Parrot^{1,2,3}, Philippe Bance⁴, Olivier Carême⁵, Angélique Chassy⁶, Cynthia Haral⁷, Hervé Lefaix⁷, Céline Marcellin⁷, Hélène-Marie-Nely⁵, Serge Simon^{1,2}, Karen Toris⁸

¹ CIRAD UPR Hortsys, F-97285 Le Lamentin, Martinique, France

² HortSys, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

³ Université de Paris-Saclay, UMI SOURCE, France

⁴ Pouvoirs, Histoire, Esclavage, Environnement, Atlantique, Caraïbe (PHEEAC, ex LC2S, UMR-CNRS 8053, LABEX CEBA), Université des Antilles, France

⁵ Chambre d'Agriculture de Martinique, 97286 Le Lamentin Cedex 02, France

⁶ Ecole de Management de Normandie Business School – Métis Lab, France

⁷ Service Information Statistique, Économique et Prospective (SISEP), DAAF, Martinique, France

⁸ Association TA NOU BIO, Martinique, France

Correspondance : laurent.parrot@cirad.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art04>

Résumé

Le projet ECOPHYTO PUMAT a identifié plusieurs leviers favorisant l'usage de pratiques agroécologiques aux échelles productives (surface, diversification culturelle, formation), commerciales (certification) et collectives (groupements de producteurs). Le travail, représentant jusqu'à 90 % des coûts, et les prix, sont centraux. Les consommateurs sont prêts à payer plus pour du sans pesticides mais sans attacher d'importance au mode de commercialisation. La démarche systémique du projet montre que l'innovation préventive est un investissement collectif, qui exige confiance et transparence, et que la tension entre collaboration et compétitivité interroge la cohérence des transitions.

Mots-clefs : Maraîchage ; Tomate ; Martinique ; Economie ; système agro-alimentaire ; système sociotechnique ; confiance ; transparence

Abstract: Preventive Innovation and Collaboration Challenges for an Agroecological Transition.

The ECOPHYTO PUMAT project identified several levers that promote the adoption of agroecological practices at productive scales (farm size, diversification, training), commercial scales (certification), and collective scales (producer organizations). Labour, up to 90% of total costs—and pricing are central factors. Consumers are willing to pay a premium for pesticide-free products but do not attach importance to the marketing channel. The project's systemic approach demonstrates that preventive innovation constitutes a collective investment, which requires trust and transparency, and that the tension between alliances and competitiveness questions the coherence of transition pathways.

Keywords: market gardening; tomato; Martinique; economy; agri-food system; sociotechnical system; trust; transparency

1. Introduction

Le projet ECOPHYTO PUMAT (Pour Un Maraîchage Attractif en Martinique) décline une approche globale et une démarche systémique en analysant le couple prévention / curatif à différentes échelles



d'analyse et auprès de différentes disciplines académiques (droit, économie, politique, gestion). Le projet pose comme hypothèses que les stratégies 1) productives (e.g., diversification, formation, ...), 2) commerciales (e.g., organisations de producteurs, vente directe, ...) et collectives (e.g., adhésion à une organisation de producteurs) favorisent une réduction de la dépendance aux Produits Phyto-Pharmaceutiques (PPPs). Le projet propose ainsi une approche à la fois systémique et dynamique des systèmes agro-alimentaires. Ce projet s'ancre également dans un climat de défiance entre le secteur agricole et la société civile, provoquée par la pollution des sols au chlordécone (Woignier *et al.*, 2019).

Ses dimensions systémiques et dynamiques affinent les théories des systèmes socio-techniques (Geels, 2004 ; Geels et Kemp, 2007 ; Morel *et al.*, 2020) en analysant quelques parties prenantes spécifiques peu étudiées (les organisations de producteurs ou la grande distribution). Elle précise les causes profondes de dépendances au sentier (Fares, Magrini et Triboulet, 2012 ; Duru, Therond et Fares, 2015) en abordant la question des systèmes complexes par l'analyse de la qualité des relations entre parties prenantes intra-filières et leurs rapports avec l'action publique. Dans la continuité des travaux sur l'agro-écologie comme science, pratique et mouvement social (Wezel *et al.*, 2009), l'un des objectifs a consisté à comprendre les logiques de fonctionnement des parties prenantes, et les relations entre elles, afin d'en saisir les règles de décision communes, en l'occurrence **le rôle des prix, du facteur travail, et de l'investissement**. Il devient alors possible de préciser les conditions favorables de l'adoption de l'innovation (Douthwaite, Keatinge et Park, 2001 ; Rogers, 2003 ; Sumberg, 2005).

Malgré l'importance des filières fruitières et légumières locales pour l'autonomie alimentaire, il n'existe, à notre connaissance, peu d'études représentatives à l'échelle insulaire de ce secteur à l'exception d'études sur de petites bases de sondage ou ciblées sur la typologie des exploitations agricoles (Rasse *et al.*, 2018 ; Fanchone *et al.*, 2020).

Une originalité du projet consiste à élargir les réflexions de l'adoption des pratiques agro-écologiques à **l'échelle des chaînes de valeurs et des territoires**. Une comparaison entre la France hexagonale et les DOMs illustre certaines spécificités des économies insulaires (Varenne et Parrot, 2021 ; Parrot et Varenne, 2023b, 2023a) et notamment la petite taille des marchés qui peut affecter les démarches de certification pour la vente directe (Luis et Aubert, 2023) ou des organisations de producteurs (Parrot et Joltreau, 2024). Notre comparaison entre la filière maraîchère désorganisée et une filière structurée comme la canne à sucre aux Antilles, met en évidence les facteurs de réussite de la structuration d'une chaîne de valeur (Parrot et Joltreau, 2024).

Une seconde originalité du projet consiste à envisager les **stratégies préventives** à différentes **échelles** d'analyse et pour différentes **disciplines académiques** : l'économie, le droit, les sciences de gestion. La question transversale du **risque** devient donc centrale puisqu'elle affecte les prix (quelle rémunération du risque ? Pour qui ?), du travail (quels risques au travail ? Quels risques pour l'emploi ?) et les investissements (quelles garanties ? Quelles couvertures du risque ?).

Une troisième originalité du projet consiste à étudier la **qualité du rapport collaboratif professionnel** entre les différentes parties prenantes dans la continuité des travaux sur la durabilité des filières (Carter et Rogers, 2008) en s'appuyant sur la théorie de l'alliance issue des sciences cognitivo-comportementales (Parrot et Joltreau, 2024) : quelles compréhensions mutuelles des logiques économiques des parties prenantes (entreprises, pouvoirs politiques) ? Quel accès à l'information (*transparency*) ? Quel niveau de maîtrise technique des métiers ?

Ces questions sont envisagées dans les sections suivantes : le contexte et le cadre conceptuel (2), la méthodologie (3), les résultats obtenus (4) et leurs implications pour des recherches futures (5).

2. Contexte et cadre conceptuel

2.1. Le cadre antillais et sa portée générique

La Martinique est une île des petites Antilles (1 128 km²), abritant une population de 361 019 personnes en 2022. La densité de sa population reste très élevée 320 hab / km² (contre 107,1 en France hexagonale) malgré une population vieillissante et en déclin depuis 2006 (source INSEE). La production de fruits et légumes destinée aux marchés locaux ne couvre que 40% des besoins de la population, le solde étant importé (Parrot et Varenne, 2023b). Sur l'ensemble de la consommation alimentaire, 90 % des calories consommées sont importées (Colombet *et al.*, 2020). En 2022, **l'écart de prix** entre la Martinique et la France métropolitaine atteint +14 % et +40 % pour l'alimentation, l'un des premiers postes de consommation des Martiniquais (source : INSEE). Le cas de la tomate est assez emblématique : la production locale ne s'étend que sur 3 mois. La Martinique se fournit auprès de 14 pays pour les importations (source douanes). Avec des prix au détail variant de 1,99 à 5 euros le kilo.

Par ailleurs, le climat chaud et humide provoque un **enherbement** difficile à maîtriser pour l'ensemble des filières agricoles (Préfecture de Martinique, 2025). Une baisse générale des ventes globales est ainsi observée en 2022 (-9,4 %), avec une domination des herbicides (61 %), mais en recul, tandis que les fongicides progressent (35 %, surtout soufre) et les insecticides restent marginaux (2 %). Cet enherbement mobilise jusqu'à 70% du temps de travail dans la production maraîchère au détriment d'autres activités agricoles. Malgré un nombre moyen de traitements phytosanitaires deux fois plus faible que la moyenne nationale pour la production de légumes en 2013 en Martinique et en Guadeloupe (5 contre 12) (AGRESTE, 2015), le glyphosate reste la substance active la plus vendue en Martinique (Préfecture de Martinique, 2025). La progression simultanée du biocontrôle à 27 % des ventes confirme l'existence d'une dynamique de substitution compatible avec des approches préventives.

Enfin, l'arc antillais est situé dans la zone équatoriale et tropicale planétaire qui frappera d'ici 2070 un tiers de la population mondiale d'une **température annuelle moyenne supérieure à 29 degrés** Celsius (Xu *et al.*, 2020). Actuellement cette moyenne ne concerne que la zone du Sahara, soit 0,8 % de la surface planétaire. Les agriculteurs et les chaînes de valeurs seront donc affectés par la double transition écologique et climatique.

2.2. Cadre conceptuel

Le projet ECOPHYTO PUMAT s'inscrit dans une démarche exploratoire **systémique** (Geels, 2004 ; Geels et Kemp, 2007) et **dynamique** inspirée du circuit économique avec des boucles rétroactives (demande des marchés -> offre -> demande des marchés).

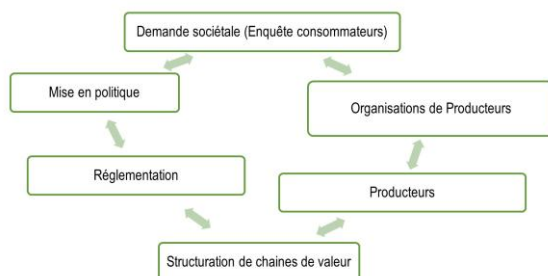


Figure 1 : Cadre conceptuel du projet ECOPHYTO PUMAT. L'originalité de la démarche consiste à endogénéiser des éléments (droit, gestion) qui, jusqu'à présent, étaient souvent considérés comme exogènes dans des approches systémiques.

La démarche dynamique et systémique s'inscrit ainsi (Figure 1): 1) l'expression des préférences des consommateurs pour des produits agricoles locaux et sains (Chassy, Bance et Nguyen-Huu, 2025) influence 2) des évolutions sociétales et politiques (Parrot et Faure, 2022, 2023), et par conséquent



influence 3) des évolutions réglementaires (Parrot et Faure, 2024). La nécessité de mise en conformité aux exigences sanitaires impose 4) des stratégies productives, commerciales et collectives censées répondre à l'expression des préférences des consommateurs en 1), et ainsi de suite.

Du principe de précaution aux innovations préventives : apports théoriques de la sociologie rurale

Le principe de prévention est à mettre en relation avec le **principe de précaution** (Foucher, 2002). Ces deux principes s'articulent autour des niveaux de **risques** et des niveaux de **connaissances**. Le principe de précaution est un principe de gestion des risques qui stipule que l'absence de certitude scientifique ne doit pas empêcher la mise en place de mesures pour éviter un dommage grave ou irréversible. Ce principe est au cœur du développement durable (Brundtland, 1987). Il est également au cœur de la politique environnementale de l'Union Européenne (Article 191 § 2, Traité sur le Fonctionnement de l'Union Européenne, 2012).

Ce n'est que lorsque le niveau de connaissance s'améliore et que le niveau de risque peut être probabilisable que l'on parle de prévention (Rogers, 2003). Le principe de prévention consiste alors à mettre en place des actions ou des conditions qui réduisent la probabilité qu'un problème survienne, ou en atténuent ses effets potentiels.

La sociologie rurale anglo-saxonne (Douthwaite, Keatinge et Park, 2001 ; Rogers, 2003 ; Sumberg, 2005) définit l'innovation préventive comme une idée/objet qu'un individu adopte à un moment donné afin de réduire la probabilité qu'un événement non désiré ne se produise (Rogers, 2003, p. 93). La théorie de la sociologie rurale indique que l'innovation préventive est plus difficile à faire adopter qu'une innovation classique. En effet, elle est associée à un événement non désiré qui pourrait ou pourrait *ne pas* survenir si l'innovation n'est pas adoptée. L'innovation préventive déroge ainsi à au moins deux des cinq attributs de l'innovation qui favorisent - en temps normal - l'adoption : l'**avantage comparatif** et l'**observation** des effets¹⁴. Cette théorie préconise trois recommandations pour favoriser l'adoption des innovations préventives : le cadre réglementaire (coercitif), les démarches collectives et la communication.

Approches globales et alliances entre parties prenantes pour investir

Le projet ECOPHYTO PUMAT précise quelques-unes des réflexions des systèmes sociotechniques (Morel *et al.*, 2020) et des innovations couplées (Navarrete, Casagrande, Angeon, Bouvier-d'Yvoire, *et al.*, 2024) en intégrant les concepts d'investissement plutôt que d'adoption ; et d'alliances plutôt que de coordination.

La définition officielle de l'agro-écologie en France note que « *L'agro-écologie tend notamment à combiner une production agricole **compétitive** avec une exploitation raisonnée des ressources naturelles* » (Journal Officiel de la République Française, 2015). Or l'investissement est l'un des leviers de la compétitivité. Une innovation agroécologique préventive n'est pas une charge ou un simple bien consommé, mais un investissement stratégique de moyen et long terme pour l'ensemble de la société. Si on la considère comme une dépense, on la réduit à un coût immédiat, une perte sèche qui alourdit la trésorerie des exploitations et pèse sur la compétitivité. Mais si on la considère comme un investissement, on évalue son rendement futur. Considérer l'innovation préventive comme un investissement revient donc à étudier les **déterminants de l'investissement**. L'un des déterminants fondamentaux de l'investissement est le **signal-prix**. Un agriculteur n'investira dans une innovation préventive que s'il est confiant dans un signal-prix incitatif, c'est-à-dire non seulement 1) élevé par rapport à d'autres alternatives d'investissement qui s'offrent à lui, dont l'option de ne pas investir du tout ; mais aussi 2) suffisamment stable dans le temps pour stabiliser les coûts de l'opération (les amortissements notamment).

¹⁴ Les trois autres attributs d'une innovation sont sa complexité, sa compatibilité, et sa testabilité (Rogers, 2003).



Les innovations organisationnelles entre parties prenantes favorisent l'investissement en faveur d'innovations agro-écologiques. Le projet ECOPHYTO PUMAT a complété les recherches sur les innovations organisationnelles pour tester la **théorie de l'alliance**. Cette approche permet d'analyser la qualité des relations entre les principales parties prenantes du système sociotechnique (Parrot et Joltreau, 2024) et de préciser des concepts tels que la **confiance** ou les **conflits d'intérêt** (Duru, Therond et Fares, 2015). En ce qui concerne les conflits d'intérêt, les rapports de pouvoir, nous mobilisons les sciences du droit pour montrer comment le principe de la dérogation réglementaire qui traduit une *exception*, peut aussi, dans certains cas, être un *instrument* au service de groupes d'intérêts (Parrot et Faure, 2024). La démarche générique de l'alliance s'appuie sur un accord collectif autour d'un but commun (e.g., réduire les PPPs) et 4 principes incontournables : 1) le niveau de compréhension mutuel des logiques de fonctionnement des parties prenantes (quels sont les modèles de gestion des organisations ?), 2) la **transparence** dans l'accès à une information utile et pertinente (Carter et Rogers, 2008), 3) la proximité relationnelle, et 4) la maîtrise technique des métiers respectifs. **La transparence et les maîtrises techniques renforcent la confiance entre les parties prenantes**. Or les alliances sont rares : la transparence par le partage de l'information, si elle peut rassurer les consommateurs, peut affaiblir l'avantage compétitif d'une entreprise (Carter et Rogers, 2008 ; Parrot et Varenne, 2023b). De même, la volonté de ne pas se mettre en condition de vulnérabilité (par des stratégies de diversification dans la gestion du risque) peut paradoxalement affaiblir les niveaux de confiance entre parties prenantes (Parrot et Varenne, 2023b).

3. Méthodologie

Des approches comparatives à l'échelle des systèmes alimentaires ont permis de situer et préciser les enjeux des PPPs en étudiant les alliances intra filières (maraîchage / canne) (Parrot et Joltreau, 2024); et selon les sites avec la méthode économétrique de la double différence (DOM, France hexagonale) (Luis et Aubert, 2023).

Afin de saisir les attentes sociétales en faveur de produits sains et locaux, une enquête d'évaluation contingente auprès de **513 résidents** en Martinique a été réalisée en 2022 avec la méthode des quotas (âge, genre, CSP) et des méthodes dédiées (Lancaster, 1966 ; Venkatesh *et al.*, 2003 ; Venkatachalam, 2004) sur leur consentement à payer un prix plus élevé pour des produits locaux et certifiés sans pesticides (Chassy, Bance et Nguyen-Huu, 2025). La tomate a été retenue car c'est un bien substituable par des tomates importées et c'est un bien familier du panier de la ménagère.

Afin de caractériser les stratégies productives, commerciales et collectives en faveur de la mise en place de pratiques et de combinaisons de pratiques agro-écologiques, une enquête a été conduite en 2022 auprès de **409 maraîchers** en Martinique (203) et en Guadeloupe (206). Les enquêtes menées en Guadeloupe ont été financées par le projet Territoires Durables (Ministère des Outre-mer).

Des **entretiens semi-directifs** en Martinique ont été conduits auprès de la DAAF (Service de l'Information Statistique, Economique et Prospective, Service Agriculture et Forêt), de la Chambre d'Agriculture), des organisations de producteurs, d'agriculteurs, etc. Les méthodologies se sont appuyées sur les disciplines respectives en sciences du droit (démarche sociohistorique), en sciences politique (Ansaloni, 2013 ; Smith, 2019), et en sciences de gestion (Porter, 1979).

La co-conception adoptée dans le cadre du projet repose sur une démarche participative par étapes (Figure 2).

La première étape a établi un cadre de contraintes lors d'ateliers les 8 juin et 6 juillet 2021. Les parties prenantes de la filière (agriculteurs, techniciens et cadres institutionnels, chercheurs) ont inventorié leurs pratiques de gestion des bioagresseurs en les classant selon leurs cibles et leur mode d'action (préventif vs curatif). Ensuite, une évaluation multicritère de ces pratiques a permis de préparer leurs



combinaisons au sein de prototypes de gestion simultanées de l'ensemble des bioagresseurs (ravageurs, maladies et enherbement).

La deuxième étape a consisté en la mise en œuvre au champ des prototypes définis sur une station expérimentale du Cirad (Pénélope, 2022). Des évaluations participatives ont alors été régulièrement conduites à travers des visites auxquelles étaient invités les parties prenantes de la filière. Les remarques collectées à ces occasions ont permis de faire évoluer les combinaisons de pratiques au fur et à mesure des cycles culturels successifs. L'aspect le plus souvent évoqué portait sur le volume et la pénibilité du travail. **Les visites furent aussi des occasions de présenter des pratiques innovantes (par exemple le paillage papier ou carton) qui depuis ont été adoptées par les producteurs.**

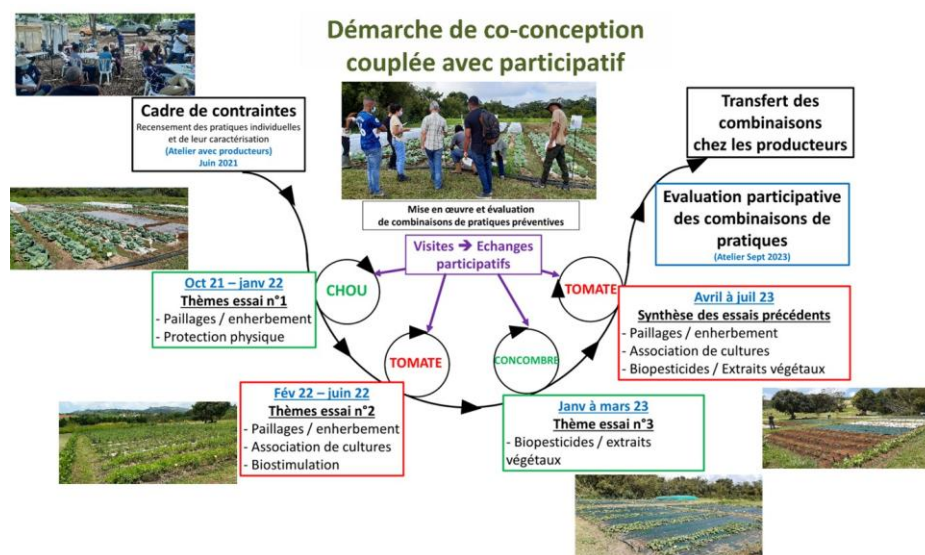


Figure 2 : Co-conception couplée avec une démarche participative (Simon, 2022). Crédits photos © Cirad.

Le réseau des fermes DEPHY en Martinique qui devait accueillir cette étape n'a pas été accessible et aucun autre producteur volontaire n'a pu être identifié. Les résultats de

l'enquête à l'échelle insulaire ont montré que 70% des maraîchers utilisent des PPPs, mais les résultats n'ont été obtenus que fin 2022, ce qui n'a pas permis de réorienter le dispositif initial. La mise en œuvre des combinaisons en station expérimentale a compliqué les analyses coûts-bénéfices. Ainsi, les temps de travaux sont sous-estimés. Par ailleurs, les premiers agriculteurs volontaires dans la démarche de co-conception, en 2021 n'utilisaient pas de PPPs, mais formulaient en revanche de fortes attentes sur la réduction de la **pénibilité du travail**. La démarche s'est donc focalisée sur la réduction de la pénibilité du travail. Des analyses à coûts partiels (coûts de revient) des innovations préventives testées ont toutefois montré l'importance du coût du travail (en plus de sa pénibilité).

La troisième et dernière étape résidait dans la restitution des résultats des expérimentations agronomiques à la profession qui ouvre la voie au transfert des combinaisons de pratiques aux producteurs. Cette étape a été couplée avec la restitution du volet agronomique.

4. Résultats

Les statistiques descriptives sur la base des 409 agriculteurs interrogés montrent qu'il n'existe pas de différences significatives entre la Martinique et la Guadeloupe¹⁵ :

- 20 %** des maraîchers en Martinique et en Guadeloupe utilisent exclusivement des intrants chimiques,
- 52 %** combinent intrants chimiques et pratiques agro-écologiques,
- 8 %** n'utilisent ni intrants chimiques ni pratiques agro-écologiques recensées dans le questionnaire,

¹⁵ Les résultats sont les suivants pour la Martinique exclusivement : 21 % utilisent seulement des intrants chimiques ; 52 % combinaison intrants / pratiques agroécologiques ; 5 % ni intrants ni pratiques agroécologiques ; 22 % pratiques agroécologiques uniquement.



20 % recourent exclusivement aux pratiques agro-écologiques recensées dans le questionnaire.

Une traque à l'innovation pourrait s'avérer utile pour préciser les pratiques agro-écologiques des 8 % des maraîchers. **Les enquêtes montrent également que 95 % des maraîchers interrogés déclarent un revenu agricole mensuel inférieur à 1 500 euros et 71 % un revenu agricole mensuel inférieur à 1 000 euros.** Pour rappel, le seuil de pauvreté en France est de 1 288 euros par mois (Source : Insee). Un projet parallèle (FEADER Circuits Courts) sur 9 fruits et légumes montre que 5 d'entre eux ne sont pas rentables sans des appuis financiers. Le coût du travail direct (hors temps de réflexion, temps d'observation), sans compter la pénibilité du travail, représente 90 % des coûts variables. Le taux de mobilisation des Mesures Agro-Environnementales et Climatiques (MAEC) en Martinique a été de 9.8 % en 2022 (source ODEADOM). Il s'explique par un montant unitaire de soutien par unité de surface agricole insuffisamment incitatif.

4.1. Une demande pour des produits locaux certifiés mais pas à n'importe quel prix

Le Consentement à Payer (CAP) des consommateurs martiniquais pour des tomates s'établit selon trois scénarios d'évolution d'attributs : évolution de la non-certification à la certification, et évolution de l'importation à une production locale (Chassy, Bance et Nguyen-Huu, 2025).

Dans le premier scénario (1), le passage de tomates locales non certifiées à locales certifiées entraîne une hausse du consentement à payer (CAP) moyen de 1,01 à 1,15 €, soit +20 à 23 % sur un prix initial de 5 €. Malgré ce prix déjà élevé, l'argument de santé lié à l'absence de pesticides convainc les consommateurs, comme le montre un faible taux de rejet (9,3 %).

Dans le second scénario (2), l'évolution de tomates importées non certifiées à locales non certifiées provoque une hausse plus faible du CAP (0,75 à 1,01 €). Le pourcentage d'augmentation est plus élevé (+25 à 33,6 %), mais calculé sur une base plus basse (3 €). Le critère « local » compte, mais reste secondaire face à la certification. Le taux de rejet, plus important (20,5 %), confirme cette hiérarchie.

Le troisième scénario (3), combinant certification sans pesticides et origine locale, engendre la plus forte hausse du CAP (1,16 à 1,27 €, soit +33,8 à 43,3 %). Le rejet est minimal (6,2 %), révélant une forte motivation pour ce double bénéfice.

Les consommateurs valorisent surtout la certification sans pesticides. Cependant, si l'association avec l'origine locale maximise leur acceptation d'une hausse de prix, le lieu de vente n'est pas un critère important des intentions d'achat.

4.2. La question centrale des prix

Les prix, les consentements à payer des consommateurs, s'inscrivent dans des dynamiques sociales qui interagissent avec les dynamiques réglementaires (Faure, 2021 ; Parrot et Faure, 2022). Par exemple, les manifestations en 2024 contre la vie chère en Martinique ont provoqué la mise en place le 16 octobre 2024, d'un **protocole d'objectifs et de moyens** signé par l'État, la Collectivité territoriale de Martinique, les distributeurs et d'autres parties prenantes, pour faire baisser les prix de plus de **6 000 produits alimentaires** dans les grandes surfaces. Comme précisé précédemment, la préférence pour une production locale ne doit pas masquer le fait que le lieu de vente n'est pas un critère important des intentions d'achat. C'est-à-dire dans un contexte où **plus de 80 % des fruits et des légumes sont achetés via des circuits longs** (DAAF, 2019).

4.3. Des taux d'adoption de pratiques agro-écologiques qui varient de 5 à 90%

En moyenne, les maraîchers mobilisent 5 pratiques agro-écologiques sur leur exploitation agricole (Figure 3).

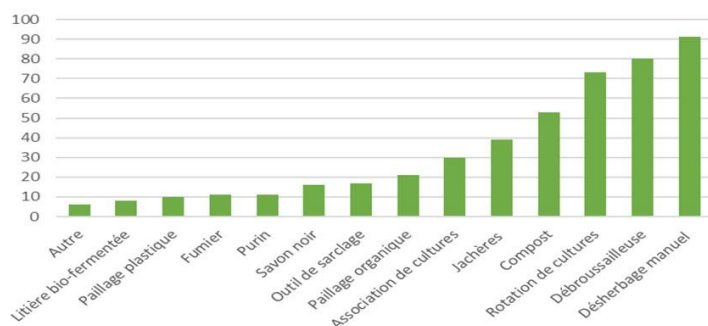


Figure 3 : Taux de pénétration des pratiques agro-écologiques en maraîchage en Martinique et Guadeloupe (données enquêtes 2022 auprès de 409 maraîchers) (Parrot *et al.*, 2023). Les pratiques agro-écologiques sont, dans plus de la moitié des cas, combinées à l'utilisation d'intrants chimiques (dont les engrais).

Avec la mécanisation et le souci de réduire la pénibilité du travail, certaines pratiques dites « agro-écologiques » devraient cibler des taux de pénétration à la baisse. Cela concerne en particulier le désherbage manuel, généralisé, mais particulièrement éprouvant en climat chaud et humide.

Les taux de pénétration intermédiaires (entre 20 % et 52 %) peuvent traduire les effets relativement **novateurs** et récents de certaines pratiques comme le paillage organique. Ces taux de pénétration intermédiaires montrent aussi des pressions de **conflits d'usage** pour répondre à la **raréfaction de ressources naturelles** (paillage organique) face à une demande croissante. En effet, une partie de la matière végétale collectée en Martinique est dédiée à la filière de production d'énergie, au détriment de la filière agricole (Navarrete, Casagrande, Angeon, Bouvier-d'Yvoire, *et al.*, 2024).

Enfin, les taux de pénétration faibles (entre 6 % et 19 %), illustrent 1) des enjeux de **rareté et d'accès** à des ressources naturelles (fumier et purin), 2) une mise à disposition récente de techniques agro-écologiques (litière bio-fermentées ou paillage plastique), ou 3) des **contraintes réglementaires** (Autorisations de Mises en Marché pour le biocontrôle).

4.4. Les avantages et inconvénients des pratiques testées

La démarche du projet a consisté à répondre aux besoins des agriculteurs de réduire la pénibilité du travail sous sa forme physique mais aussi observationnelle (Penelope, 2022 ; Grange, Laine et Simon, 2024).

Tableau 1 : Complémentarité des pratiques préventives dans la gestion des bio-agresseurs (S. Simon)

Bioagresseur Ciblé	Filet anti-Insectes	Plantes de service	BT	Purins végétaux	Palissage	Paillage Papier	BRF	Toile tissée	Solarisation
Pucerons	X	-	-	+	-	+	+	-	-
Aleurodes	-	Basilic		+	-	+	-	+	-
Chenilles	+	-	+	-	-	-	-	-	-
Maladies fongiques	-	-	-	-	+	Réduction des pourritures des récoltes			
Adventices	-	-	-	-	-	+	+	+	+

Au sein du volet agronomique l'accent a été mis sur les pratiques préventives (Grange, Laine et Simon, 2024) : L'analyse des cas étudiés confirme la primauté des leviers préventifs dans la gestion



agronomique des bio-agresseurs, les interventions curatives n'ayant de pertinence qu'en soutien ciblé (rattrapage). **Les paillages**, qu'ils soient d'origine organique (paillis, BRF), industrielle (films, toiles) ou issus de sous-produits (papier, carton), **abaissent la pression d'enherbement, déplacent l'effort vers des opérations ponctuelles limitées aux trous de plantation et réduisent la pénibilité des désherbages curatifs**.

La solarisation assainit le sol et diminue la banque de graines, mais son effet est transitoire sans relais préventif immédiat (paillage) ou, à défaut, curatif léger (désherbage manuel), rendu plus aisé par la réduction initiale de pression.

Les filets anti-insectes protègent efficacement des ravageurs de grande taille, au prix d'un compromis entre finesse de maille et microclimat, et d'un risque de détection tardive des pullulations de ravageurs secondaires (pucerons), ce qui exige une **surveillance renforcée**.

Les aménagements fonctionnels en bordure (plantes de service) ont favorisé les auxiliaires, tandis que les associations de cultures n'ont pas montré d'effet significatif dans ce contexte.

Côté curatif, les lâchers de chrysopes n'ont pas contrôlé les pucerons sous filet, illustrant les limites d'approches isolées. Les préparations naturelles locales (extraits de *Glyricidia sepium*) se sont révélées actives contre aleurodes et chenilles, mais leur valeur opérationnelle est contrainte par la **logistique** (préparation, faible durée de conservation, fréquence d'application, main-d'œuvre).

La prévention structure la protection du système, tandis que le curatif, parcimonieux et ciblé, agit en soutien. La stratégie articule abaissement préalable de la pression, combinaisons séquentielles des barrières, surveillance précoce et interventions curatives parcimonieuses fondées sur la faisabilité et les coûts. Durant les cycles successifs, les pratiques préventives ayant permis de fortement réduire la pression globale des bio-agresseurs, les interventions curatives avec des substances naturelles ont été peu fréquentes.

4.5. Les principaux facteurs d'adoption de pratiques agro-écologiques

Le modèle d'équations simultanées estimé par la méthode des triples moindres carrés (3SLS) analyse les interdépendances entre revenu agricole et adoption de pratiques agro-écologiques (Luis, Aubert et Parrot, 2024).

Les résultats confirment une relation bidirectionnelle significative : les pratiques agro-écologiques augmentent le revenu, tandis qu'un revenu plus élevé réduit paradoxalement leur adoption. Ce résultat suggère que **les exploitants disposant de revenus plus importants peuvent privilégier des modèles plus productivistes, alors que les plus modestes adoptent davantage les pratiques agro-écologiques, peut-être comme stratégie d'adaptation**.

Les variables collectives influencent fortement les deux dimensions. L'absence d'organisation collective ou l'appartenance à des structures informelles est associée à une baisse significative du revenu et de l'adoption de pratiques agro-écologiques, ce qui souligne **le rôle central des réseaux formels** dans leur diffusion et leur valorisation commerciale. La surface agricole totale accroît à la fois le revenu et l'adoption, ce qui confirme que **la disponibilité foncière soutient la capacité d'expérimentation et d'investissement**.

Les variables sociodémographiques montrent **un effet d'âge positif modéré sur le revenu**, suggérant que l'expérience améliore la performance économique, tandis que **l'éducation agricole stimule significativement l'adoption**. **L'emploi de main-d'œuvre accroît le revenu, mais son effet sur les pratiques reste non significatif**. Enfin, la **diversification (nombre de cultures) influence négativement le revenu mais positivement l'engagement futur dans la certification, signalant peut-être un effet d'anticipation à la transition écologique, voire au changement climatique**.



Ces résultats soulignent un double verrouillage économique et institutionnel : l'adoption de pratiques agro-écologiques dépend non seulement des ressources productives mais aussi de l'intégration dans des réseaux formels et de la reconnaissance institutionnelle, des conditions essentielles pour concilier durabilité et viabilité économique.

Ces constats sont à modérer lorsque l'échelle d'analyse dépasse celui de l'exploitation agricole. **L'analyse des organisations de producteurs montre que celles-ci rencontrent des difficultés à pérenniser leurs modèles de gestion** (Parrot et Varenne, 2023b ; Parrot et Joltreau, 2024). Ainsi, si l'adhésion d'un producteur à une organisation de producteurs favorise l'adoption de pratiques agro-écologiques, cela n'est naturellement valable que tant que l'organisation de producteurs est en activité.

5. Discussion et fronts de recherche

Sous l'angle agronomique, les combinaisons de pratiques préventives et curatives consistent en priorité à abaisser la pression initiale de bio-agresseurs par des approches préventives combinées et séquentielles : des barrières physiques du sol (paillages adaptés), un assainissement préalable (solarisation suivie d'un paillage), des barrières aériennes (filets avec compromis maille-microclimat) et des aménagements fonctionnels (plantes de service) pour soutenir les auxiliaires. La prévention requiert une surveillance rapprochée afin d'éviter les retards de détection. Les interventions curatives doivent rester ciblées et parcimonieuses avec du désherbage ponctuel, du biocontrôle et des biopesticides à l'efficacité conditionnée par le contexte et des contraintes opérationnelles. L'ensemble s'inscrit dans une gestion adaptative intégrant coûts, ergonomie et faisabilité. **La complémentarité préventif / curatif** implique une gestion fine, des ajustements permanents et une intensification du travail. La démarche agro-écologique repose ainsi sur une combinaison raisonnée de leviers préventifs et curatifs, acceptant une part de risque, une complexité accrue et une forte mobilisation de main-d'œuvre. Enfin, et c'est propre aux économies insulaires, les filières de fournitures et de services après-vente restent fragiles, sans alternatives immédiates en cas de défaillance d'un fournisseur.

Les politiques agricoles doivent traiter l'agroécologie comme un investissement collectif. Il est nécessaire de renforcer la **formation technique** (par exemple via les réseaux DEPHY et les Chambres d'agriculture) et de soutenir la **diversification des cultures** par des aides à la rotation et à l'agroforesterie. Les **organisations de producteurs** doivent être consolidées pour mutualiser les coûts des innovations comme le **paillage organique** ou les **filets anti-insectes**, identifiés comme efficaces contre l'enherbement et les ravageurs. Des **incitations économiques stables**, telles que des **MAEC revalorisées** ou des paiements pour services écosystémiques, encourageraient les investissements dans ces pratiques préventives. Parallèlement, la **certification « sans pesticides »** et la **vente locale encadrée** peuvent être soutenues par une planification territoriale agroécologique intégrant la grande distribution. Enfin, la **transparence de l'information** et la création de **coalitions territoriales multi-parties prenantes** (organisations de producteurs, collectivités, consommateurs) sont essentielles pour renforcer la confiance et stabiliser la transition vers des systèmes agricoles moins dépendants des PPPs.

Mais plus largement, l'adoption d'innovations préventives s'inscrit dans des filières et des territoires dont il convient de comprendre les logiques de fonctionnement. Ces logiques peuvent parfois entrer en contradictions les unes par rapport aux autres (Varenne et Parrot, 2021). **L'accès à l'information de façon transparente, contribue à consolider la confiance entre des parties prenantes. Or, cela entre parfois en contradiction avec les règles de la compétitivité. Comment favoriser des alliances pour investir collectivement ?**



5.1. Elargir les déterminants de l'adoption à des échelles globales

Les innovations préventives et les innovations curatives s'inscrivent dans un jeu d'équilibre multi-échelle et dynamique qui influence l'usage des PPPs (Geels, 2004 ; Geels et Kemp, 2007). **L'adoption d'une innovation en un instant t ne préjuge pas du maintien de l'adoption à moyen et long terme** (Rogers, 2003). L'adoption à long terme dépend naturellement des règles de décision de l'adoptant, mais elle dépend également de facteurs exogènes (Douthwaite, Keatinge et Park, 2001 ; Sumberg, 2005). Par exemple, si l'adhésion des agriculteurs à des organisations de producteurs est associée à la mise en place de pratiques agro-écologiques préventives (Luis, Aubert et Parrot, 2024), la pérennité économique de ces organisations de producteurs est fragile (Parrot et Joltreau, 2024). Cette observation est similaire pour les filières d'approvisionnement du matériel et du service après-vente.

5.2. Les paradoxes des stratégies de diversification

Nos résultats dévoilent des stratégies de **diversification** productive, commerciale, collective, formelle et surtout informelle (Parrot et Varenne, 2023b). Or si la confiance exprime la volonté d'une partie d'être vulnérable aux actions d'une autre partie, les stratégies de diversification, destinées à réduire les vulnérabilités, peuvent par conséquent paradoxalement affaiblir la confiance. **En l'absence de contrats formels, les relations de confiance aux échelles individuelles et organisationnelles sont potentiellement fragilisées.** L'absence de confiance institutionnalisée (faible contractualisation, manque de certification) limite la capacité des filières à promouvoir des labels de qualité ou à obtenir un soutien public ciblé. Ce déficit organisationnel freine donc l'émergence d'alternatives structurées aux pesticides de synthèse. Comment arbitrer entre diversification et spécialisation ? Comment envisager la gestion des risques en fonction des stratégies de diversifications productives, commerciales et organisationnelles ? La diversification est-elle cohérente avec une démarche collective ?

5.3. La transparence de l'information : composante de la confiance et de l'investissement

La capacité à fédérer des parties prenantes place au centre la question de l'évaluation. L'évaluation ne peut être appréhendée uniquement comme un outil technique de mesure. Elle constitue avant tout un acte relationnel, structurant les rapports collaboratifs entre producteurs, institutions et consommateurs dans un contexte compétitif. Nous mettons en avant trois principes : 1) le **principe de transparence de l'information utile et pertinente** dans les relations entre parties prenantes (Carter et Rogers, 2008) et 2) **la reconnaissance de la maîtrise technique et des statuts socio-professionnels, qui visent à rendre visibles les parties prenantes et les pratiques marginalisées, tels que les petits maraîchers ou les circuits informels, souvent porteurs de niches d'innovations agro-écologiques non intégrées dans les dispositifs institutionnels.** Ces éléments ont des effets directs sur les stratégies de réduction des PPPs. En renforçant les coalitions de parties prenantes, la transparence de l'information favorise la mise en commun de connaissances, la légitimation de pratiques alternatives et la diffusion de normes collectives permettant de substituer progressivement les PPPs. **Or, la transparence de l'information entre parties prenantes est souvent incompatible dans des systèmes concurrentiels.** En l'absence de véritables alliances et de dispositifs de certification partagés, comment résoudre des situations d'ambivalence et de conflits (Parrot et Varenne, 2023a) ? Comment établir des relations de confiance entre parties prenantes ?

5.4. La confiance comme outil de cohésion collective

Comme indiqué en introduction, il existe un climat de défiance entre agriculteurs et consommateurs-citoyens, exacerbé par le scandale du chlordécone aux Antilles. Le projet ECOPHYTO PUMAT a abordé les questions de **confiance**, en articulant à la réduction de la dépendance aux PPPs, les notions de confiance, de vulnérabilité et de résilience (Parrot et Varenne, 2023b). Ces questions se retrouvent dans les travaux des systèmes sociotechniques, mais plutôt comme des facteurs exogènes



permettant de renforcer la cohésion institutionnelle (Geels et Kemp, 2007 ; Duru, Therond et Fares, 2015).

Le projet explore des composantes du concept de confiance (Parrot et Varenne, 2023b ; Parrot et Joltreau, 2024). La question de la confiance se retrouve dans les stratégies de diversification qui visent à réduire les risques de mise en vulnérabilité économiques et environnementales. Les stratégies de diversification productives, commerciales, et collectives, peuvent fragiliser les relations de confiance nécessaires à la coopération collective. Comment favoriser les démarches participatives et collectives tout en respectant les règles de la concurrence ? Comment concilier développement durable, compétitivité des filières et réduction de la dépendance aux PPPs ? Comment favoriser la transparence d'une information utile et pertinente ?

5.5. Comment favoriser des alliances pour investir en faveur de la réduction de la dépendance aux PPPs ?

Les questions de confiance, de vulnérabilité et de résilience, posent celles de l'action collective et de la prise de décision en faveur de l'investissement. Le projet ECOPHYTO PUMAT a ouvert la boîte noire des modalités de coordinations (Navarrete, Casagrande, Angeon, Chave, *et al.*, 2024), de coalitions (Ansaloni, 2013), et de concertations (Meynard, 2017) entre parties prenantes. L'analyse comparée des filières canne-sucre-rhum et en maraîchage en Martinique, éclaire **les conditions institutionnelles et relationnelles qui déterminent la réussite des collaborations dans les systèmes sociotechniques. Cette réussite s'appuie sur une alliance définie par un but commun et les 4 principes précédemment cités : le niveau de compréhension mutuel des logiques de fonctionnement des parties prenantes (quels sont les modèles de gestion des organisations ?), la transparence dans l'accès à une information utile et pertinente (Carter et Rogers, 2008), la proximité relationnelle, et la maîtrise technique des métiers respectifs.**

Cette grille d'analyse permet d'expliquer par exemple comment une coalition élitare stable canne-rhum, articulant parties prenantes économiques, politiques et bureaucratiques, permet de sécuriser des ressources, de structurer l'innovation et de négocier efficacement avec les instances nationales et européennes. Cela inclut la possibilité de capter des ressources pour répondre aux enjeux de la réduction de la dépendance aux PPPs. Une alliance durable autour d'objectifs partagés (emploi, rente d'exportation, productivisme) constitue un levier pour orienter les trajectoires technologiques.

Cette grille permet également d'expliquer pourquoi les tentatives récurrentes du maraîchage à se structurer en coalition se heurtent à l'absence de confiance, à un déficit de transparence de l'information, et par conséquent à une fragmentation organisationnelle (Parrot et Joltreau, 2024). Or, les stratégies d'efficacité, de substitution ou de reconception, face aux PPPs, nécessitent des investissements collectifs (recherche variétale, solutions agro-écologiques, logistique partagée) qui ne peuvent émerger sans alliances solides et sans reconnaissance mutuelle des statuts professionnels (maîtrises techniques et reconnaissance des populations marginales et des niches d'innovation). **Ainsi, l'apport de la théorie de l'alliance dépend de la capacité à fédérer les parties prenantes autour d'une intentionnalité commune et du respect de plusieurs conditionnalités à respecter pour une alliance durable.**

6. Conclusion

Le projet ECOPHYTO dispose d'une double portée générique : d'abord par celle de ses résultats directs pluridisciplinaires, mais aussi par les défis des économies insulaires face aux risques structurels et climatiques.

Le projet ECOPHYTO PUMAT a permis d'identifier les principaux facteurs d'adoption des innovations préventives à l'échelle productive, commerciale et collective de l'exploitation agricole. Il a également



permis de situer des facteurs d'adoption dans un contexte plus global, celui des chaînes de valeurs, des filières et des territoires, avec par exemple le cas des organisations de producteurs.

Un front de recherche s'ouvre pour croiser les taux de pénétration, les principaux facteurs d'adoption des innovations préventives avec des modèles de gestion agricoles différenciés. Les taux de pénétration des innovations, les facteurs explicatifs, sont-ils similaires entre les exploitations agricoles ? Faut-il cibler des investissements en fonction de trajectoires d'intensification agricoles différenciées (Tittonell, 2014). Les propositions techniques co-conçues avec les agriculteurs concernent plutôt les exploitations diversifiées. Comment adapter les techniques selon les types d'exploitations ? Quelles places et quelles attentes pour les agroéquipements, les outils d'aide à la décision, les réseaux sociaux à vocation professionnelle ?

Par sa dimension pluridisciplinaire et ses regards croisés, le projet renouvelle le regard sur le concept d'adoption. En effet, **une innovation préventive peut être considérée comme un investissement, c'est-à-dire une dépense destinée à produire une valeur à plus ou moins brève échéance**. Ce changement de regard introduit plusieurs conséquences pour la réduction de la dépendance aux PPPs. Il s'agit en premier lieu de s'intéresser au signal prix et donc aux **politiques de prix**. Cela consiste pour les agriculteurs à se voir augmenter par exemple significativement le prix de vente relatif. Il s'agit également de stabiliser à la hausse ce prix relatif. Un prix relatif élevé et stable dans le temps stabilise des investissements. En parallèle, des politiques de prix sont à prévoir pour favoriser des prix abordables pour le consommateur. Cela suppose donc des politiques de soutiens sur l'ensemble de la chaîne de valeur. **Une planification agro-écologique est-elle possible au sein des régimes sociotechniques ?**

La question de l'investissement considère l'agriculteur non plus comme un consommateur qui « consomme » une innovation, mais comme un entrepreneur qui « investit » dans une innovation. Le concept d'entrepreneur est alors pertinent à double titre. D'abord, cela implique de reconnaître que l'objectif d'une entreprise est le **profit**. Ce profit s'appuie sur la production de biens (alimentaires) et de services (écosystémiques). Ensuite, la notion d'entreprise renvoie à son échelle d'analyse pertinente, **la filière ou la chaîne de valeur**. Il s'agit par conséquent de distinguer les stratégies respectives des entreprises au sein des filières et au sein des territoires. Comment inciter, protéger et accompagner un entrepreneur dans une stratégie d'investissements dans un secteur stratégique comme celui de l'alimentation ? Comment accompagner un entrepreneur dans un contexte de transition, et donc d'incertitudes ? Comment accompagner, comment appréhender des parties prenantes dont les échelles d'analyses relèvent de la filière, du territoire ou du reste du monde ?

Des recherches futures pourraient s'intéresser aux mécanismes de construction de la **confiance**, articulant contractualisation et relations informelles, transparence et régimes concurrentiels. Les questions de l'évaluation, de la métrique, seront alors centrales pour favoriser les enjeux de confiance autour des innovations préventives et, par conséquent, pour favoriser des investissements productifs conformes aux politiques de réduction de la dépendance aux pesticides de synthèse. **Les politiques publiques doivent donc dépasser une approche strictement technico-économique et investir dans la consolidation des coalitions de parties prenantes, en intégrant les dimensions de confiance et de transparence.** La réduction de la dépendance aux pesticides de synthèse apparaît ainsi non seulement comme un enjeu sociotechnique mais comme l'émergence d'une réelle **agronomie politique**.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats de cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article, sous réserve du respect du RGPD auquel le projet PUMAT est soumis.



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

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

ORCIDs des auteurs

Laurent PARROT : <https://orcid.org/0000-0003-0688-4946> ;

Philippe BANCE : <https://orcid.org/0000-0003-1611-0346> ;

Angélique CHASSY : <https://orcid.org/0000-0001-9803-1291>

Contributions des auteurs et autrices

L. Parrot : portage du projet PUMAT, coordination de l'écriture de l'article.

L. Parrot, A. Chassy, P. Bance, S. Simon, O. Carême, H.-M. Nely, K. Toris, C. Haral, C. Marcellin : rédaction de sections du manuscrit ou relectures.

Tous les auteurs et autrices : participation à la construction du projet, des dispositifs, au recueil et / ou à l'analyse des données.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs et autrices 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 membres de la profession pour leur disponibilité ainsi que les étudiants. Ils remercient également les relecteurs pour leurs commentaires qui ont permis d'améliorer les premières versions du manuscrit.

Déclaration de soutien financier

Cette recherche a bénéficié de l'appui financier des Ministères des Outre-Mer, de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT), de la Santé et de la Prévention (MSP), de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MESR), avec que de l'Office Français de la Biodiversité, dans le cadre de l'APR « *Les approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques: Coupler le préventif et le curatif au sein des filières, des agriculteurs jusqu'aux consommateurs* », grâce aux crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Écophyto II+. Les enquêtes réalisées en parallèle en Guadeloupe ont bénéficié de l'appui financier du Ministère des Outre-Mer dans la cadre du projet Territoires Durables 1.

Références bibliographiques

AGRESTE (2015) *Enquête Pratiques culturales sur les légumes 2013 - Nombre de traitements phytosanitaires*. Direction de l'alimentation de l'agriculture et de la forêt de la Martinique, Service de l'information statistique économique et prospective, p. 25.

Ansaloni, M. (2013) « Coalitions et changement de politiques publiques : environnementalistes et politiques agricoles en Angleterre et en France », *Revue internationale de politique comparée*, 20(1), p. 47-72. Disponible sur: <https://doi.org/10.3917/ripc.201.0047>.



Brundtland, G.H. (1987) *Report of the World Commission on Environment and Development: « our Common Future »*. UN.

Carter, C.R. et Rogers, D.S. (2008) « A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory », *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), p. 360-387. Disponible sur : <https://doi.org/10.1108/09600030810882816>.

Chassy, A., Bance, P. et Nguyen-Huu, T.T. (2025) « Eating Locally and Eating Well: Why Not? Evidence of Demand for Locally Certified Pesticide-Free Tomatoes in Martinique », *The Journal of Developing Areas*, 59(3). Disponible sur : <https://dx.doi.org/10.1353/jda.2025.a965523>.

Colombet, Z. et al. (2020) « Caribbean nutrition transition: what can we learn from dietary patterns in the French West Indies? », *European Journal of Nutrition* [Preprint]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s00394-020-02317-x>.

DAAF (2019) *Stratégie Territoriale de la Martinique pour l'Agriculture*. Direction de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt, p. 9 pages.

Douthwaite, B., Keatinge, J.D.H. et Park, J.R. (2001) « Why promising technologies fail: the neglected role of user innovation during adoption », *Research Policy*, 30(5), p. 819-836. Disponible sur : [https://doi.org/10.1016/s0048-7333\(00\)00124-4](https://doi.org/10.1016/s0048-7333(00)00124-4).

Duru, M., Therond, O. et Fares, M. (2015) « Designing agroecological transitions; A review », *Agron. Sustain. Dev.*, 35(4), p. 1237-1257. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>.

Fanchone, A. et al. (2020) « A typology to understand the diversity of strategies of implementation of agroecological practices in the French West Indies », *European Journal of Agronomy*, 117, p. 126058. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126058>.

Fares, M., Magrini, M.B. et Triboulet, P. (2012) « Agroecological transition, innovation and lock-in effects: The impact of the organizational design of supply chains. The French Durum wheat supply chain case », *Cahiers Agricultures*, 21(1), p. 34-45. Disponible sur : <https://doi.org/10.1684/agr.2012.0539>.

Faure, C. (2021) *Analyse historique des politiques publiques en termes de régulation des produits phytosanitaires : Le cas spécifique de la Martinique*. Rapport de stage. Grenoble: Science Po Grenoble, UGA, Université Internationale de Rabat, p. 43 pages.

Foucher, K. (2002) « Principe de précaution et risque sanitaire: recherche sur l'encadrement juridique de l'incertitude scientifique ».

Geels, F.W. (2004) « From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory », *Research Policy*, 33(6-7), p. 897-920. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>.

Geels, F.W. et Kemp, R. (2007) « Dynamics in socio-technical systems: Typology of change processes and contrasting case studies », *Technology in Society*, 29(4), p. 441-455. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2007.08.009>.

Grange, J., Laine, E. et Simon, S. (2024) *Pratiques alternatives de gestion de l'enherbement dans les systèmes maraîchers de Martinique*. Martinique: CIRAD, p. 124 pages.

Journal Officiel de la République Française (2015) *Commission d'enrichissement de la langue française - Texte 75 sur 91*.

Lancaster, K.J. (1966) « A New Approach to Consumer Theory », *Journal of Political Economy*, 74(2), p. 132-157. Disponible sur : <https://doi.org/10.1086/259131>.

Luis, C. et Aubert, M. (2023) « Evaluating the impact of direct sales on farms' sustainability: a comparison of metropolitan and overseas France », *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies* [Preprint]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s41130-023-00195-5>.

Luis, C., Aubert, M. et Parrot, L. (2024) « Achieving healthy and profitable production through collective action? The case of vegetable farmers in the French West Indies », *Journal of Environmental Management*, 366, p. 121690. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121690>.



- Meynard, J.-M. (2017) « L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation », *OCL*, 24(3), p. D303.
- Morel, K. et al. (2020) « Innovating within or outside dominant food systems? Different challenges for contrasting crop diversification strategies in Europe », *PLoS ONE*, 15(3), p. 24 p. Disponible sur: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229910>.
- Navarrete, M., Casagrande, M., Angeon, V., Bouvier-d'Yvoire, C., et al. (2024) « Construire des innovations couplées à l'échelle des territoires pour soutenir la réduction de l'usage des produits phytosanitaires en production maraîchère », *Innovations Agronomiques*, 96, p. 40-57. Disponible sur: <https://doi.org/10.17180/ciaq-2024-vol96-art04>.
- Navarrete, M., Casagrande, M., Angeon, V., Chave, M., et al. (2024) « Des innovations couplées pour réduire l'utilisation de produits phytosanitaires en production maraîchère. Analyse transversale de 4 territoires en France métropolitaine et aux Antilles », *Innovations Agronomiques*, 97, p. 76-92. Disponible sur: <https://doi.org/10.17180/ciaq-2024-vol97-art08>.
- Parrot, L. et al. (2023) « Séminaire de restitution du projet PUMAT - Livret des posters ».
- Parrot, L. et Faure, C. (2022) « Understanding the process of pesticide regulations, a cognitive and behavioral perspective », in *IHC 2022. IHC 2022*, Angers, France, p. 8 pages.
- Parrot, L. et Faure, C. (2023) « Le droit et la loi comme ressources au service de la transition agroécologique : Le rôle des dérogations », in *Transitions écologiques ultra-marines au concret - Politiques publiques animations territoriales et pratiques sectorielles*. Presses universitaires des Antilles (Espace, territoires et sociétés), p. 29-42. Disponible sur : <https://www.cairn.info/les-transitions-ecologiques-ultra-marine-au-concret-9791095177562-page-29.htm>.
- Parrot, L. et Faure, C. (2024) « Le droit et la loi comme ressources au service de la transition agroécologique – Le rôle des dérogations ». *Université des Antilles, Séminaire de l'équipe « Biodiversité, environnements, sociétés, territoires » du LC2S, Jeudi 25 janvier 2024, Faculté de droit et d'économie de Martinique, Campus de Schoelcher*, Université des Antilles, Séminaire de l'équipe « Biodiversité, environnements, sociétés, territoires » du LC2S, Jeudi 25 janvier 2024, Faculté de droit et d'économie de Martinique, Campus de Schoelcher. Disponible sur : Copyright Cirad - source : <http://agritrop.cirad.fr/608024/>.
- Parrot, L. et Joltreau, T. (2024) « Tous les chemins mènent-ils au rhum ? Théorie de l'alliance et performance des coalitions d'acteurs dans les filières canne-maraîchage martiniquaises », *Économie rurale*, 389(3), p. 81-98.
- Parrot, L. et Varenne, M. (2023a) « Cognitive dissonance in value chains: the case of the vegetable sector in Martinique », in *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, p. 39-46. Disponible sur : <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1380.5>.
- Parrot, L. et Varenne, M. (2023b) « Confiance, vulnérabilité et résilience : le paradoxe des stratégies de diversification maraîchères en Martinique », *Mondes en Développement*, 204(4), p. 131-148. Disponible sur: <https://www.cairn.info/revue-mondes-en-developpement-2023-4-page-131.htm>.
- Penelope, F. (2022) *Etude comparative de méthodes agroécologiques dans le cadre de la réduction des intrants chimiques*. Mémoire. Université des Antilles.
- Porter, M.E. (1979) « How Competitive Forces Shape Strategy », *Harvard Business Review*, 57(2 (March–April 1979)), p. 137-145.
- Préfecture de Martinique (2025) *Note de suivi du plan Ecophyto II+ en Martinique – Année 2022*, p. 28, pages
- Rasse, C. et al. (2018) « Utilisation de pratiques agroécologiques et performances de la petite agriculture familiale : le cas de la Guadeloupe », *Cah. Agric.*, 27(5), p. 55002.
- Rogers, E. (2003) *Diffusion of Innovations*. 5th edition. New York: Free Press. Disponible sur: <http://books.google.fr/books?id=9U1K5LjUOWEC>.
- Simon, S. (2022) « Evaluation agronomique », in *Pour Un Maraîchage Attractif : le cas de la Tomate en Martinique (PUMAT), Session d'échanges du 21 septembre 2022 préparatoire à la rédaction du rapport à mi-parcours (31/10)*, p. 20-25.



- Smith, A. (2019) « Paradigme », in *Dictionnaire des politiques publiques*. Paris: Presses de Sciences Po (Références), p. 425-431. Disponible sur : <https://doi.org/10.3917/scpo.bouss.2019.01.0425>.
- Sumberg, J. (2005) « Constraints to the adoption of agricultural innovations: Is it time for a re-think? », *Outlook on Agriculture*, 34(1), p. 7-10. Disponible sur : <https://doi.org/10.5367/0000000053295141>.
- Tittonell, P. (2014) « Ecological intensification of agriculture—sustainable by nature », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, p. 53-61. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.08.006>.
- Varenne, M. et Parrot, L. (2021) « Conflits d'intérêt et structuration des filières : Étude commerciale de la filière maraîchage en Martinique, 8 pages », in *JRSS Edition 2021, 9 et 10 décembre 2021. 15èmes journées de recherche en sciences sociales INRAE, SFER, CIRAD, JRSS, Clermont-Ferrand*, p. 8.
- Venkatachalam, L. (2004) « The contingent valuation method: a review », *Environmental Impact Assessment Review*, 24(1), p. 89-124. Disponible sur : [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(03\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(03)00138-0).
- Venkatesh, V. et al. (2003) « User acceptance of information technology: Toward a unified view », *MIS Quarterly: Management Information Systems*, 27(3), p. 425-478.
- Wezel, A. et al. (2009) « Agroecology as a science, a movement and a practice. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, 29(4), p. 503-515. Disponible sur : <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>.
- Woignier, T. et al. (2019) « Physical limitation of pesticides (chlordecone) decontamination in volcanic soils: fractal approach and numerical simulation », *Environmental Science and Pollution Research* [Preprint]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05899-0>.
- Xu, C. et al. (2020) « Future of the human climate niche », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(21), p. 11350-11355. Disponible sur : <https://doi.org/10.1073/pnas.1910114117>.

Pour citer cet article : Laurent Parrot, Philippe Bance, Olivier Carême, Angélique Chassy, Cynthia Haral, et al.. Projet PUMAT -Pour Un Maraîchage Attractif en Martinique et en Guadeloupe : bilan et perspectives. *Innovations Agronomiques*, 2026, 110, pp.36-52. [10.17180/ciag-2026-vol110-art04](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-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.



SYNAPTIC : Créer une synergie entre les acteurs pour la protection territoriale intégrée des cultures de pommes de terre contre le mildiou

Denis GAUCHER¹, Pierre DEROO¹, Didier ANDRIVON², Romain MABON², Michèle GUIBERT², Benoît HOUILLIEZ³, Christine HACCART³, Karine LELEU⁴, Marie BERNARD⁴, Jérôme MUCHEMBLED⁵, Matthieu DESCAMPS⁵, Fanny BRECHIGNAC⁵

¹ ARVALIS, Service protection intégrée des cultures, Boigneville et Villers-Saint-Christophe, France

² INRAE, UMR IGEPP, Le Rheu, France

³ Chambre d'Agriculture du Nord-Pas de Calais, Service pomme de terre, Arras, France

⁴ FREDON Hauts-de-France, Loos-en-Gohelle, France

⁵ JUNIA, Lille, France

Correspondance : d.gaucher@arvalis.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art05>

Résumé

Ce projet a permis de démontrer, par la mobilisation des acteurs d'un territoire, que la combinaison des leviers de la protection intégrée contre le mildiou, en incluant la gestion préventive de l'inoculum primaire, permet des baisses significatives de l'IFT. De même, un dialogue a été engagé avec les acteurs locaux du territoire afin de mettre au point une méthodologie permettant de lever les freins au changement des pratiques, notamment le choix de variétés moins sensibles au mildiou, pour la prise en compte des principes de la protection intégrée en parcelles de production commerciale et en jardins amateurs.

Mots-clés : Mildiou de la pomme de terre, *Phytophthora infestans*, protection intégrée, gestion territoriale, inoculum primaire, science participative.

Abstract: SYNAPTIC: Creating synergy between stakeholders for integrated territorial protection of potato crops against late blight

This project has demonstrated, through the mobilization of local stakeholders in a territory, that combining integrated protection measures against late blight, including preventive management of primary inoculum, can significantly reduce the treatment frequency index (TFI). Similarly, a dialogue was initiated with local stakeholders in the region to develop a methodology for removing barriers to changing practices, particularly the choice of varieties less susceptible to late blight, considering the principles of integrated protection in commercial plots and amateur gardens.

Keywords: Potato late blight, *Phytophthora infestans*, integrated protection, territorial management, primary inoculum, participatory science.

1. Introduction

En combinant la gestion et une identification plus précise des sources d'inoculum primaire, ainsi que la mise en œuvre des leviers de la protection intégrée contre le mildiou de la pomme de terre, à l'échelle d'un territoire situé au cœur des Hauts-de-France, ce projet répond directement aux objectifs du plan Ecophyto II+ de limiter la dépendance aux produits phytopharmaceutiques, mais également leurs impacts et les risques pour les riverains et leur environnement. Il concourt à identifier et tenter de lever les verrous sociotechniques et économiques aux changements de pratiques et accompagner les



évolutions des pratiques et des filières. En soutenant la mise en œuvre de ces leviers à l'échelle d'un territoire et en contribuant à la dissémination d'initiatives du même type au niveau national par le biais du guide méthodologique, ce projet, mené entre janvier 2021 et décembre 2024, contribue également à l'accompagnement des agriculteurs vers l'agroécologie et une agriculture compétitive et durable.

L'objectif principal de ce projet était de démontrer, par la mobilisation des acteurs du territoire de la Métropole Européenne de Lille (MEL), que la combinaison des leviers de la protection intégrée contre le mildiou, en incluant la gestion préventive de l'inoculum primaire, permet des baisses significatives de l'IFT. L'équipe projet a mis en place une étude d'identification et d'impact des multiples sources d'inoculum primaire (pomme de terre et tomate) à l'échelle de ce territoire. Elle s'est appuyée également sur les travaux existants sur la combinaison des leviers de la protection intégrée pour stimuler l'adhésion des producteurs et favoriser les changements de pratiques, notamment par le biais d'un groupe de producteurs « pilotes » mettant en œuvre ces leviers. Le caractère périurbain du territoire d'étude a permis de fédérer les agriculteurs et les citoyens autour d'un projet de science participative contribuant à diminuer les sources d'inoculum primaire de mildiou au sein d'un territoire. De même, un dialogue a été engagé avec les acteurs locaux du territoire afin de mettre au point une méthodologie permettant de lever les freins au changement des pratiques, pour la prise en compte des principes de la protection intégrée, notamment le choix de variétés moins sensibles au mildiou, en parcelles et en jardins.

Afin de répondre à tous ces objectifs, le projet était structuré en 5 actions :

- piloter le projet ;
- identifier les sources d'inoculum primaire de mildiou de la pomme de terre à l'échelle d'un territoire et suivre le démarrage des épidémies. Améliorer la prise en compte de l'inoculum primaire dans l'OAD Mileos® pour diminuer les IFT ;
- identifier les pratiques à risques et freins au changement de pratiques. Dialoguer avec les acteurs du territoire sur l'adoption de pratiques vertueuses permettant une diminution sensible des sources d'inoculum primaire sur le territoire d'étude ;
- mettre en place un réseau de parcelles sur le territoire d'étude pour la mise en œuvre de la protection intégrée, en incluant la gestion territoriale de l'inoculum primaire ;
- communiquer autour du projet, de ses enjeux et valoriser ses résultats

2. Matériels et méthodes

SYNAPTIC était organisé autour de quatre actions techniques complémentaires (hors communication).

2.1. Piloter le projet et impliquer les parties prenantes du territoire et nationale

Un comité de pilotage réunissant les partenaires du projet a été mis en place et complété par un comité technique réunissant les agriculteurs impliqués, les partenaires professionnels, la MEL et les jardiniers amateurs associés à la réalisation du projet ainsi que des experts extérieurs pouvant apporter leur éclairage pour faciliter la réalisation des tâches et l'atteintes des objectifs généraux (industriels, interprofessions, syndicats agricoles...).

La zone d'étude à l'intérieur du territoire de la métropole de Lille a été affinée lors du premier comité de pilotage. Elle est donnée ci-dessous (figure 1).



Figure 1 : Zone d'étude du projet SYNAPTIC dans la métropole de Lille.

2.2. Identifier les sources d'inoculum primaire de mildiou de la pomme de terre à l'échelle d'un territoire et suivre le démarrage des épidémies. Améliorer la prise en compte de l'inoculum primaire dans l'OAD Mileos® pour réduire les IFT.

La cartographie et le prélèvement des échantillons dans les foyers de mildiou et sources d'inoculum ont été effectués par le service pomme de terre de la Chambre d'Agriculture du Nord-Pas de Calais.

Le repérage et le suivi des tas de déchets de pommes de terre et des écarts de triage non gérés (source d'inoculum primaire) a débuté à partir de début avril dans le secteur du nord de Lille. Des observations des tas de déchets non gérés repérés dans la zone de l'étude ont été réalisées tous les 15 jours environ jusqu'à l'arrivée du mildiou ou la gestion du tas (bâchage, destruction...).

Le repérage et suivi des sources de contamination situées dans l'environnement des 5 parcelles suivies dans le cadre de l'action 4 a démarré en mai à partir de la levée des pommes de terre. Les jardins de particuliers, les parcelles de pommes de terre ainsi que les repousses dans les autres cultures situées dans un rayon de 1 km des 5 parcelles ont fait l'objet d'un suivi tous les 15 jours à partir de la levée puis chaque semaine à compter de l'arrivée du mildiou (mi-juin).

Les producteurs cultivant dans la zone de l'étude ont été sollicités par l'intermédiaire du GEDA de Lille pour abonder au dispositif en signalant les symptômes de mildiou observés sur leur exploitation.

La cartographie des sources et foyers de mildiou a été réalisée à l'aide de Vigicultures®, site internet qui sert à la saisie et à l'exportation des observations réalisées dans le cadre du Bulletin de Santé du Végétal (BSV). Un réseau et des champs de saisie spécifiques ont été créés spécialement dans Vigicultures pour répondre aux besoins du projet Synaptic. Des cartes FTA® ont été distribuées aux jardiniers amateurs volontaires et faisant partie du périmètre étudié, pour qu'ils puissent, s'ils en avaient la possibilité, prélever du mildiou et renvoyer les cartes à INRAE. Les **cartes FTA** sont des **papiers filtres traités** spécialisés pour la **collecte, le stockage et l'isolement d'ADN génomique** à partir de divers échantillons biologiques, offrant une solution innovante et pratique pour les analyses de génotypage. Vigicultures® n'étant pas accessible aux particuliers, INRAE a réalisé une version mildiou Pomme de terre et tomate de son application de remontée des foyers. Cette application dénommée VigiMildiou est disponible gratuitement en téléchargement sur appareil mobile Apple ou Android.

La mesure de la sporée aérienne a été réalisée grâce à des pièges à spores Burkard utilisés en années 2 à 4 uniquement. L'année 1 a permis à INRAE de mettre au point les méthodes de quantification de

l'inoculum et les méthodes de prélèvement : choix de la technique PCRq (Sybr green, Lees & al., 2012), validation de la PCRq sur *P. infestans* (efficacité, répétabilité, reproductibilité sur 1 gamme de 0.00001 à 10ng d'ADN), bonne corrélation de la quantification entre 10 et 1000 sporanges, inhibition de la germination des sporanges dans les tubes pendant la semaine d'échantillonnage. Le génotypage des souches collectées a été effectué par INRAE conformément aux pratiques habituelles du réseau national d'épidémiologie du mildiou.

2.3. Identifier les freins au changement et les pratiques à risque, dialoguer avec les acteurs du territoire.

En effet, l'objectif était de rencontrer en face à face 30 acteurs sur le territoire de la MEL au printemps 2021, afin d'identifier les pratiques à risques pouvant favoriser le développement du mildiou (volet technique), et les freins au changement de pratiques et leurs attentes (volet sociologique). Les profils ciblés ont été les suivants : 15 agriculteurs producteurs de pommes de terre d'industrie et 15 jardiniers amateurs cultivant des pommes de terre. Les cartes ci-dessous illustrent la localisation des cibles enquêtées : les agriculteurs sur la carte de gauche et les jardiniers amateurs sur celle de droite (figure 2) :

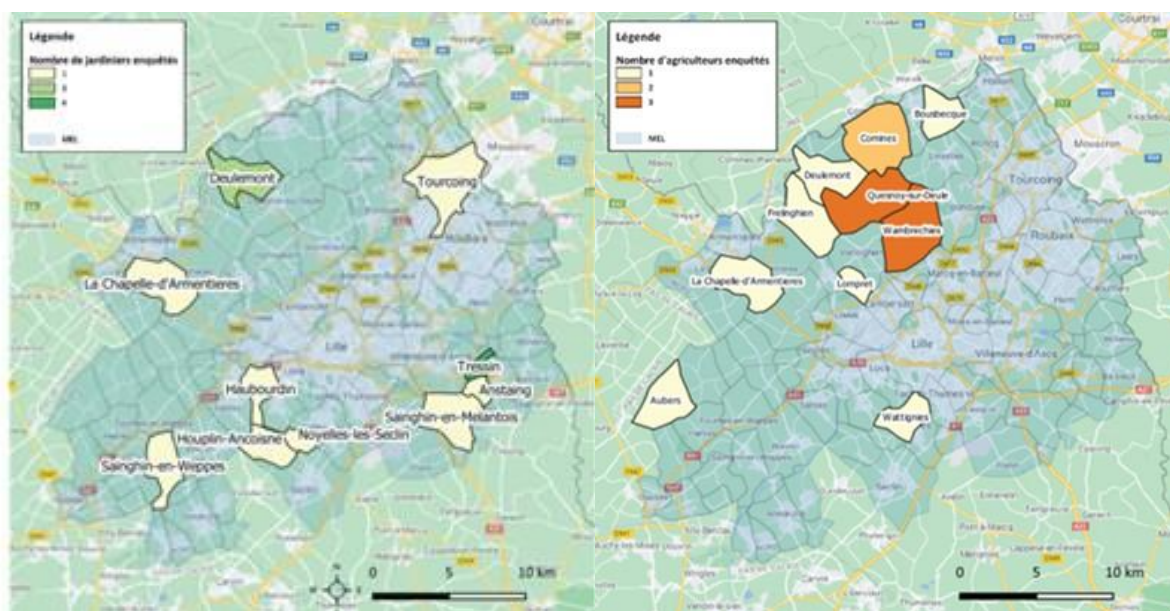


Figure 2 : Répartition des agriculteurs (gauche) et jardiniers enquêtés (droite) sur le territoire de la MEL.

La majorité des entretiens a été réalisée en face à face (en exploitations ou en jardins), ce qui a permis de maximiser les échanges et les interactions avec l'interlocuteur.

Deux questionnaires distincts et spécifiques à chaque profil ont ainsi été élaborés : un pour les agriculteurs et un autre pour les jardiniers. Ceux-ci ont été construits en se basant sur des recherches bibliographiques approfondies orientées d'une part sur les aspects techniques recensant les pratiques à risques favorisant la propagation de l'inoculum primaire du pathogène, et d'autre part sur les méthodologies sociologiques existantes en sciences sociales afin d'identifier les freins au changement de pratiques et leurs attentes.

Une recherche bibliographique a été réalisée sur la culture de patates douces. Un appel à retour d'expérience a été lancé dans le cadre du Bulletin de Santé du Végétal en cultures légumières de la région des Hauts-de-France. Des informations ont pu être collectées sur les conditions de cultures, les problèmes pouvant survenir en cours de culture ou lors de la conservation... Ces informations ont été



utiles lors de la réunion d'informations auprès des jardiniers amateurs et au moment de l'implantation des patates douces sur la vitrine variétale de Lomme. L'accent a été mis sur cette culture pour évaluer son adaptation aux conditions climatiques de la région. De nombreux contacts ont été pris pour constituer une liste de jardiniers amateurs sur le territoire de la MEL intéressés par le projet. Les mairies des 90 communes du territoire de la MEL ont été contactées par téléphone, ainsi que la plupart des associations de jardiniers amateurs. De nombreux mails ont également été envoyés et certaines mairies ont également accepté de communiquer à leurs administrés par courrier. Une communication sur le projet a été faite à deux reprises sur France bleu Nord par Marc Delrue dans son émission consacrée au jardinage le samedi matin entre le 3 avril et le 3 mai 2021. Finalement, 29 contacts se sont montrés intéressés par le projet. Ces derniers sont répartis sur les communes suivantes : Anstaing, Armentières, Baisieux, Bondues, Croix, Deûlémont, Erquinghem-Lys, Faches-Thumesnil, Hallennes-lez-Haubourdin, Haubourdin, La-Bassée, La-Chapelle d'Armentières, La-Madeleine, Lambersart, Leers, Lesquin, Loos, Marquette-lez-Lille, Marquillies, Mouvaux, Prêmesques, Ronchin, Wattignies, Wattrelos, Wavrin, Wervicq et Willems. Le 3 mai, FREDON Hauts-de-France a organisé une réunion de présentation du projet SYNAPTIC aux jardiniers amateurs en visioconférence. Une réunion similaire a également été organisée le 5 mai par la Chambre d'Agriculture et JUNIA à destination des agriculteurs.

2.4. Mettre en place et animer un réseau de parcelles sur le territoire permettant la mise en œuvre des leviers de la protection intégrée incluant la gestion de l'inoculum primaire, faire évoluer les pratiques des jardiniers amateurs.

Le suivi a concerné cinq parcelles de pommes de terre implantées sur cinq exploitations différentes situées dans le secteur du nord de Lille. Les critères de sélection des producteurs ont concerné leur degré d'adoption des 3 leviers de la protection intégrée donnés ci-dessous :

- résistance variétale au mildiou : cultiver si possible une variété de sensibilité intermédiaire ou résistante au mildiou (au moins 2 producteurs sur les 5) : Markies, Magnum, Allians, Franceline, Résy ;
- outil d'aide à la décision : utiliser ou souhaiter utiliser l'OAD Mileos® ;
- biocontrôle : être intéressé par le test de solutions de biocontrôle ou d'adjuvants permettant de diminuer l'IFT.

5 producteurs répondant aux critères établis se sont montrés intéressés par le projet et ont accepté d'intégrer une de leurs parcelles de pommes de terre dans l'étude :

- Les 5 parcelles ont fait l'objet d'un suivi, au minimum une fois par semaine entre la levée et le défanage. Les observations ont été réalisées par un conseiller de la Chambre d'Agriculture du Nord-Pas de Calais et / ou un stagiaire : observation du mildiou, stade phénologique, bioagresseurs, comptages, piégeages. A chaque passage sur la parcelle un compte rendu a été communiqué au producteur par SMS ou par le biais d'un échange téléphonique ;
- Des prélèvements de souches de mildiou ont été réalisés dans les parcelles et leur environnement proche si des symptômes ont été relevés ;
- Les 5 producteurs participant au projet SYNAPTIC ont bénéficié d'un suivi dans la mise en place des leviers de la protection intégrée des cultures par le biais d'accompagnements collectifs et individuels et de la mise à dispositions d'outils de raisonnement de la protection mildiou :
 - réunion de lancement en début de campagne : présentation du projet, rappels mildiou, échanges sur les leviers de la PIC (agronomiques, génétiques, biocontrôle...), présentation des souches (évolution, caractéristiques et impact sur l'itinéraire



technique), intervention de la société De Sangosse (présentation de l'adjuvant Le 846 et du produit de biocontrôle Pygmalion) ;

- abonnement à Mileos® offert, formation en groupe et accompagnement individuel ;
- abonnement à Quali'Conseil, bulletin de préconisation édité par le service pommes de terre de la Chambre d'agriculture du Nord-Pas de Calais ;
- 4 tours de plaine durant la campagne dont 3 ont été ouverts aux producteurs adhérents au GEDA de Lille ;
- accompagnement individuel (point téléphonique, rendez-vous bout de champ) ;
- 15 litres de l'adjuvant Le 846 offert par la société De Sangosse. Cette offre a permis de lever le frein du surcoût à l'utilisation de cet adjuvant.

3. Résultats

3.1. Identifier les sources d'inoculum primaire de mildiou de la pomme de terre à l'échelle d'un territoire et suivre le démarrage des épidémies. Améliorer la prise en compte de l'inoculum primaire dans l'OAD Mileos® pour réduire les IFT.

Ce suivi a confirmé l'origine multiple de la maladie et l'intérêt d'une gestion collective de celle-ci par l'ensemble des acteurs du territoire afin de réduire sa propagation et d'optimiser sa gestion. Les sources d'inoculum primaire doivent être limitées par la gestion efficace des tas de déchets et d'écarts de triage. Puis, jardiniers et agriculteurs doivent œuvrer conjointement pour contenir la maladie et sa dissémination en activant l'ensemble des leviers de la production raisonnée qui sont à leur disposition. En effet, le mildiou étant une maladie explosive qui se propage facilement et rapidement, la négligence ou la méconnaissance d'un seul producteur ou jardinier peut mettre à mal les efforts réalisés par ses voisins. Le nombre de cartes FTA® réalisées a été variable en fonction de la pression mildiou de l'année et du nombre de cas observés dans la plaine. En 2022, année à pression mildiou historiquement faible, seules 4 souches ont pu être collectées sur le secteur de l'étude.

Les tas de déchets non gérés sont souvent cachés ou inaccessibles, donc difficiles à repérer. Les jardins de particuliers sont souvent défanés tôt (variétés précoces ou sensibles au mildiou, cultures de primeurs), ce qui limite la période de suivi et leur influence sur l'épidémie contrairement aux parcelles agricoles. Malgré une communication au cours de l'hiver et une relance en cours de campagne, les producteurs du GEDA de Lille sollicités pour la collecte de souches ont assez peu participé. Jusqu'en 2022, la connaissance des souches n'était pas toujours jugée essentielle par les producteurs. En effet, seule une lignée clonale parmi celles identifiées en France présentait une dérive d'efficacité à une matière active fongicide (fluazinam) dont il était possible de se passer sans trop de difficultés. Depuis 2023 et l'arrivée en France de lignées clonales potentiellement résistantes aux fongicides de la famille des CAA et moins sensibles à l'oxathiapiprolone (molécules très employées et parmi les plus efficaces du marché), on note un regain d'intérêt des producteurs pour une meilleure connaissance des souches présentes dans leur parcelle et dans l'environnement. En effet, en 2024, les prélèvements de souches de la part des producteurs ont été plus fréquents (pression forte et précoce de la maladie).

L'utilisation de l'outil d'analyse de la sporée aérienne sur les échantillons provenant de 6 pièges à spores opérés durant toute la période de culture de la pomme de terre en années 2, 3 et 4 révèle :

- des vols de spores discontinus durant la saison, hétérogènes selon les localités ;
- des vols dépendant fortement de la météorologie : les captures ont été nettement plus importantes en 2023 et 2024 (étés humides et frais, épidémie sévère) qu'en 2022 (été chaud et sec, épidémie faible) ;



- des concentrations aériennes toujours faibles, suggérant une dissémination du parasite surtout au sein des couverts intraparcellaires. Cette hypothèse a été confirmée en 2024, avec des captures plus nombreuses dans les parcelles que dans les bordures voisines (Figure 3) ;
- une assez bonne corrélation entre périodes de capture et symptômes observés quelques jours plus tard.

Ces résultats soulignent l'importance du positionnement des pièges, mais aussi le fait que la présence / absence de spores détectables semble un indicateur de risque plus important que le nombre de spores piégées. Nous affinons actuellement les méthodologies de piégeage (comparaison de plusieurs types de pièges) pour élargir les conclusions initiales. Le projet VOLDESPORES (ARVALIS / INRAE-IGEPP), financé par l'institut Carnot Plant2Pro, va permettre de poursuivre les travaux sur cette méthode d'évaluation des démarrages ou redémarrages d'épidémies de mildiou de la pomme de terre.

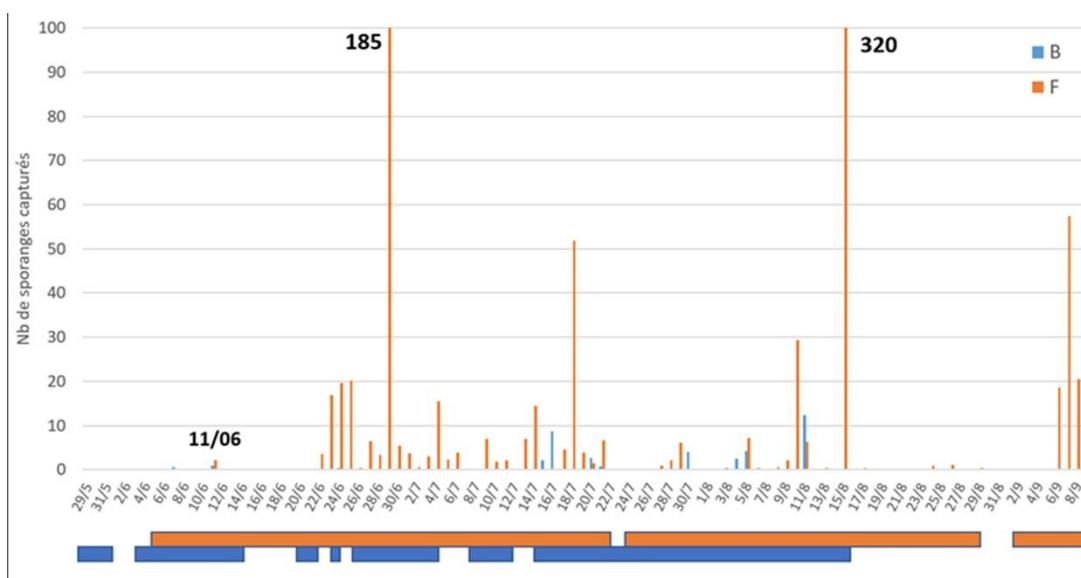


Figure 3 : Suivi des vols de sporanges en 2024 à Villers-Saint-Christophe (02) : piège B en bordure d'essai mildiou contre le vent, piège F dans une grande parcelle avec essai programme mildiou à côté.

Compte tenu de l'homogénéité très forte des populations de mildiou de la pomme de terre à la fois sur la zone d'étude et en France en général, la recherche d'origine de la contamination par le mildiou des parcelles suivies via le génotypage des souches n'a pas été possible. Toutefois, le dispositif d'épidémiosurveillance bénéficie désormais de développements déjà opérationnels ou en cours d'évaluation, initiés ou finalisés lors du projet :

- d'une part, la possibilité de relier très simplement observation du stade épidémique et collecte d'échantillons, grâce à l'application participative VigiMildiou, développée dans le cadre du projet SYNAPTIC. Cette application, téléchargeable gratuitement via les plateformes de téléchargement GooglePlay et AppStore (accès direct depuis la page dédiée du portail Ephytia : <https://ephytia.inra.fr/fr/P/176/VigiMildiou>), permet à tous les acteurs, professionnels ou particuliers, de renseigner en quelques secondes et depuis un smartphone ou une tablette la présence de mildiou. Ces observations sont évidemment l'occasion de prélever des échantillons, via les cartes FTA®, échantillons qui entrent alors dans le dispositif de surveillance annuelle. C'est donc un moyen pour chacun de contribuer directement à l'effort de suivi des populations de *P. infestans*, au bénéfice de tous !
- d'autre part, le développement de méthodes génétiques rapides pour suivre la résistance à plusieurs matières actives (notamment les CAA et l'oxathiapiproline) en routine dans les échantillons collectés. L'application de ces outils aux travaux d'épidémiosurveillance en France



devrait intervenir dès 2025, dans le cadre d'un nouveau projet ASAP financé via le programme PARSADA ;

- enfin, la mise au point, en cours de test, d'une méthode d'identification des lignées présentes localement à partir de spores collectées dans l'air via des pièges à spores. La mise au point de cette nouvelle technologie reste à finaliser, mais des premiers essais semblent prometteurs. A suivre donc !

La finalité de cette action consistait à améliorer la prise en compte de l'inoculum primaire dans le modèle Mileos®. Dans cette étude, il a été observé que les valeurs d'inoculum primaires réelles (cohérentes avec les observations dans les BSV) étaient majoritairement comprises entre 0,1 et 5, alors que la valeur forfaitaire actuelle dans Mileos® est de 10. Ainsi, baisser cette valeur à 5 paraît judicieux pour s'approcher au mieux des valeurs réelles d'inoculum primaire sans prise de risque supplémentaire. Cependant, appliquer une valeur plus faible d'inoculum primaire tout au long de la campagne peut entraîner l'absence de couverture fongicide lors de périodes à risque en cours de campagne (reprise d'épidémie) du fait d'une sous-estimation de celui-ci. L'ajustement de la valeur de l'inoculum primaire au cours de la campagne avec une valeur de redémarrage de l'épidémie permet d'ajuster la date du premier traitement sans compromettre la suite de la campagne. Parallèlement, la réalisation de calendriers de traitements a mis en évidence une réduction potentielle du nombre de traitements fongicides assez faible. En effet, avec un inoculum primaire de 5 puis de 10 en campagne, le nombre de traitement économisé n'est que de 0,7 et avec l'inoculum prédit par le modèle créé, il n'est que de 1 traitement. Le nombre de traitements économisé reste faible par rapport au nombre total de fongicides appliqués par an. Ajuster la date du premier traitement ne semble pas suffisant pour réduire significativement le nombre de traitements et répondre aux objectifs du plan Ecophyto II+. Ainsi, l'accompagnement, la formation des utilisateurs de Mileos®, l'accès au levier résistance variétale au mildiou et l'amélioration de sa prise en compte dans l'OAD sont les clés pour répondre aux objectifs fixés par le plan Ecophyto II+, plus que des améliorations de l'outil en lui-même qui permet déjà une économie moyenne non négligeable de 5 traitements par campagne.

3.2. Identifier les freins au changement et les pratiques à risque, dialoguer avec les acteurs du territoire.

L'analyse des résultats d'enquêtes a mis en évidence que des pratiques à risques sont présentes dans les deux populations (agriculteurs et jardiniers), mais sur des points différents qu'il convient de pondérer. En effet, le risque est assez bien maîtrisé par les agriculteurs, mais ceux-ci cultivent sur de très grandes surfaces, augmentant ainsi la probabilité de développement du mildiou, contrairement aux jardiniers qui eux cultivent sur de très petites surfaces certes, mais qui cumulent beaucoup de points critiques pouvant favoriser le développement du mildiou. Concernant les agriculteurs, les points critiques portent sur quelques leviers de la protection intégrée comme la gestion des tas de déchets, le labour après la récolte des pommes de terre, mais surtout l'utilisation de l'OAD et de variétés sensibles au mildiou du feuillage. Ce dernier point sera travaillé avec les enquêtes portant sur les acteurs de la filière, car il constitue le principal levier de la protection intégrée contre le mildiou en pomme de terre et suscite une forte attente de la part des agriculteurs interrogés. Il est donc très important d'intégrer directement les acteurs de la transformation industrielle dans la réflexion, afin de développer des innovations motivantes pour les producteurs et satisfaisant les besoins des acheteurs. De leur côté, les agriculteurs sont conscients de leurs impacts sur l'environnement à travers les IFT élevés en culture de pomme de terre, mais ils essayent de minimiser autant que possible cet impact grâce à leur professionnalisme, les conseils prodigués par différents organismes (Chambre d'agriculture, BSV...) et l'utilisation de l'outil Mileos®. L'agriculture est en effet une profession très encadrée concernant l'utilisation des produits phytosanitaires, et sensibilisée aux différents enjeux liés au mildiou, tandis que les jardiniers ne le sont pas autant. L'étude a montré que les jardins de ces derniers peuvent constituer une source d'inoculum primaire non négligeable, à tempérer car les surfaces concernées sont bien



inférieures à celles des agriculteurs. Tous les critères étudiés ont montré un risque pouvant favoriser le développement du mildiou : gestion des repousses, gestion des fanes, gestion des déchets, gestion de l'humidité, l'utilisation de variétés sensibles et même l'existence possible de plants autoproduits dans les jardins amateurs. Ces pratiques à risque sont notamment dues à un manque d'information et de connaissances générales à la fois sur les pratiques à risques, mais aussi sur la connaissance de l'agent pathogène lui-même. Il apparaît comme nécessaire de les sensibiliser en vulgarisant les bonnes pratiques et en y intégrant des données biologiques et épidémiologiques. Celles-ci doivent être diffusées par plusieurs canaux : FREDON, stages/formations, relais des associations, brochures/flyers... d'autant plus que les jardiniers sont en attente de conseils et sont prêts à s'améliorer si on leur en donne les moyens.

Dans le cadre du projet SYNAPTIC, la tenue de deux ateliers d'intelligence collective a favorisé l'émergence d'actions possibles afin de répondre à la complexité des défis liés à la protection intégrée des cultures, notamment dans la lutte et la gestion territorialisée du mildiou en pomme de terre. En croisant les savoirs scientifiques, les connaissances pratiques des agriculteurs et jardiniers et des autres acteurs de la filière pomme de terre, le projet a permis d'explorer des actions innovantes pour réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques afin de répondre aux attentes sociétales, tout en garantissant à la filière d'être durable et compétitive. La synergie entre les jardiniers amateurs et les producteurs de pommes de terre s'est poursuivie lors de l'atelier culinaire mené autour des variétés de pommes de terre et de patates douces (*cf infra*). Les échanges entre les différents types d'acteurs ont permis d'émettre des critiques constructives quant à la saveur gustative des variétés commercialisées comme résistantes ou peu sensibles au mildiou. Cet événement a également permis la compréhension mutuelle des enjeux de chacun des acteurs. Pourtant chaque acteur de la filière possédait à la base des intérêts particuliers, et c'était bien là tout l'intérêt d'utiliser cette méthode pour converger vers la mise en place d'actions partagées qui mènent à un intérêt commun ancré dans la durée. En groupe de 4 à 5, les participants ont ainsi défini un certain nombre de changements qu'ils souhaitent voir opérer sur le territoire à l'horizon 2035. On remarque que pour atteindre certains changements, les actions à mener sont en cascade, tandis que d'autres ont un impact direct sur le changement (Figure 4).

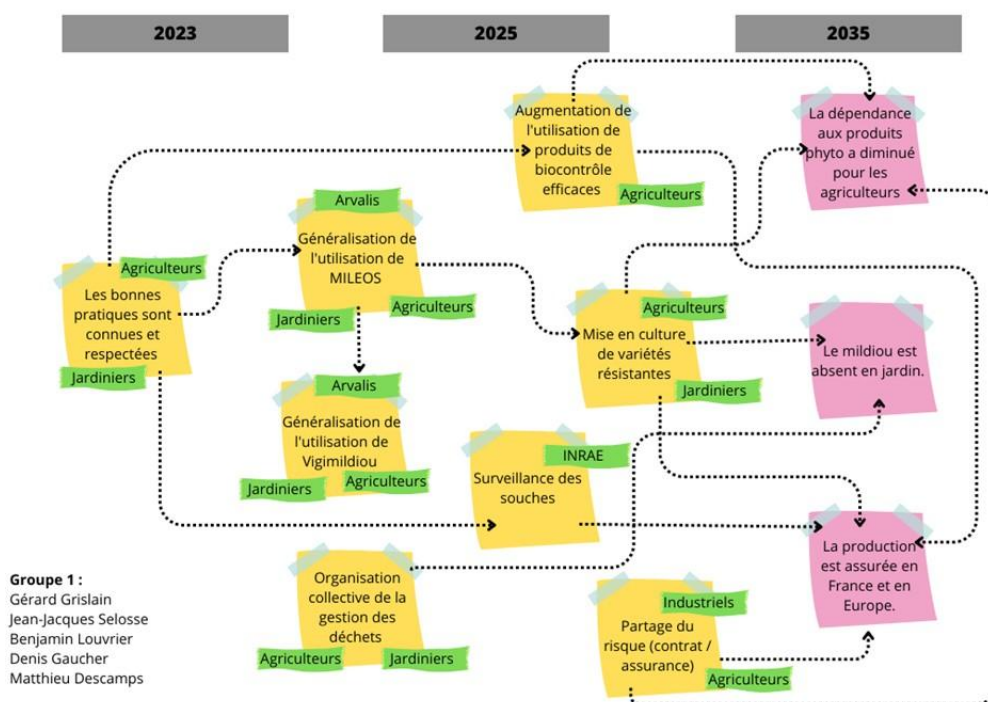


Figure 4 : Exemple de chemin du changement illustrant les actions dans le temps.



On peut répartir les changements visés en plusieurs thématiques :

- connaissance des bonnes pratiques au jardin et au champ ;
- réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires en culture de pomme de terre ;
- maintien de l'équilibre financier de la filière pomme de terre en Haut de France.

Les actions proposées quant à elles, peuvent se regrouper selon 3 typologies :

- généralisation des bonnes pratiques ;
- coordination entre les acteurs ;
- valorisation des résultats de la recherche.

La dernière étape de l'atelier était de formaliser les actions à mener de manière plus concrète : Qui sont les partenaires à associer à la mise en œuvre de l'action ? Quelles sont les sous-actions à réaliser ? Quel sera l'impact sur l'IFT ? Quel est le calendrier ? Quels sont les freins ?... Dans un premier temps, des fiches actions ont été rédigées pour les principales d'entre elles. L'objectif ici était de remettre les participants dans la « réalité » après avoir imaginé un scénario idéal, et de voir comment se mettre en action pour atteindre les objectifs fixés (Figure 5).

Nom de l'ACTION : Développer l'utilisation des produits de biocontrôle

Changement visé par l'action :

- ☒ Diminuer les IFT en production agricole
- ☒ Réduire le risque mildiou en production agricole
- ☒ Réduire le risque mildiou en jardins
- ☒ Faciliter la transition en production agricole
- ☒ Faciliter la transition en jardins
- ☐ Autre :

Partenaires :

- Firms phyto pharmaceutiques spécialisées en produits de biocontrôle
- Structure de conseil
- Structure d'expérimentation (Fredon, Arvalis, ...)
- Agriculteurs partenaires

Description : (décrire au mieux l'action : Pour répondre à quel(s) besoin(s) ? Comment la mettre en œuvre ?)

- Diminuer l'IFT contre le mildiou
- Répondre aux exigences environnementales, sociétales, économiques
- Limiter la nocivité des ppp sur les sols ...
- Inclusion d'un volet « utilisation du biocontrôle » à la PAC pour un dédommagement si jamais le produit n'est pas suffisamment efficace
- Il faut réussir à le mettre suffisamment à l'épreuve pour connaître le produit parfaitement pour savoir quand le positionner pour qu'il soit le + efficace possible
- Une fois le produit éprouvé, communiquer pour la commercialisation
- Rendre le produit accessible (coût de production)

Quel(s) impact(s) sur les IFT ? Sur le risque mildiou ?

Réduction des IFT

Réduction du risque mildiou

Points de vigilances pour la réussite de l'action :

- Est-ce qu'ils seront aussi efficaces contre le mildiou en cas de forte pression ?
- Est-ce que le coût ne sera pas trop élevé pour les producteurs ?

Temporalité :

Recherche : 5 ans

Mise sur le marché : 10 ans

Figure 5 : Exemple de fiche action rédigée pour accompagner le chemin du changement.

Enfin, concernant les enquêtes réalisées auprès des acteurs de la filière, elles montrent que les entreprises de commercialisation ou de transformation sont conscientes de la problématique mildiou, qui reste cependant sous la responsabilité principale du producteur. La gestion du risque mildiou n'est pas le critère principal pour les entreprises. Les cahiers des charges de type Global GAP ou même HVE ne sont pas contraignant pour accompagner les producteurs à la réduction des fongicides dans le cadre de la protection intégrée des cultures, concept agronomique peu mis en avant. La réduction de l'IFT fongicide peut être perçue comme une crainte de perte de compétitivité dans des contextes climatiques



et économiques parfois tendus. L'utilisation des fongicides semble incontournable, la plupart des variétés utilisées étant sensibles à assez sensibles au mildiou du feuillage quel que soit le type de valorisation (hormis pour les pommes de terre féculières qui sont moins sensibles). Des perspectives d'évolution positives sont cependant possibles avec notamment des attentes sur des variétés moins sensibles, une généralisation de l'emploi d'OAD et de produits de biocontrôle ainsi que sur l'efficacité de l'irrigation (cadre de la PIC). Il faut cependant rappeler qu'il est prévu un doublement des capacités françaises de transformation à l'horizon 2030 avec à terme une augmentation des surfaces de production de +30 000 à +40 000 ha. De gros projets industriels sont par exemple en développement en Hauts-de-France avec l'augmentation des capacités de production de McCain et la construction des usines Clarebout (port de Dunkerque), Ecofrost (Péronne, 2026), et Agristo (Escaudoeuvres, 2027).

3.3. Mettre en place et animer un réseau de parcelles sur le territoire permettant la mise en œuvre des leviers de la protection intégrée incluant la gestion de l'inoculum primaire, faire évoluer les pratiques des jardiniers amateurs.

Les leviers activés par les producteurs pour réduire l'IFT fongicide ont été les suivants :

- résistance variétale : 2 parcelles sur 5 ;
- OAD Mileos® : 5 parcelles sur 5. A noter que les 5 exploitants suivis avaient des niveaux de connaissance de Mileos® très différents au début du projet : un producteur expert (plus de 15 ans d'expérience), un producteur connaissant assez bien l'outil, trois producteurs débutants (2 ans d'expérience) ;
- adjuvant Le 846 permettant de réduire la dose du fongicide associé : 3 parcelles sur 5 ;
- utilisation du produit de biocontrôle PYGMALION (phosphonates de potassium) permettant de réduire la dose du fongicide associé : 4 parcelles sur 5 ;
- prophylaxie et gestion de l'inoculum primaire (gestion des tas de déchets et des repousses...) : 5 producteurs sur 5.

Dans ce réseau de parcelles, le levier « résistance variétale » n'a pas entraîné de réduction significative de l'IFT ; on note même un IFT supérieur certaines années. En effet, les variétés intermédiaires suivies étaient plus tardives, avec un cycle végétatif plus long, donc une période de protection plus longue. A contrario, les variétés sensibles suivies étaient des demi-tardives avec un cycle végétatif un peu plus court, elles échappaient donc à la pression mildiou de fin de cycle (tableau 1).

Tableau 1 : Nombre de traitements et IFT des 5 parcelles suivies (2021-2022-2023)

	Synaptic 2021		Synaptic 2022		Synaptic 2023	
	Pression mildiou forte		Pression mildiou faible		Pression mildiou moyenne	
Sensibilité variétale	Nombre de traitements	I.F.T.	Nombre de traitements	I.F.T.	Nombre de traitements	I.F.T.
Intermédiaire	17	21.22	6	6.05	11.5	14.3
Sensible	16	21.36	5	5.06	10	14.2
Moyenne	16.4	21.3	5.4	5.5	10.6	14.3



Chaque année, des simulations ont été réalisées pour comparer l'IFT moyen des producteurs du réseau Synaptic avec l'IFT d'un producteur du territoire qui intervient systématiquement contre le mildiou (sur une variété semi-tardive sensible) sans activer les leviers de la PIC et notamment le levier OAD.

Selon les années et la pression mildiou, une réduction moyenne de l'IFT de 12 à 70% a pu être obtenue sur les parcelles SYNAPTIC (tableau 2).

Tableau 2 : Réduction moyenne d'IFT réseau SYNAPTIC vs producteurs hors réseau

	2021 <i>mildiou Forte</i>	2022 <i>mildiou Faible</i>	2023 <i>mildiou Moyenne</i>
Gain IFT Synaptic / systématique	-12 %	-70 %	-35 %

Des simulations ont également été réalisées pour comparer l'IFT moyen des producteurs SYNAPTIC avec celui d'un producteur utilisant Mileos® localisé dans un secteur différent en 2023 (cas réel). Dans cette étude, nous avons constaté par exemple qu'à Hondschoote (secteur des Flandres), la pression mildiou a été plus importante qu'au nord de Lille. Le modèle Mileos® a déclenché plus souvent, ce qui a entraîné un IFT plus important que pour les producteurs SYNAPTIC. De plus, le producteur d'Hondschoote n'a pas bénéficié d'un accompagnement aussi pointu que ceux du réseau SYNAPTIC, ce qui a pu également impacter le nombre d'IFT.

Au fil des campagnes, une évolution positive dans la prise en compte des leviers de la protection intégrée a été observée :

- la maîtrise et la confiance en Mileos® s'est accrue au fil du temps. Cela a été permis par :
- une meilleure connaissance et une utilisation plus experte de l'OAD ;
- l'accompagnement collectif et individuel et l'observation régulière des parcelles qui ont généré un gain de confiance et plus de sérénité ;
- l'utilisation du biocontrôle a été adoptée par la majorité des producteurs (1 à 1.5 IFT biocontrôle en remplacement de la quantité d'IFT conventionnels ;
- l'intérêt pour les variétés moins sensibles s'est développé, même s'il n'a pas pu être concrétisé pour des raisons commerciales. En effet, les producteurs intéressés par un changement de variétés étant liés par un contrat pluriannuel avec leur acheteur ont été tenus de continuer à cultiver la variété inscrite au contrat, le changement de variété en cours de contrat ayant été refusé ;
- une prise de conscience s'est opérée autour de la prophylaxie et des gestes préventifs collectifs à mettre en œuvre pour limiter l'inoculum primaire.

Les jardiniers amateurs se tournant généralement vers des variétés de pommes de terre et de tomates sensibles au mildiou, les vitrines variétales mises en place dans le cadre de SYNAPTIC avaient pour objectif de leur faire découvrir des variétés peu sensibles voire résistantes à la maladie. Les patates douces, non concernées par le mildiou, étaient cultivées pour mettre en valeur l'alternative à la pomme de terre qu'elles représentent.

Au cours du projet, ces vitrines variétales ont permis de comparer (rendement, sensibilité au mildiou...) de nombreuses variétés de pommes de terre, tomates et patates douces cultivées ou non par les jardiniers amateurs, parmi lesquelles :

Pomme de terre : Charlotte, Cheyenne, Vitabella, Ditta, Alouette, Sarpo Mira, Tentation, Allians, Maiwen, Corne de gatte, Agria et Passion.



Tomate : Saint-Pierre, Honey Moon F1, Fandango F1, Maestria F1, Whippersnapper, Pyros F1, Supersteack, Magic Mountain F1, Crokini F1, Charnue de Huy, ACE 55, Ananas, Noire de Crimée, Reif Red et Green Zebra.

Patate douce : Beauregard, Murasaki 29, Okinawa, Bosbok, Bonita, Orléans et Purple dinguess.

Les variétés de pommes de terre cultivées en 2022 ont été soumises à des analyses gustatives afin de savoir si les variétés reconnues comme résistantes ou peu sensibles au mildiou présentaient une bonne qualité gustative. Parmi les quatre variétés, PASSION était la variété la plus appréciée en purée : elle est la plus aromatique, avec la meilleure consistance et le meilleur aspect visuel. Comme la plupart des autres variétés, son aspect visuel, son humidité et sa farinosité sont satisfaisants. MAÏWEN semble être la variété la plus adaptée à la cuisson à l'eau : son goût est le plus intense, elle se comporte plutôt bien à la cuisson, n'est pas trop farineuse ni trop humide.

D'après les analyses gustatives réalisées dans le cadre de ce programme, différentes variétés de tomate se démarquent. La variété SUPERSTACK produit les fruits les plus charnus à la chair fondante, juteuse, aromatique et peu acide ; sa couleur est attractive. Moins concernée par le mildiou que les autres variétés et plus acide, la variété GREEN ZEBRA se distingue par sa couleur verte ; ses fruits sont assez farineux mais charnus et fondants, faisant d'elle une variété gustativement intermédiaire parmi toutes les variétés testées.

Concernant les variétés de patate douce, des estimations de rendement et des analyses gustatives ont été réalisées. En raison des dégâts de rongeurs, la récolte 2022 a été peu fructueuse et aucune des quatre variétés ne s'est distinguée. En 2023, parmi les deux variétés étudiées, et fidèle à sa réputation, BEAUREGARD a présenté un rendement supérieur à la variété MURASAKI 29. Deux différentes manières de cuisiner les patates douces ont été analysées gustativement : en purée et en cube (à l'eau). Parmi les quatre variétés étudiées en 2022, OKINAWA a été la plus appréciée pour l'intensité de son goût, sa consistance, son aspect visuel et sa couleur.

Les vitrines variétales de Lomme et de Auchy-les-Mines ont été visitées à deux reprises : le 10/07/2023 et le 06/09/2023. Le programme SYNAPTIC a été présenté, et les producteurs de pommes de terre et les jardiniers amateurs ont pu découvrir les variétés les moins atteintes par le mildiou. Dix-huit personnes ont été sensibilisées au total. Ces vitrines variétales ont été complétées par un atelier culinaire tenu le 29 février 2024 à Comines afin de montrer que des variétés peu sensibles ou résistantes au mildiou sont gustativement aussi bonnes que les variétés classiques, souvent sensibles. Les variétés de pommes de terre et patates douces de la vitrine de 2023 ont ainsi pu être cuisinées et dégustées par des jardiniers amateurs, des producteurs de pommes de terre et des acteurs du monde agricole (14 participants). A cette occasion, une vidéo de présentation du programme et de l'atelier a été réalisée (<https://www.youtube.com/watch?v=N2YqfQlhnsq>) et un article a été rédigé par Terres & Territoires ([https://fredon.fr/hauts-de-france/sites/default/files/Article%20SYNAPTIC 2024 Terres%20et%20Territoires.pdf](https://fredon.fr/hauts-de-france/sites/default/files/Article%20SYNAPTIC%2024%20Terres%20et%20Territoires.pdf)).

4. Discussion et conclusion

4.1. De nouveaux développements opérationnels

SYNAPTIC a permis de développer de nouveaux outils, notamment l'application participative Vigimildiou et les méthodologies de piégeage et de caractérisation de la sporée aérienne, qui permettent de compléter la gamme de moyens de suivi des populations de *P. infestans* et des épidémies de mildiou. Les sorties de ces outils seront utiles pour enrichir le modèle Mileos® qui reste un levier fort pour réduire l'IFT fongicide. Si cet outil a fait ses preuves et s'est largement démocratisé ces dernières années, il n'est pas toujours pleinement utilisé par ses abonnés car parfois jugé comme



complexe (organisation du travail perturbée par la réactivité requise, gestion des événements climatiques extrêmes...) ou par manque de confiance de la part des agriculteurs.

4.2. La résistance variétale

Les variétés moins sensibles au mildiou ont montré un intérêt majeur car elles peuvent permettre de retarder l'arrivée des symptômes de mildiou en végétation et sont souvent touchées de façon plus modérée par la maladie. Malgré tout, l'utilisation du levier variétal montre encore actuellement quelques limites : i) Les variétés sont le plus souvent imposées par l'acheteur et sont très majoritairement sensibles. Le producteur n'a, très souvent, pas le choix de la variété ; ii) Les variétés résistantes actuelles ne présentent pas toutes les caractéristiques demandées par les acheteurs : productivité, goût, conservation, adéquation avec le process usine.... Il s'agit d'un des principaux freins à la diffusion des innovations variétales chez les producteurs qui sont pourtant demandeurs de variétés moins sensibles.

4.3. Le biocontrôle

Les produits de biocontrôle sont intéressants mais restent chers à l'achat. De plus, la réduction d'IFT qu'ils permettent est limitée par le nombre réduit de passages homologués (3 passages pour PYGMALION). Par conséquent, ils sont peu utilisés par les producteurs. Le surcoût d'utilisation du produit de biocontrôle PYGMALION peut être estimé à 40-50€ par ha (pour 3 applications), soit pour simplifier environ 1€ par tonne produite. Le développement de cette pratique ne pourra se faire à grande échelle que lorsque les parties prenantes de la filière intégreront cette charge dans les contrats en ne laissant pas le producteur absorber seul le surcoût.

4.4. L'accompagnement des producteurs, le partage du risque et de la charge mentale

L'accompagnement permet au producteur d'aller plus loin dans la réduction d'IFT par des apports techniques et des conseils stratégiques. Le conseiller peut accompagner le producteur et lui donner toutes les clés pour qu'il raisonne au mieux ses interventions mais c'est bien le producteur qui décide de la stratégie fongicide mise en place sur la parcelle. Il est clair qu'avec l'accompagnement renforcé, le partage du risque pris en réduisant les fongicides entre les parties prenantes de la filière est une condition presque obligatoire de son développement à grande échelle. En effet, le producteur ne devrait pas assumer seul les conséquences psychologiques (charge mentale) et financières en cas d'attaque de mildiou à grande échelle qui mettrait à mal sa production.

Les travaux réalisés ont permis de montrer que la combinaison des leviers de la protection intégrée contre le mildiou, déjà validée par de nombreux travaux d'expérimentation passés, est tout à fait opérationnelle chez les producteurs de pommes de terre. Ces derniers ont, par ailleurs, montré qu'ils étaient prêts à l'adopter sous réserve de lever certains freins qui sont, pour l'essentiel, entre les mains des autres acteurs de la filière. Des projets futurs (par exemple dans le cadre du PARSADA MILTALOC déposé à l'automne 2025) devront engager les actions sur le partage des risques, de la charge mentale et de l'éventuel surcoût liés à cette mise en place avec l'ensemble des acteurs de la filière.

Ethique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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



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

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

ORCIDs des auteurs

Pierre DEROO : <https://orcid.org/0009-0005-9091-3704> ;

Didier ANDRIVON : [0000-0002-0060-1231](https://orcid.org/0000-0002-0060-1231) ;

Romain MABON : <https://orcid.org/0000-0003-3126-2663> ;

Jérôme MUCHEMBLED : <https://orcid.org/0000-0001-9090-2697>

Contributions des auteurs

Denis Gaucher : co-rédaction du manuscrit ; administration du projet.

Pierre Deroo : co-rédaction du manuscrit.

Didier Andrivon, Romain Mabon, Michèle Guibert, Benoît Houilliez, Christine Haccart, Karine Leleu, Marie Bernard, Jérôme Muchembled, Matthieu Descamps, Fanny Brechignac : relecture et validation du manuscrit, partenaires 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

Le projet SYNAPTIC est issu d'un travail collectif transdisciplinaire et nous souhaitons remercier l'ensemble des participantes et participants au projet. En particulier, nous remercions l'ensemble des collaborateurs ayant contribué au projet, les stagiaires et l'ensemble des partenaires associés non financés, agriculteurs et conseillers ayant participé aux ateliers et aux enquêtes, pour leur contribution au projet.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a reçu le soutien financier de l'OFB par l'appel à projets 2019 « Les approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques » (Ecophyto Recherche et Innovation).

Références bibliographiques

Andrivon D. (1995). Biology, ecology and epidemiology of the potato late blight pathogen *Phytophthora infestans* in soil. *Phytopathology* 85, 1053-1056.

Brylinska M. & al. (2016). Potato cultivation system affects population structure of *Phytophthora infestans*. *Fungal Ecology* 20 (2016), 132-143

Cooke L.R. & al. (2011). Epidemiology and integrated control of potato late blight in Europe, *Potato Research* 54, 183-222.

Evenhuis B. et al. (2007). Monitoring primary sources of inoculum of *Phytophthora infestans* in The Netherlands 1999-2005. Proceedings of Tenth Workshop of an European Network for development of an Integrated Control Strategy of potato late blight, Bologna (Italy). PAV Special Report 12, 357-363.



Gaucher D. et al. (2025). Projet SYNAPTIC, créer une synergie entre les acteurs pour la protection territoriale intégrée des cultures de pommes de terre contre le mildiou. Rapport final du projet, 74p.

Pasco C. et al. (2016). And the nasty ones lose in the end: foliar pathogenicity trades off with asexual transmission in the Irish famine pathogen *Phytophthora infestans*. *New Phytologist* 209, 334–342.

Pottiez B. & al. (2017). Utilisation de leviers agronomiques et techniques dans 2 systèmes de cultures en vue de réduire de 50% l'utilisation des produits phytopharmaceutiques dans le nord de la France. Recueil de communications AFPP 6ème COMAPPI, Lille 21-23 mars 2017, 10 p.

Rakotonindrain T. (2012). Analyse et modélisation des effets des pratiques culturales sur les épidémies de mildiou de la pomme de terre. Adaptation du modèle SIPPOM (Simulator for Integrated Pathogen POpulation Management) au pathosystème. Thèse de doctorat INP Toulouse. 150p.

Runno-Paurson & al. (2010). The structure of *Phytophthora infestans* populations from organic and conventional crops. *Eur. J. Plant Pathol.*, 128 (2010), pp. 373-383

Vaudatin A. (2015) Mise en place du module Inoculum primaire de l'OAD Mileos® contre le mildiou de la pomme de terre, Mémoire de fin d'étude d'ingénieur VetAgroSup, Clermont-Ferrand, 50p.

Verjux N. (2017). Integrated Plant Protection in Potatoes: Review of the French situation, *Potato Research*, 60 (3-4), 307-318.

Pour citer cet article : Denis Gaucher, Pierre Deroo, Didier Andrivon, Romain Mabon, Michèle Guibert, et al.. SYNAPTIC : Créer une synergie entre les acteurs pour la protection territoriale intégrée des cultures de pommes de terre contre le mildiou. *Innovations Agronomiques*, 2026, 110, pp.53-68. [10.17180/ciag-2026-vol110-art05](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-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.



L'outil ODACE. Accompagner la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques en vergers de pommiers

Julie BORG¹; Isabelle GRECHI^{2,3}; Jean-Noël AUBERTOT⁴; Pascal BORIOLI⁵; Pierre FRANCK¹; Bertrand GAUFFRE¹; Hélène GAUTIER¹; Baptiste LABEYRIE⁶; Françoise LESCOURRET¹; Vincent MERCIER⁷; Frédéric NORMAND^{8,3}; Félix OURGAUD^{1,4}; Julien RUESCH⁹; Marie-Hélène ROBIN⁴; Antoine ROLLAND¹⁰; Pierre VALSESIA¹; Gilles VERCAMBRE¹; Mohamed-Mahmoud MEMAH¹

¹ INRAE, UR Plantes et Systèmes de culture Horticoles, 84914 Avignon, France.

² CIRAD, UPR HortSys, -34398 Montpellier, France.

³ HortSys, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

⁴ INRAE, UMR AGIR AGroécologie - Innovations – TeRritoires, 31326 Castanet Tolosan, France.

⁵ GRCETA de Basse Durance, 13210 Saint-Rémy-de-Provence, France.

⁶ CTIFL, 26800 Etoile-sur-Rhône, France.

⁷ INRAE, UE Recherches Intégrées Gotheron, 26320 Saint Marcel-lès-Valence, France.

⁸ CIRAD, UPR HortSys, 97455 Saint-Pierre, Réunion, France.

⁹ CTIFL site de Balandran 30127 Bellegarde, France.

¹⁰ Université Lyon 2, Laboratoire ERIC ER3083, 5 avenue Pierre Mendès France, 69676 Bron Cedex, France.

Correspondance : julie.borg@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art06>

Résumé

Réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (PPP) en agriculture est un défi majeur. Pour relever ce défi, les acteurs des filières ont besoin d'outils pour les accompagner dans la conception de stratégies de gestion des cultures moins dépendantes des PPP. L'outil ODACE, développé pour la filière pomicole, est une interface ergonomique et interactive qui propose à l'utilisateur différents scénarios alternatifs à ses pratiques actuelles, sélectionnés à partir d'une large palette de scénarios, en prenant en compte son contexte de production, ses préférences et/ou ses contraintes en termes de pratiques agricoles et de performances. Le fonctionnement de l'outil est d'abord décrit, qui explicite notamment les méthodes utilisées pour sélectionner les scénarios alternatifs, puis son utilisation est illustrée sur un cas d'étude.

Mots-clés : bioagresseurs multiples, pommier, stratégies de protection des bioagresseurs, évaluation multicritère, services écosystémiques

Abstract: ODACE: a tool to help reduce the use of plant protection products in orchards

Reducing the use of plant protection products (PPP) in agriculture is a major challenge. To meet this challenge, the stakeholders need tools to help them devise crop management strategies that are less dependent on PPP. The ODACE tool has been developed for the apple sector. An ergonomic, interactive interface suggests to users different alternative scenarios to their practices, selected from a large set of scenarios, considering their production context and their preferences and/or constraints in terms of farming practices and performances. The tool is described, explaining the methods used to



select alternative scenarios, and its use is illustrated through a case study. The ODACE tool is intended as a support tool to facilitate dialogue between stakeholders on the agro-ecological transition.

Keywords: apple, ecosystem services, multicriteria evaluation, multiple pests, orchards, sustainable pest management

1. Introduction

L'utilisation massive de produits phytopharmaceutiques (PPP) en agriculture est de plus en plus décriée en raison de ses conséquences néfastes sur l'environnement, la biodiversité, et la santé humaine (Inserm, 2021 ; Mamy *et al.*, 2022). Ceci concerne particulièrement l'arboriculture qui est très consommatrice de PPP (Agreste, 2021), poussée en partie par une exigence sociétale pour des fruits sans défauts. Dans ce contexte, il est urgent d'accompagner les acteurs de la filière dans une transition agroécologique, et notamment dans leur réflexion sur la mise en place de stratégies de réduction de l'usage des PPP. Ces stratégies nécessitent une maîtrise durable des bioagresseurs s'appuyant sur la combinaison de plusieurs pratiques alternatives, chacune ayant souvent une efficacité partielle (Ricci *et al.*, 2011). Ces pratiques peuvent être liées à la conception (e.g., choix variétal) ou à la conduite des vergers (e.g., pratiques culturales, introduction de biodiversité planifiée, utilisation de produits de biocontrôle, mise en place de barrières physiques, etc). La transition agroécologique implique par ailleurs de ne plus seulement considérer les performances agronomiques et économiques des agroécosystèmes, mais aussi leurs performances environnementales. En outre, les acteurs de la filière peuvent être confrontés à des contextes environnementaux différents, et avoir des préférences (ou des contraintes) contrastées vis-à-vis des pratiques mobilisées et des performances attendues. Pour la mise au point de stratégies de gestion des bioagresseurs moins dépendantes des PPP, il est donc nécessaire de soutenir les approches intégrées qui combinent de multiples pratiques alternatives, de multiples performances et de multiples contextes et profils d'acteurs.

La modélisation constitue une approche prometteuse pour accompagner les acteurs de la filière dans cette démarche. Les approches basées sur des modèles pour aider à la conception de systèmes de production intégrée ont suscité un intérêt croissant (Ould-Sidi et Lescourret, 2011). La modélisation permet d'explorer un grand nombre de scénarios et de cibler les scénarios prometteurs à tester *in situ*, ce qui permet de contourner la lenteur de l'expérimentation et de réduire son coût très élevé. Elle peut également aider à concevoir et évaluer des stratégies dans des situations hypothétiques futures, en lien par exemple avec le changement climatique. Par sa capacité d'intégration, la modélisation offre un cadre privilégié pour capitaliser et combiner des expertises (données qualitatives) et des observations de terrain (données quantitatives), parfois éparses et partielles. Plusieurs outils d'évaluation de la durabilité des agroécosystèmes ont été développés ces dernières décennies (Alaphilippe *et al.*, 2017). Ces outils mobilisent le plus souvent des arbres de décision permettant la combinaison d'informations, souvent à dire d'experts, sous forme de règles de décision simples. Ces outils ont fait preuve de leur utilité auprès des acteurs du monde agricole pour évaluer des stratégies innovantes, mais ne sont pas bien adaptés à la conception de nouvelles stratégies car il est difficile de les connecter à des algorithmes d'optimisation permettant d'explorer une gamme élargie de possibilités.

Dans le cadre du projet ODACE (Appel à projet « Durabilité des systèmes agricoles alternatifs », Ecophyto 2+, 2019), un outil a été spécifiquement développé pour accompagner les acteurs de la filière arboricole dans la mise en place de stratégies de réduction de l'usage des PPP. Cet outil, également dénommé ODACE, se veut facile d'utilisation et générique dans sa démarche et son champ d'utilisation. Sous la forme d'interfaces ergonomiques et interactives, il propose à l'utilisateur plusieurs scénarios de pratiques alternatives aux PPP, qui prennent en compte son contexte, ses propres objectifs et ses préférences. Les performances de ces scénarios alternatifs sont décrites par des indicateurs de services écosystémiques relatifs à la production de fruits, la régulation des bioagresseurs, la régulation du climat, la disponibilité de l'azote dans le sol, et le maintien et la régulation du cycle de l'eau. Pour



cela, l'outil mobilise des modèles hiérarchiques d'arbres de décision à dire d'experts, combinés à un modèle mécaniste de culture pour représenter les effets des pratiques agricoles et de facteurs environnementaux sur les bioagresseurs et les performances des vergers. Il utilise des méthodes d'optimisation ou de classification pour générer des scénarios alternatifs adaptés à chaque profil d'acteur. Le pommier a été choisi comme plante modèle pour déployer cette démarche.

Dans cet article, nous présentons d'abord l'outil ODACE et son fonctionnement, puis nous appliquons l'outil sur un cas d'étude pour illustrer la démarche de co-conception de stratégies de réduction de l'usage des PPP pour le pommier.

2. Méthodologie : description de l'outil

L'outil ODACE se présente comme une interface ergonomique et interactive développée avec le logiciel R (version 4.4.3; R Core Team, 2025) et la librairie 'shiny' (version 1.10; Chang *et al.*, 2024). L'interface R shiny est composée de cinq onglets principaux qui permettent à l'utilisateur d'interagir avec l'outil à travers la saisie d'informations ainsi que la recherche et la visualisation des scénarios proposés. Derrière ces interfaces, se cache le cœur de l'outil qui gère une large palette de scénarios générés et évalués par modélisation, parmi lesquels des scénarios alternatifs adaptés à chaque utilisateur sont sélectionnés. Tous ces éléments sont décrits ci-après.

2.1. Génération de scénarios par modélisation

2.1.1. Les modèles

L'outil ODACE s'appuie sur le couplage de deux catégories de modèles, des modèles IPSIM (Injury Profile SIMulator ; Aubertot et Robin, 2013) et le modèle de culture QualiTree (Lacroix *et al.*, 2024), pour prédire l'effet de pratiques agricoles et de facteurs environnementaux sur les performances des vergers. Les performances sont caractérisées par 15 indicateurs de services écosystémiques (Figure 1).

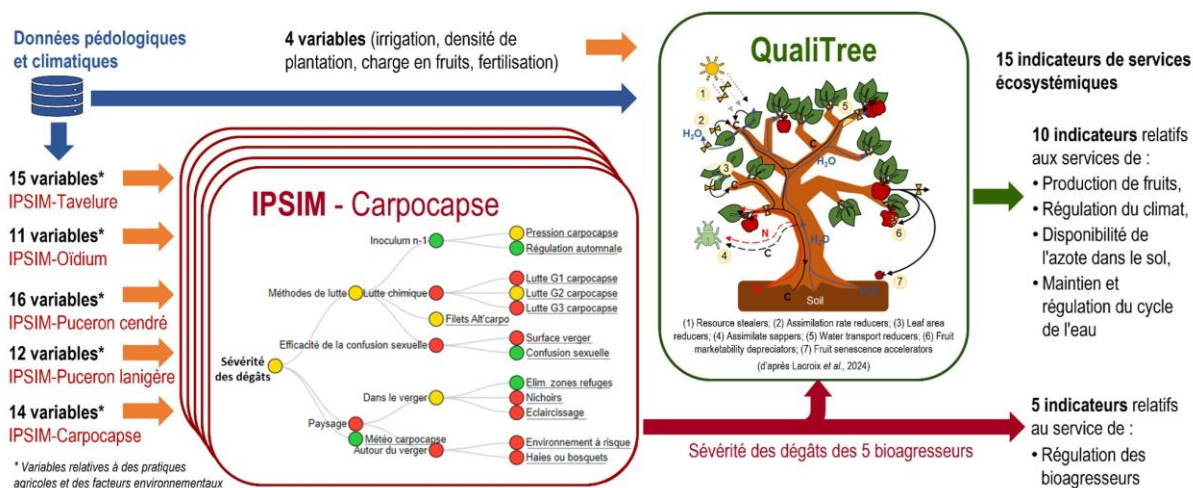


Figure 1 : Illustration du couplage des cinq modèles IPSIMs (un par bioagresseur) et du modèle QualiTree. Les 12 variables d'entrée (ou attributs) du modèle IPSIM-Carpocapse, donné en exemple, sont soulignées.

Les modèles IPSIM prédisent qualitativement, et de façon indépendante, la sévérité des dégâts de cinq bioagresseurs du pommier jugés les plus préoccupants (puceron cendré, puceron lanigère, carpocapse, oïdium, et tavelure), en fonction de pratiques agricoles et de facteurs environnementaux liés aux conditions climatiques, aux vergers voisins et à la pression des bioagresseurs l'année précédente.



Chaque modèle (un par bioagresseur) est défini par des attributs de base (variables d'entrée du modèle, correspondant aux pratiques et facteurs précités), ses attributs agrégés, ainsi que par la hiérarchisation et les tables d'agrégation des attributs. Les modèles ont été développés en s'appuyant sur la littérature et l'expertise de chercheurs et de professionnels de la filière, évalués en confrontant les données simulées aux données observées (issues des bases de données Ecofruit, provenant du projet ODACE, et Epiphyt) et améliorés itérativement.

Le modèle QualiTree est un modèle de culture (sol-arbre-atmosphère), actuellement calibré pour la variété Golden et le porte greffe M9, qui prédit quantitativement 10 indicateurs relatifs à la production de fruits, à la régulation du climat, à la disponibilité de l'azote dans le sol, et au maintien et à la régulation du cycle de l'eau, sous l'influence de pratiques culturales, des conditions pédologiques et climatiques et de la sévérité des dégâts des cinq bioagresseurs prédite par les modèles IPSIM. Il décrit de façon quantitative les processus liés au carbone, à l'azote et à l'eau dans l'arbre et dans le sol, ainsi que les altérations de l'état des organes ou de fonctions physiologiques de l'arbre par les bioagresseurs.

2.1.2. Les scénarios

Chaque scénario généré par modélisation est défini par une combinaison unique de variables correspondant aux pratiques agricoles et aux facteurs environnementaux considérés dans les modèles IPSIM et QualiTree, et il est associé aux 15 indicateurs de services écosystémiques simulés par ces modèles. Les simulations sont réalisées dans trois bassins de production de pommes (Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest), à partir des données pédologiques et climatiques moyennes qui y ont été relevées. Le nombre de combinaisons possibles entre les modalités de toutes les variables considérées (11 à 16 par modèle IPSIM et quatre pour QualiTree ; Figure 1), et non redondantes entre les modèles, amène à un nombre gigantesque de scénarios possibles (quelques milliers de milliards de scénarios) qu'il n'est pas envisageable de générer en raison de limites logicielles et matérielles.

Afin de réduire ce champ des possibles, plusieurs filtrages successifs ont été opérés. Ainsi, un premier filtrage a été opéré en fixant les variables les moins influentes vis-à-vis de la sévérité des dégâts des bioagresseurs prédite par les modèles IPSIM. Ces variables ont été identifiées par des méthodes de classification supervisée de forêts aléatoires (Breiman, 2001), et leurs valeurs ont été fixées à partir de données d'enquêtes réalisées auprès d'animateurs de groupes d'agriculteurs (réseau Ecophyto DEPHY Ferme) et de producteurs de pommes. Ensuite, un nouveau filtrage se fait en prenant en compte les informations renseignées par l'utilisateur : contexte de production, facteurs environnementaux, pratiques de conduite du verger immuables ou pratiques incompatibles avec son profil (cf. section 2.2). Enfin, un dernier filtrage se fait sur les seuils d'acceptabilité des critères de production (rendement commercialisable, teneur en sucres des fruits). Ces seuils ont été définis grâce aux mêmes enquêtes que mentionnées précédemment, ils peuvent varier entre les profils de production (cf. définition section 2.2). Il est à noter que malgré tous ces filtrages, le nombre théorique de scénarios possibles reste toujours colossal, et tous ces scénarios ne pourraient pas être stockés ni même générés intégralement (limites matérielles). Pour contourner cette difficulté, deux méthodes ont été développées (cf. section 2.3) pour sélectionner des scénarios alternatifs sans avoir à générer toute la palette de scénarios possibles.

2.2. Renseignement du contexte de production et du profil des utilisateurs

Les trois premiers onglets de l'interface sont des formulaires à renseigner par l'utilisateur (Figure 2).

L'onglet 1 permet de renseigner le contexte de production, qui comprend le bassin de production (auquel sont associées des conditions pédologiques et climatiques moyennes), les caractéristiques du verger (surface, densité de plantation, variété et porte-greffe - à noter que l'outil ne fonctionne actuellement que pour la variété Golden et le porte-greffe M9), la présence de vergers voisins non protégés, les conditions de l'année précédente (pression des bioagresseurs et climat automnal), et le



profil stratégique de production. Trois profils ont été définis : verger éco-responsable (production fruitière intégrée autorisant l'utilisation de PPP en dernier recours), agriculture biologique (AB) traditionnelle (correspondant au cahier des charges AB, autorisant l'utilisation de produits de biocontrôle) ou AB de rupture (aucun traitement). Ces profils ont été définis sur la base des enquêtes réalisées auprès d'acteurs de la filière (voir section 2.1.2). Les conditions de l'année précédente sont définies par défaut en fonction du bassin de production sélectionné, mais peuvent être modifiées par l'utilisateur.

Dans l'onglet 2, l'utilisateur renseigne ses préférences sur les pratiques de conduite du verger. Il a la possibilité de « fixer » certaines pratiques (indiqué par un cadenas rouge sur l'interface), c'est-à-dire qu'elles seront conservées en l'état dans les scénarios alternatifs proposés par l'outil, pour rendre compte de ses contraintes ou préférences fortes. Les pratiques spécifiques à la lutte chimique sont renseignées dans l'onglet 3. Elles sont contraintes en fonction du profil de production sélectionné : aucun traitement chimique n'est possible en AB de rupture, tandis qu'ils sont limités à des traitements avec des produits de biocontrôle en AB traditionnelle. Pour les types éco-responsable et AB traditionnelle, l'outil

présélectionne par défaut des pratiques sans aucun traitement chimique pour privilégier des scénarios alternatifs. L'utilisateur a toutefois la possibilité de modifier les pré-sélections faites par défaut.

Figure 2 : Illustration des trois premiers onglets de l'outil permettant à l'utilisateur de renseigner le contexte de production (onglet 1), et ses préférences et/ou contraintes sur les pratiques de conduite du verger utilisées (onglet 2, extrait), dont celles spécifiques à la lutte chimique (onglet 3, extrait).

The screenshot shows the ODACE tool interface with three main sections:

- Onglet 1: Contexte de production**
 - Sélectionnez votre région:** A map of France with regions highlighted in red (Bassin Ouest), green (Bassin Sud-Est), and blue (Bassin Sud-Ouest).
 - Décrivez vos pommiers:**
 - Varité cultivée: Chantecler, Gala, Golden, Granny Smith, Pink Lady.
 - Porte-greffe: M7, M9, NAKB.
 - Décrivez votre parcelle:**
 - Surface de la parcelle: Petite (< 2 ha), Moyenne (2-10 ha), Grande (> 10 ha).
 - Densité de plantation (arb./ha): 1500, 2000, 2250, 2500.
 - Type de culture: Eco-responsable, AB traditionnelle, AB rupture.
 - Vergers voisins non protégés: Oui, Non.
 - Décrivez l'année précédente:**
 - Pression tavelure: Forte, Moyenne, Faible.
 - Pression puc. cendré: Forte, Moyenne, Faible.
 - Pression carposcapse: Forte, Moyenne, Faible.
 - Pression oidium: Forte, Moyenne, Faible.
 - Pression post. tavelure: Forte, Moyenne, Faible.
 - Septembre: Chaud et sec, Pluvieux.
- Onglet 2: Vos pratiques agricoles**
 - Sélectionnez vos pratiques:**
 - Quantité d'eau: Abondante, Limitée.
 - Mode d'irrigation: Aspergion sur frondaison, Micro-jet, Goutte à goutte.
 - Fertilisation: Importante, Limitée.
 - Taille de l'arbre: Absente ou légère, Sévère.
 - Pulvérisation d'urée: Non, Oui.
 - Sélectionnez vos pratiques chimiques:**
 - Lutte pré-fl. puc. cendré: Aucun traitement, Traitement bio ou allégé, Traitement complet.
 - Lutte post-fl. puc. cendré: Aucun traitement, Traitement bio ou allégé, Traitement complet.
 - Fongicide curatif: Absent/inefficace, Efficace.
- Onglet 3: Lutte chimique** (partially visible)

2.3. Sélection de scénarios alternatifs selon deux méthodes : par exploration et par classes

Les quatrième et cinquième onglets de l'interface (Figures 3 et 4) permettent à l'utilisateur de rechercher des scénarios de pratiques alternatives aux PPP selon deux méthodes, **par exploration** et **par classes**, et de visualiser les résultats obtenus sous la forme de deux graphiques en radar. Le premier radar représente le scénario de référence (pratiques définies par l'utilisateur) et les scénarios alternatifs proposés par l'outil. Seules les pratiques qui divergent du scénario de référence y sont représentées. Le second radar représente les performances des scénarios (indicateurs de services écosystémiques, hormis ceux concernant la régulation des bioagresseurs). En compléments de ces graphiques, l'ensemble des pratiques et des indicateurs de performances, ainsi que les facteurs environnementaux considérés, sont rappelés sous forme de tableaux pour chaque scénario.

La recherche de scénarios alternatifs consiste à balayer l'ensemble des scénarios possibles et adaptés aux contraintes de l'utilisateur. Etant donné le très grand nombre de scénarios possibles, et



l'impossibilité logicielle et matérielle de tous les générer, la recherche exhaustive du meilleur scénario est donc illusoire.

La méthode par exploration utilise un algorithme d'optimisation combinatoire sous contraintes pour améliorer un indicateur de performance cible parmi quatre indicateurs clés (rendement commercialisable, teneur en sucre ou carbone séquestré - à maximiser, ou drainage - à minimiser), tout en limitant l'ajout de pratiques contraignantes d'un point de vue technique ou financier par rapport au scénario de référence. Cette stratégie se traduit par la recherche de scénarios alternatifs relativement proches du scénario de référence de l'utilisateur. Trois scénarios alternatifs vont être proposés par défaut, mais l'utilisateur peut en modifier le nombre. Comme le nombre de combinaisons à explorer est très important, chaque nouvelle recherche peut aboutir à des propositions de scénarios différents.

La méthode par classes nécessite un prétraitement utilisant un algorithme de classification non supervisé, permettant de regrouper les scénarios alternatifs en classes de performances, sur la base des quatre indicateurs clés (cf ci-dessus). Au sein de chaque classe identifiée, on sélectionne trois scénarios ayant les mêmes performances (représentatifs de la classe) mais présentant des pratiques contrastées : le moins de changements (proximité avec les pratiques actuelles), le recours à la biodiversité (pratiques s'appuyant sur la régulation naturelle), et le moins de pratiques contraignantes (peu d'investissement). L'intuition derrière cette méthode est de montrer à l'utilisateur que, pour des performances similaires, il est possible de mobiliser des combinaisons de pratiques contrastées et potentiellement plus vertueuses. L'utilisateur peut choisir la classe de performances à afficher et visualiser les trois scénarios associés.

3. Résultats : exemple d'application de l'outil sur un cas d'étude

3.1. Description du contexte de production

Le cas d'étude porte sur un producteur de pommes Golden dans le sud-est de la France, en production fruitière intégrée. Ce producteur souhaite réduire l'utilisation de PPP dans un verger de 10 ha, avec une densité de plantation de 2000 arbres/ha. Le puceron cendré et le carpocapse sont problématiques; ce producteur est également soumis à des pressions moyennes de tavelure et d'oïdium. Le verger est équipé de goutte-à-goutte, les quantités d'eau et de fertilisants apportées assurent un confort optimal des arbres. Les pommiers sont éclaircis et taillés de façon modérée. Ce verger est entouré de haies de cyprès, et l'inter-rang est enherbé et fauché régulièrement. Pour lutter contre le puceron cendré, le producteur utilise des PPP en préfloraison et en post-floraison. Il utilise la confusion sexuelle pour lutter contre le carpocapse, et des produits de biocontrôle en complément (*Bacillus thuringiensis* et carpovirusine), qui sont appliqués sur les trois générations du papillon. Contre l'oïdium, il réalise des traitements préventifs systématiques à base de soufre, qu'il peut aussi utiliser en curatif si la pression est trop forte. Pour lutter contre la tavelure, il réalise des traitements à base de PPP en prévision des infections (traitement préventif) et lorsque les dégâts sont visibles (traitement curatif). A l'automne, il réalise une pulvérisation d'urée pour accélérer la dégradation de la litière foliaire et réduire ainsi l'inoculum de tavelure.

Le producteur renseigne toutes ces informations dans l'outil et s'identifie comme un profil 'éco-responsable'. Il lance alors une recherche selon les deux méthodes proposées (par exploration et par classe). Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

3.2. Scénarios générés avec la méthode par exploration

Pour cette recherche, l'indicateur cible défini par l'utilisateur est le rendement commercialisable. Les trois scénarios alternatifs obtenus sont présentés en comparaison à celui de référence sur la Figure 3.



Concernant la gestion des pucerons, tous les scénarios alternatifs proposent de supprimer les traitements contre le puceron cendré, voire de supprimer les traitements contre le puceron lanigère (**scénario 3**). En remplacement, les scénarios proposent de favoriser la régulation naturelle par un enherbement du rang et de l'inter-rang pour augmenter la présence d'auxiliaires (**scénario 2**), ou par l'installation d'abris à forficules (**scénario 3**) qui sont des prédateurs des pucerons. Pour lutter contre le carpocapse, les trois scénarios alternatifs proposent des pratiques supplémentaires à l'existant, à savoir l'élimination des zones de refuge du carpocapse (arbres isolés, vergers abandonnés) et la mise en place de nichoirs. Concernant la gestion des maladies, tous les scénarios alternatifs proposent de maintenir les traitements préventifs de fongicides mais de supprimer la destruction de la litière foliaire et l'application d'urée, ainsi que les fongicides en curatif pour certains. Seul le **scénario 3** propose de les maintenir, mais de limiter en contrepartie les traitements préventifs aux pics de projection de spores. A la place des fongicides, le **scénario 1** propose de favoriser l'aération du couvert en limitant les quantités d'eau apportées et en pratiquant une taille en vert plus sévère.

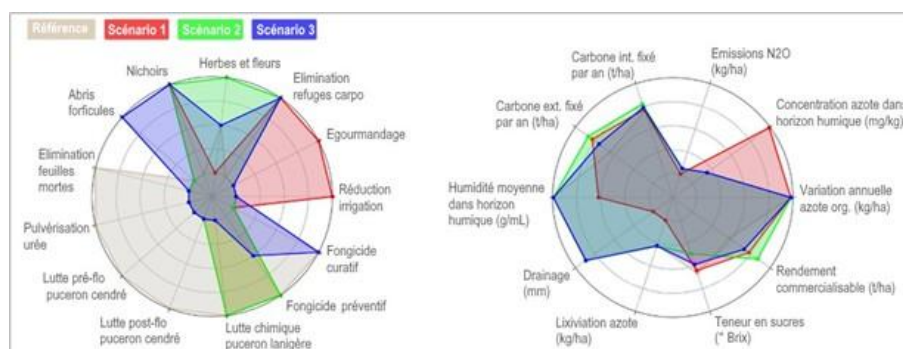


Figure 3 : Illustration des trois scénarios alternatifs générés par la méthode par exploration (en rouge, vert et bleu) et du scénario de référence (en marron) sur deux graphiques en radar, représentant les

pratiques (à gauche) et les performances (à droite). Seules les pratiques qui divergent du scénario de référence sont représentées.

Les performances des différents scénarios restent inchangées en ce qui concerne les indicateurs relatifs à la variation annuelle de l'azote organique dans le sol, aux émissions de N_2O et à la séquestration du carbone int. (incluant le carbone fixé dans les fruits tombés prématurément à cause des bioagresseurs). Les scénarios alternatifs proposent tous de réduire le nombre de traitements phytosanitaires, tout en améliorant le rendement commercialisable et la séquestration du carbone ext. (excluant le carbone fixé dans les fruits tombés) car ils prédisent moins d'attaques sur les fruits dues au carpocapse (Tableau 1). La réduction des quantités d'eau apportées dans le **scénario 1** permet de réduire le drainage et la lixiviation de l'azote, et induit une plus faible humidité dans l'horizon humique. Avec la proposition du **scénario 2** d'enherber le rang et l'inter-rang, il y a un risque d'augmenter la compétition avec les pommiers, et possiblement de réduire la teneur en sucres des fruits.

Tableau 1 : Synthèse de la sévérité des dégâts des cinq bioagresseurs pour le scénario de référence et pour les trois scénarios alternatifs générés par la méthode par exploration. Les cases sont surlignées en jaune quand l'indicateur de performance du scénario alternatif diffère de celui de la référence.

Bioagresseur	Référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Carpocapse	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Puceron cendré	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Puceron lanigère	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Oïdium	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Tavelure	Faible	Faible	Faible	Faible

3.3. Scénarios générés avec la méthode par classes

Pour cette recherche, l'utilisateur a choisi d'afficher la classe de scénarios qui maximisent le rendement commercialisable. Les trois scénarios alternatifs obtenus pour cette classe sont présentés en

comparaison à celui de référence sur la Figure 4. Les scénarios alternatifs permettent de répondre à un sous-objectif : minimiser le changement de pratiques (**proximité**), privilégier les pratiques favorisant la régulation naturelle (**biodiversité**), et favoriser l'absence de pratiques contraignantes (**peu d'investissement**).

Concernant la gestion des pucerons, le scénario **biodiversité** propose de supprimer tous les traitements chimiques contre les pucerons, et d'installer des abris à forficules pour augmenter la prédation. Le scénario **peu d'investissement** propose de maintenir le traitement contre les pucerons lanigères, et de supprimer les autres traitements. Pour lutter contre le carpocapse, tous les scénarios alternatifs proposent d'éliminer les zones de refuge du carpocapse et de mettre en place des nichoirs. Concernant la gestion des maladies, les scénarios alternatifs ne proposent pas de changements, à part d'appliquer les fongicides en préventif seulement sur les pics de projection de spores (scénario **peu d'investissement**).

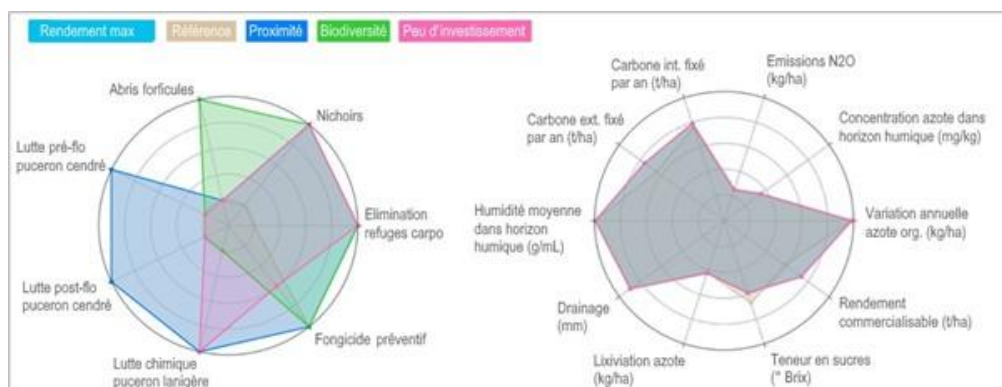


Figure 4 : Illustration des trois scénarios alternatifs générés par la méthode par classe (en bleu, vert, et rose) et du scénario de référence (en

marron), représentant les pratiques (radar de gauche) et les indicateurs de performances (radar de droite). Seules les pratiques qui divergent du scénario de référence sont représentées.

Les performances des scénarios restent inchangées pour la grande majorité des indicateurs. Les seules différences concernent le rendement commercialisable et la séquestration du carbone ext. (excluant le carbone fixé dans les fruits tombés), qui sont améliorés avec les trois scénarios alternatifs. Les scénarios **biodiversité** et **peu d'investissement** semblent être plus intéressants car ils permettent de réduire l'application de traitements phytosanitaires tout en réduisant les attaques dues au carpocapse et au puceron lanigère (Tableau 2), alors que le scénario de **proximité** maintient tous les traitements.

Tableau 2 : Synthèse de la sévérité des dégâts des cinq bioagresseurs pour le scénario de référence et pour les trois scénarios alternatifs générés par la méthode par classe. Les cases sont surlignées en jaune quand l'indicateur de performance du scénario alternatif diffère de celui de la référence.

Bioagresseur	Référence	Proximité	Biodiversité	Peu d'investissement
Carpocapse	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Puceron cendré	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Puceron lanigère	Moyenne	Faible	Faible	Faible
Oïdium	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Tavelure	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune

4. Discussion

L'outil ODACE constitue un **outil d'accompagnement des acteurs de la filière pomme** (conseillers, animateurs de réseaux, formateurs et apprenants) souhaitant s'engager dans une réduction de l'usage des PPP. Il est facilement appropriable grâce à son interface ergonomique et interactive. À l'aide de différents onglets de l'interface, l'utilisateur peut facilement préciser son contexte de production, ses



contraintes et ses préférences, de façon à ce que les scénarios alternatifs proposés répondent au mieux à sa situation et ses attentes. L'intérêt de l'outil est aussi de proposer à l'utilisateur différentes méthodes et options de recherche, ce qui lui laisse la possibilité de comparer plusieurs scénarios alternatifs grâce à des représentations visuelles synthétiques et ainsi faire ses propres choix. L'analyse du cas d'étude montre que la méthode par classes, visant à explorer des scénarios avec des sous-objectifs contrastés, permet d'obtenir des performances similaires avec des combinaisons de pratiques différentes, ce qui donne à l'utilisateur plus de liberté dans ces choix de pratiques à favoriser. Le cas d'étude a montré qu'il était possible de réduire l'utilisation de PPP en positionnant mieux les traitements ou en les substituant par des pratiques alternatives sans compromettre les performances du verger. La mise en œuvre de ces pratiques alternatives peut toutefois demander davantage de surveillance ou de technicité (Zavagli *et al.*, 2018). Par exemple, l'application de fongicides en préventif seulement sur les pics de projection de spores permet de réduire le nombre de traitements par rapport à des traitements systématiques, mais cela nécessite l'utilisation d'outil de prédiction des risques d'infections épidémiologiques des végétaux et/ou une bonne connaissance des maladies.

L'outil offre également un **support d'échange entre les professionnels de la filière et les chercheurs autour de la transition agroécologique**. Au-delà des services de production de fruits et de régulation des bioagresseurs, l'outil fournit d'autres indicateurs de services écosystémiques en lien avec la régulation du climat, la fertilité des sols, et la régulation du cycle de l'eau qui sont, au regard des enquêtes réalisées, encore peu considérés par les agriculteurs (car non valorisables économiquement). L'outil ODACE peut en ce sens constituer un moyen de sensibilisation à l'impact de leurs pratiques sur l'environnement. Les modèles IPSIM et QualiTree mobilisés par l'outil peuvent aussi être utilisés indépendamment, notamment pour mieux appréhender les interactions entre pratiques agricoles, bioagresseurs et fonctionnement de la plante. En particulier, les modèles IPSIM sont facilement mobilisables par les professionnels grâce à une interface interactive R-Shiny inspirée de celle développée pour IPSIM-Chayote (Deguine *et al.*, 2021). Elle permet à un utilisateur de visualiser l'impact de la modification d'une pratique individuelle ou d'une combinaison de pratiques sur la sévérité des dégâts d'un bioagresseur, et peut l'amener ainsi à modifier ses pratiques. Le modèle QualiTree pourrait servir à tester l'impact de différents schémas d'infestation/infection spatiale et temporelle des bioagresseurs, ou à évaluer l'impact de bioagresseurs dans des conditions de stress abiotiques (Lacroix *et al.*, 2024). Son utilisation reste cependant limitée à un public scientifique initié et nécessite une vulgarisation auprès des professionnels. Par ailleurs, alors que les scénarios ont été simulés sur des données climatiques « moyennes » d'un bassin, les modèles offrent la possibilité de générer des scénarios sous différentes projections de changement climatique (Vercambre *et al.*, 2024).

L'outil ODACE présente toutefois **certaines limites, en grande partie liées aux données sur lesquelles les modèles s'appuient pour simuler les scénarios**. Que ce soit pour les modèles IPSIM (dégâts des bioagresseurs) ou le modèle QualiTree (impact des dégâts sur le fonctionnement de l'arbre), leur développement s'est heurté à des données insuffisantes, souvent lacunaires, voire inadéquates vis-à-vis des besoins de modélisation. Par exemple, il y a peu de données concernant des contextes de dégâts de bioagresseurs modérés ou forts, et encore moins avec des attaques multiples. Il y a aussi un manque de connaissances et de données pour identifier, et surtout quantifier, les mécanismes physiologiques affectés par certains bioagresseurs. Cela ne permet pas de paramétrer les modèles sur toute la gamme de dégâts possible, et peut réduire leur qualité prédictive. Par ailleurs, l'impact de certaines pratiques innovantes (par exemple la défoliation des arbres pour limiter les attaques de pucerons cendrés) sur le fonctionnement de l'arbre (mise en réserve ...) reste encore peu étudié. Aussi, il peut encore exister des désaccords entre experts quant à l'efficacité de certaines techniques, et certains choix formalisés dans les modèles ne font pas l'unanimité des utilisateurs et/ou des experts qui ont contribué à leur développement. Mais ces discussions participent à la réflexion, et à une meilleure confrontation/compréhension des connaissances des différents acteurs. Même si l'évaluation des modèles IPSIM montre certaines limites, ils prédisent qualitativement des niveaux de



dégâts qui correspondent à ce qui est attendu par les experts de terrain. De même, les gammes de valeur des indicateurs simulés par le modèle QualiTree sont cohérentes avec celles trouvées dans la littérature, dans les rares travaux où elles étaient disponibles ou comparables.

Des **perspectives d'amélioration de l'outil** ont par ailleurs été identifiées. Une première voie d'amélioration serait de calibrer le modèle QualiTree pour d'autres variétés et porte-greffes afin de rendre l'outil plus générique. Une seconde voie serait de mieux prendre en compte dans les modèles les interactions entre les bioagresseurs d'une part, et leurs effets différés et pluriannuels d'autre part. Bien que les interactions entre bioagresseurs soient généralement connues (Hatcher, 1995), les références concernant ceux du pommier manquent, à quelques exceptions près. Par exemple, des associations positives entre la présence d'oïdium et l'abondance des acariens rouges auraient été trouvées sur les pommiers (Reding *et al.*, 2001). Pour le moment, les simulations ne permettent pas de prendre en compte les effets différés des bioagresseurs, comme l'impact des infestations de pucerons sur la floraison de l'année suivante (Morel *et al.*, 2011). Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour documenter ou étudier ces interactions et effets, et ainsi améliorer la fiabilité des modèles. Une dernière voie d'amélioration serait d'élargir les indicateurs de performances fournis par l'outil, avec la prise en compte de critères de production (fermeté et coloration des fruits) et économiques (coûts, temps de travail, marges). L'outil pourrait aussi intégrer un indicateur synthétique du niveau d'usage des PPP (IFT ou proxy). Ces améliorations permettraient de mieux évaluer la durabilité des stratégies dans l'outil. D'autres améliorations ont été évoquées avec les experts par rapport à l'outil en lui-même, avec notamment l'idée de le rendre encore plus interactif. En laissant le choix à l'utilisateur de fixer ses propres seuils vis-à-vis des indicateurs de performances (dégâts de bioagresseurs, rendement, etc.), l'outil permettrait de faire des recherches plus ciblées et proposerait des scénarios plus en adéquation avec les objectifs propres de l'utilisateur. Il est prévu de tester davantage l'outil dans des réseaux de la filière pomme, au travers de groupes de travail qui seront organisés dans le cadre d'un futur projet et/ou de projets étudiants (collaborations avec l'école d'ingénieurs de Purpan et l'ISARA).

Dans un contexte changeant, l'outil se doit d'être évolutif. En effet, les connaissances scientifiques et expertes, ainsi que les pratiques agricoles et la réglementation évoluent au fil du temps, ce qui nécessite que les bases de données et les modèles soient régulièrement mis à jour. Par exemple, les autorisations de mise en marché de certains produits ont changé depuis le développement de l'outil, ce qui amène à un décalage entre les propositions de l'outil et les contraintes réglementaires en vigueur. De même, de nouveaux bioagresseurs deviennent problématiques et ne sont pour le moment pas pris en compte dans l'outil, comme des cortèges de maladies secondaires (black rot, *Colletotrichum*) qui doivent être gérées en même temps que la tavelure, ou de nouveaux bioagresseurs émergents (punaise diabolique). Des pratiques alternatives proposées par l'outil peuvent également être favorables à des bioagresseurs qui ne sont pas encore considérés dans l'outil. Par exemple, l'enherbement total du verger peut augmenter le risque d'accroître les populations de campagnols. Il serait donc utile de compléter les modèles IPSIM actuels de l'outil.

5. Conclusion

Par une approche de modélisation, ce travail a permis de développer un outil pour accompagner les professionnels de la filière dans leur réflexion sur la mise en place de stratégies de réduction de l'usage des PPP. Cet outil interactif prend en compte le contexte de production, les objectifs et les préférences des utilisateurs, pour proposer des scénarios adaptés à leurs situations par deux méthodes d'optimisation combinatoire et de classification non supervisée. Il est important de maintenir des liens étroits entre chercheurs et utilisateurs pour faire évoluer les modèles et l'outil en adéquation avec les retours des utilisateurs et les attentes de la profession, et en intégrant les nouvelles connaissances scientifiques et expertes pour s'affranchir de certaines limites actuelles. En outre, il est primordial de



tester l'outil à une échelle beaucoup plus large pour l'améliorer. Ce travail constitue une preuve de concept de la démarche qui pourrait être transposée à d'autres espèces fruitières – à condition toutefois d'avoir des modèles déjà développés ou suffisamment de données pour les développer, ce qui constitue la principale limite pour le transfert de la démarche.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données, modèles et outils évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article. L'outil ODACE sera disponible sur la plateforme INRAE SK8 des applications R shiny, accompagné de l'application dédiée aux IPSIMs.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle (IA) générative et aux technologies assistées par l'IA

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par IA pour la rédaction.

Contributions des auteurs

Acquisition de financements : MMM ; Administration du projet : MMM ; Méthodologie : JB, IG, JNA, FL, FO, MHR, AR, GV, MMM ; Analyse formelle : JB, IG ; Logiciels : FO, PV ; Présentation visuelle : FO ; Supervision : JB, BG, FL, AR, MMM ; Validation : JB, IG, GV ; Rédaction du manuscrit initial : JB, IG ; Relecture : Tous les co-auteurs.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient toutes et tous les collègues impliqué(e)s dans le projet (P. Blanc, V. Gallia, S. Drusch, M. Génard, D. Bevacqua, C. Lavigne, C. Mouiren, N. Sautereau, B. Rosiès). Un remerciement chaleureux à nos stagiaires et contractuels ayant contribué à ce travail (C. Monot, O. Lacroix, D. Ndala Landou, A. Palloie, E. Barthélémy, S. Lavaud, Y. Thorel, C. Faguart, V. Mouche, A. Chemier, M. Bolot, T. Cochez) et aux gestionnaires D. Vailhen, V. Amat, et F. Voisin pour leur appui durant tout le projet.

Déclaration de soutien financier

Action pilotée par les Ministères de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires, de la Santé et de la Prévention et de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, avec l'appui financier de l'OFB, dans le cadre de l'APR « Produits phytopharmaceutiques : de l'exposition aux impacts sur la santé humaine et les écosystèmes », grâce aux crédits attribués au financement du plan Écophyto II+.

Références bibliographiques

- Agreste, 2021. Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018. IFT et nombre de traitements. CHIFFRES ET DONNÉES, mai 2021, n°8.
- Alaphilippe A., Angevin F., Guérin A., Guillermin P., Velu A., et al., 2017. DEX-IFruits, un outil d'évaluation multicritère des systèmes de production de fruits : d'un modèle de recherche à un outil terrain co-construit. *Innovations Agronomiques* 59, 205-212.
- Aubertot J.N., Robin, M.-H., 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).



- Breiman L., 2001. Random Forests, *Machine Learning*, vol. 45, no 1, p. 5–32.
- Chang W., Cheng J., Allaire J., Sievert C., Schloerke B., Xie Y., Allen J., McPherson J., Dipert A., Borges B. (2024). shiny: Web Application Framework for R. R package version 1.10.0, <https://CRAN.R-project.org/package=shiny>.
- Deguine J.-P., Robin M.-H., Corrales D. C., Vedy-Zecchini M.-A., Doizy A., Chiroleu F., Quesnel G., Paitard I., Bohanec M., Aubertot J.-N., 2021. Qualitative modeling of fruit fly injuries on chayote in Réunion: Development and transfer to users. *Crop Protection*, 139:105367.
- Hatcher P.E., 1995. Three-way interactions between plant pathogenic fungi, herbivorous insects and their host plants. *Biological Reviews* 70, 639–694.
- Inserm, 2021. Pesticides et effets sur la santé : Nouvelles données. Collection Expertise collective. Montrouge : EDP Sciences.
- Lacroix O., Lescourret F., Génard M., Memah M.-M., Vercambre G., Valsesia P., Bevacqua D., Grechi I., 2024. Modeling the effect of multiple pests on ecosystem services provided by fruit crops: Application to apple. *Agricultural Systems* 213, 103808.
- Ould-Sidi M.-M., Lescourret F., 2011. Model-based design of integrated production systems: a review. *Agronomy and Sustainable Development* 31, 571–588.
- Mamy L., Pesce S., Sanchez W., Amichot M., Artigas J., et al., 2022. Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Rapport de l'expertise scientifique collective. [Rapport de recherche] INRAE, IFREMER, 1408 pp.
- Morel K., Cœur d'Acier A., Defrance H., Simon S., 2011. Le puceron cendré du pommier: Mieux connaître son vol d'automne pour mieux le maîtriser au printemps. *PHYTOMA - La Défense des Végétaux* 644, 49-52.
- R Core Team, 2025. R: a Language and Environment for Statistical Computing (Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing), <https://www.R-project.org/>.
- Reding M.E., Alston D.G., Thomson S.V., Stark A.V., 2001. Association of powdery mildew and spider mite populations in apple and cherry orchards. *Agriculture Ecosystems & Environment* 84, 177–186.
- Ricci P., Bui S., Lamine C., 2011. Repenser la protection des cultures : Innovations et transitions. Éducagri éditions, 258 pp.
- Vercambre, G., Mirás-Avalos, J. M., Juillion, P., Moradzadeh, et al. 2024. Analyzing the impacts of climate change on ecosystem services provided by apple orchards in Southeast France using a process-based model. *Journal of Environmental Management*, 370, 122470.
- Zavagli F., Alison B., Ballion S., Bellevaux C., Favareille J., Giraud M., Le Berre F., Lesniak V., Sagnes J.L., Verpont F., 2018. Réduire l'emploi des produits phytosanitaires en verger de pommier. Les enseignements du réseau national EXPE Ecophyto Pomme. *Innovations Agronomiques* 70, 55-72.

Pour citer cet article : Julie Borg, Isabelle Grechi, Jean-Noël Aubertot, Pascal Borioli, Pierre Franck, et al.. L'outil ODACE. Accompagner la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques en vergers de pommiers. *Innovations Agronomiques*, 2026, 110, pp.69-80. [10.17180/ciag-2026-vol110-art06](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-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.



Quel numérique pour l'agroécologie ? Enseignements de la co-conception de la Pépinière-Mesclun, une application en ligne pour les maraîchers

Kevin MOREL¹, Paul APPERT², Fabien MORITZ³, Florence AMARDEILH³

¹ UMR SADAPT, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 22 place de l'agronomie, 91120 Palaiseau, France

² Designer indépendant, 18, rue de la Halle 76220 Gournay-en-Bray, France

³ Elzeard, 14 rue Cendrillon, 33600 Pessac, France

Correspondance : kevin.morel@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-art07>

Résumé

A travers l'analyse d'un cas d'étude de co-conception d'une application en ligne pour les maraîchers (La Pépinière-Mesclun) notre objectif était d'explorer les caractéristiques d'un outil numérique pouvant répondre aux besoins et aux attentes d'utilisateurs engagés dans des démarches d'agroécologie. Nous avons identifié 73 décisions de design prises au cours du processus qui se rattachent à 13 principes de design et 4 valeurs de design. En termes de valeurs, notre outil devait (i) respecter la diversité et la complexité des systèmes agricoles, (ii) être accessible à une diversité des profils d'utilisateurs, (iii) valoriser l'expertise humaine et soutenir l'autonomie de décision, (iv) être géré comme un « commun numérique ».

Mots-clés : Recherche participative ; Design ; Durabilité ; Planification des cultures ; Commercialisation ; Communs numériques

Abstract : Which digital for agroecology ? Insights from the co-design of La Pépinière-Mesclun, an online application for vegetable growers

Through the analysis of a case study involving the co-design of an online application for vegetable growers (*La Pépinière-Mesclun*), our objective was to explore the characteristics of a digital tool capable of addressing the needs and expectations of users engaged in agroecological approaches. We identified 73 design decisions made throughout the process, which relate to 13 design principles and 4 design values. In terms of values, the tool was intended to (i) respect the diversity and complexity of agricultural systems, (ii) be accessible to a wide range of user profiles, (iii) value human expertise and support autonomous decision-making, and (iv) be managed as a digital commons.

Keywords: Participatory research ; Design ; Sustainability ; Crop planning ; Marketing ; Digital commons

1. Introduction

Bien que présentés de manière croissante comme des facteurs clés de la transition vers une agriculture plus durable, les outils numériques peuvent faire l'objet de critiques ou de controverses dans les réseaux agricoles défendant l'agroécologie (Ajena et al., 2022 ; Bellon-Maurel et al., 2022 ; Leveau et al., 2019 ; Schnebelin, 2022). Par agroécologie, nous entendons une approche globale de la transition des systèmes agricoles et alimentaires vers plus de durabilité basée sur la reconception systémique plutôt que l'optimisation ou la substitution (Duru et al., 2015 ; Hill et MacRae, 1996). Dans ces réseaux, les outils numériques peuvent être perçus comme renforçant les dynamiques d'industrialisation de l'agriculture et menaçant l'autonomie décisionnelle des agriculteurs. Cette perception est renforcée par



le fait que les agriculteurs sont rarement impliqués dans les phases initiales de la conception d'outils numériques pour l'agriculture (Di Bianco et Ghali, 2022). Cependant, les outils numériques, en particulier les outils numériques d'aide à la décision, peuvent aussi être considérés comme des options prometteuses pour soutenir la conception et la gestion de systèmes agroécologiques qui sont complexes et intensifs en connaissances. Notre objectif a été d'explorer les caractéristiques d'un **outil numérique d'aide à la (re)conception stratégique à l'échelle de la ferme** (nous parlerons simplement par la suite d'« outil numérique » pour alléger le texte) qui pourrait répondre aux attentes de réseaux agroécologiques. Nous nous sommes basés sur le cas d'étude de la Pépinière-Mesclun, un outil numérique pour les maraîchers co-conçu et développé dans le cadre du projet MESCLUN DURAB (Ecophyto 2+) de 2021 à 2023. La Pépinière-Mesclun est un outil de (re)conception à l'échelle de la ferme maraîchère axé sur la planification et l'assolement pour répondre à des débouchés commerciaux. Elle permet de simuler différents scénarios et d'évaluer la durabilité de systèmes agroécologiques par rapport à une diversité d'objectifs concrets pour les agriculteurs.

2. Cas d'étude et méthodes

2.1. La Pépinière-Mesclun : un outil numérique pour répondre à des enjeux clés sur les fermes maraîchères

Dans les démarches agroécologiques, l'augmentation de la biodiversité végétale à la fois par la diversification des cultures et l'intégration des couverts végétaux est un levier préventif majeur pour diminuer ou supprimer les produits phytosanitaires. Cependant, ces démarches peuvent entraîner une grande complexité d'organisation dans les systèmes maraîchers en termes de rotation et d'assolement car ces systèmes combinent déjà une diversité de cultures à cycles courts au cours du temps avec des récoltes échelonnées sur toute la période de production. De plus, évaluer l'impact global de ces pratiques sur la durabilité de l'exploitation est difficile pour les producteurs car les outils d'évaluation multicritère existants, par exemple IDEA (Zahm et al., 2019) ou DEXIPM-FV¹⁶, bien que très pertinents pour la recherche n'ont pas été conçus pour une prise en main simple par les agriculteurs.

Le projet MESCLUN a cherché à répondre à ce double enjeu en développant un outil numérique appelé la Pépinière-Mesclun. La Pépinière-Mesclun est un outil numérique pensé par et pour les maraîchers pour les accompagner dans la (re)conception de leur ferme dans une perspective agroécologique incluant une réduction ou suppression de produits phytosanitaires via la diversification des cultures et des couverts végétaux. Basé sur une large base de données (calendriers de culture, rendements, prix), l'utilisateur peut concevoir différents scénarios de commercialisation (nombre de débouchés, quantités et diversité des légumes vendus chaque semaine, prix, chiffre d'affaires). L'utilisateur peut ensuite explorer différentes combinaisons de cycles de cultures (périodes d'implantation, de récolte, surfaces associées) pour répondre à ces objectifs de commercialisation et répartir ces différents cycles de culture sur différentes parcelles en plein champ ou sous abri pour obtenir un plan de culture qui est la sortie première de l'outil. À partir de ce plan de culture et de données saisies par l'utilisateur sur les pratiques agricoles et le contexte, des modules complémentaires permettent une analyse multicritère de la durabilité de la ferme sur différentes dimensions et de répondre aux besoins des usagers en termes de gestion et d'évaluation de la durabilité des systèmes conçus par rapport aux enjeux suivants : (i) planification des plants et semences, (ii) dimensionnement des surfaces de production et évolution du travail hebdomadaire, (iii) gestion de la fertilité, (iv) évaluation environnementale, (v) bilan économique et de trésorerie.

Le projet a été initié en 2020 via un financement de la Fondation Daniel et Nina Carasso et de la Région Bourgogne Franche Comté et a bénéficié d'un financement par Ecophyto 2+ (projet MESCLUN

¹⁶ <https://www.picleg.fr/content/download/3804/36367/version/1/file/DEXiPM-FV.pdf>



DURAB) de 2021 à 2023. Ce projet a rassemblé une diversité de partenaires de la R&D (4 unités INRAE, l'ITAB), de l'informatique (entreprise Elzeard), du design (Paul Appert, designer indépendant), de l'accompagnement agricole (réseau Chambres d'Agricultures, réseau FNAB, Planète Légumes, Association Française d'Agriculture Urbaine Professionnelle) et de l'enseignement agricole (Educagri Editions). Une première version de la Pépinière-Mesclun est disponible gratuitement en ligne au lien suivant : <https://outils-mesclun.fr/> Une vidéo de présentation rapide de l'outil est disponible ici : <https://www.youtube.com/watch?v=A8WaLytjetw>

Dans cet article, nous allons présenter des enseignements issus du processus de co-conception de cet outil numérique.

2.2. Une approche de co-conception participative

Dès le démarrage du projet, les partenaires ont souhaité que la Pépinière-Mesclun puisse être utilisée par différents usagers : des maraîchers existants ou futurs (porteurs de projets), des conseillers et des formateurs ou enseignants agricoles. Cash et al. (2023) suggèrent que pour être réellement utilisé par des usagers, un outil issu de la recherche doit être perçu comme **pertinent** (correspondant à leurs besoins et enjeux), **crédible** (données et modèles utilisés jugés adéquates) et **légitime** (respecter la diversité des valeurs et des situations) par les usagers. Nous sommes partis du postulat que tendre vers ces critères nécessitait d'impliquer les usagers de manière participative à toutes les étapes de conception de l'outil (Cerf et al., 2012 ; Meynard, 2012). Nous avons donc mis en place une démarche de conception participative, c'est-à-dire de co-conception, proche de la catégorie « *design de-novo* » caractérisée par Lacombe et al. (2018). Ce sont les chercheurs qui ont piloté la démarche de conception dont l'objectif principal était de produire un nouvel objet (ici un outil numérique) en faisant intervenir les usagers pour mieux intégrer leurs besoins et attentes. Intégrer les usagers avait également pour objectif de faciliter l'appropriation future de l'outil numérique.

Inspirée par Cerf et al. (2012), notre méthodologie s'est appuyée sur 2 étapes principales : (i) un **diagnostic des usages** (basé sur des entretiens préliminaires et des ateliers collectifs avec les usagers) visant à identifier la diversité des situations associées à la planification des cultures, explorer comment les usagers prennent leurs décisions, le rôle des outils de planification existants et de quelle manière notre outil pourrait faciliter cette prise de décision stratégique, (ii) une **méthodologie participative** articulant de fréquentes interactions avec les usagers via 37 ateliers dans toute la France métropolitaine impliquant au total 256 participants (**Figure 1, Photo 1**). Les besoins et retours faits par les usagers de terrain ont été intégrés de manière itérative dans la conception de maquettes par le designer, le développement informatique d'un prototype et la structuration d'une base de données selon une méthodologie de **développement agile**. Le développement agile est une approche de conduite de projet informatique fondée sur des cycles courts et itératifs, favorisant l'adaptation continue de l'outil aux besoins exprimés par les usagers, grâce à des échanges réguliers entre les parties prenantes et des ajustements progressifs des fonctionnalités (Anand and Dinakaran, 2016). Ce processus a permis de spécifier les 2 principales situations d'usage de la Pépinière-Mesclun : (i) la création d'une ferme maraîchère dans laquelle la planification des cultures est un élément stratégique clé de son organisation, de son modèle économique et de son prévisionnel, (ii) la reconception de la planification des cultures pour des fermes maraîchères existantes impliquées dans un changement stratégique (ex: diversification de la production ou des débouchés, changement de parcellaire, allongement des rotations). La Pépinière-Mesclun a été conçue dans la perspective de faciliter et outiller les interactions entre les maraîchers en place ou futurs (porteurs de projet), les conseillers et formateurs agricoles dans ces 2 situations (**Figure 2**).

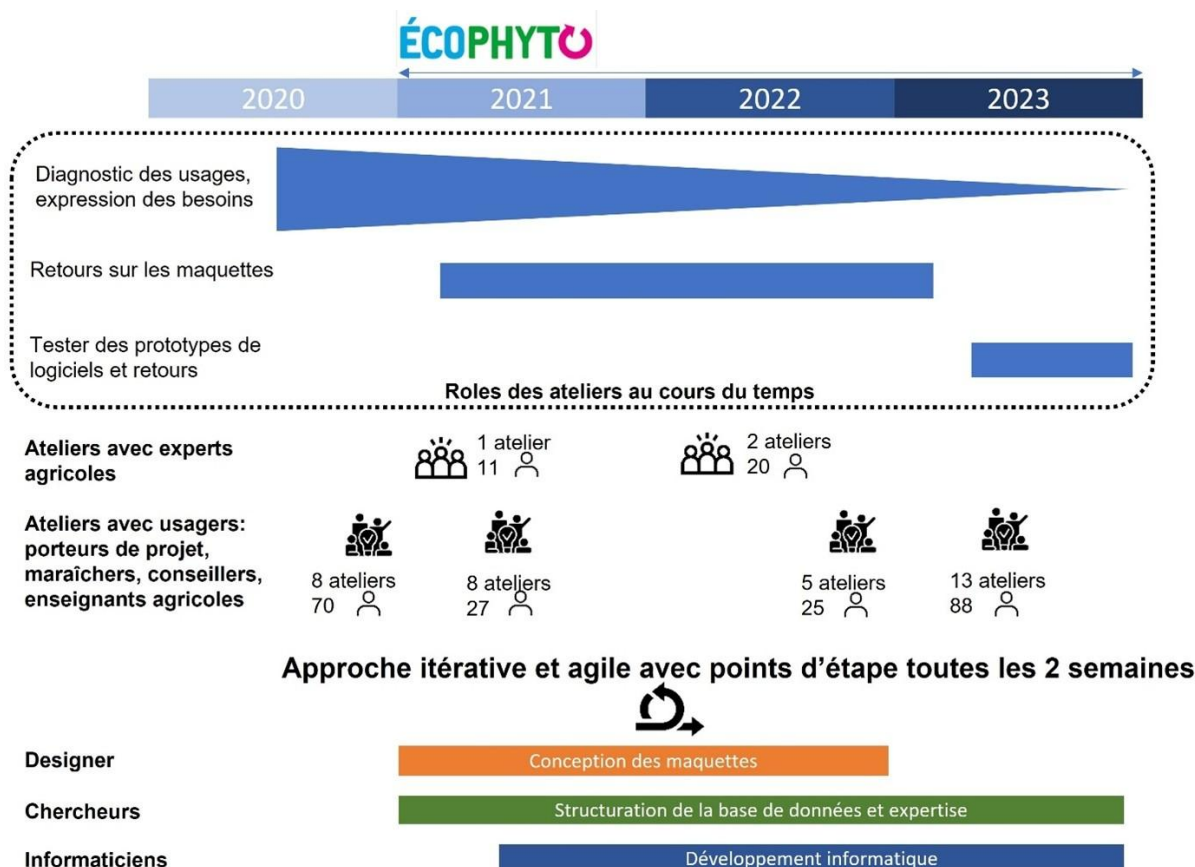


Figure 1 : Présentation des différentes phases de la démarche participative qui a reposé sur 37 ateliers impliquant au total 256 participants (dont 172 maraîchers ou porteurs de projet agricole) contribuant à une démarche de développement agile.



Photo 1 : Un atelier de test de la Pépinière-Mesclun avec des porteurs de projet de maraîchage dans un établissement de formation agricole. Crédit photo : Kevin Morel (avec consentement des participants).

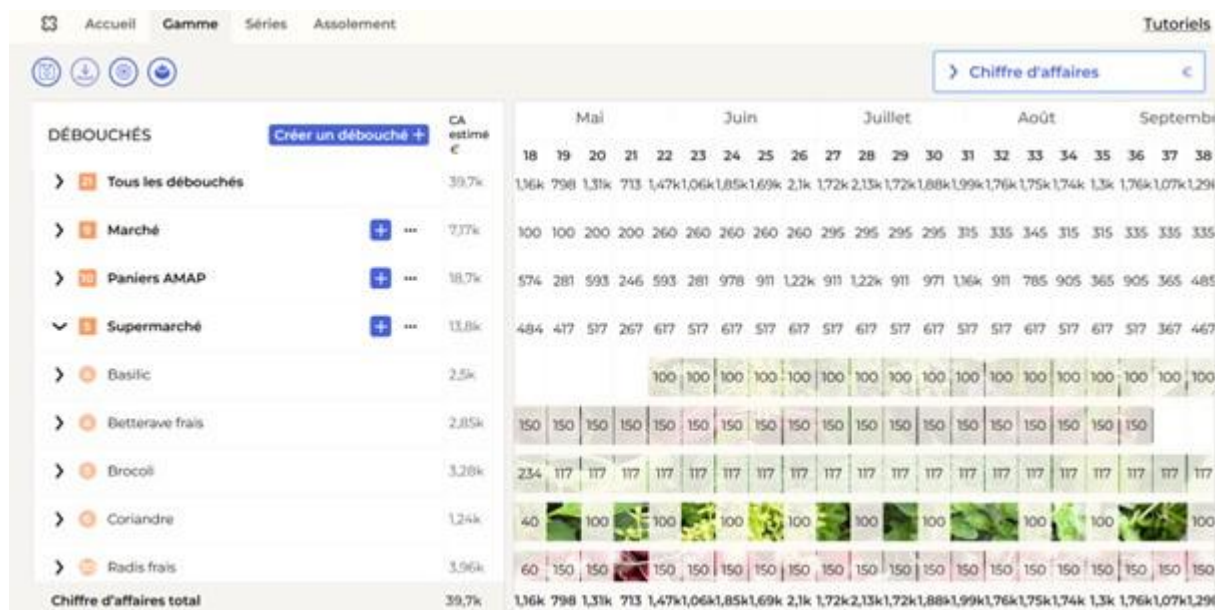


Figure 2 : Un exemple d'interface de la Pépinière-Mesclun permettant de fixer des objectifs commerciaux pour différents débouchés.

2.3. Documentation du processus de co-conception et analyse des données

Nous avons documenté de manière systématique le contenu des échanges lors des différents ateliers et des réunions de développement agile en prenant des notes (539 pages de 2020 à 2023 pour 155 654 mots décrivant les besoins et retours des usagers, les discussions entre les participants, les décisions de design et leur justification). Ce riche matériau a fait l'objet d'une analyse qualitative utilisant un codage thématique (Miles et Huberman, 1984). Lors de cette analyse, nous avons construit de manière inductive, c'est-à-dire en les faisant émerger progressivement à partir du matériau empirique, trois concepts qui nous ont permis de rendre compte des décisions prises concernant la conception de la Pépinière-Mesclun. Nous avons ainsi caractérisé les « décisions de design » comme la catégorie basique d'analyse. Les **décisions de design** sont les options concrètes choisies pour le développement de l'outil basées sur les besoins et retours des usagers, par exemple « ne pas présenter des rendements moyens par légumes mais des fourchettes de rendements pour prendre en compte le fait que la production est variable et incertaine ». Ces décisions de design ont été ensuite groupées à un second niveau dans une catégorie plus générique de **principes de design**, par exemple « prendre en compte la variabilité et les incertitudes des processus agricoles ». Ensuite, nous avons observé que ces principes de design pouvaient être regroupés à un troisième niveau encore plus générique que nous avons appelé **valeurs de design** et qui décrivent les fondements idéologiques qui sous-tendent les principes de design, par exemple « respecter la diversité et la complexité des systèmes agricoles ».

Ici, nous avons fait le choix de garder le terme anglais *design*, plutôt que conception en français, car nous avons travaillé avec un *designer* et c'est ce terme que nous avons utilisé lors du projet. Cela avait l'avantage de distinguer clairement le processus de conception de notre outil (le *design*) de son objectif (la *conception* de systèmes maraîchers). Le concept de « communs numériques » a été utilisé pour caractériser une de ces valeurs de design. Ce concept a été apporté par les chercheurs à partir de la littérature scientifique (Calvet-Mir et al., 2018 ; Dulong De Rosnay et Stalder, 2020) uniquement à la fin du processus car il faisait profondément écho aux préoccupations des usagers.



3. Résultats

Lors des différents ateliers, les usagers ont exprimé le fait qu'ils ne voyaient pas de contradiction à utiliser un outil numérique pour accompagner des approches agroécologiques (conseillers ou formateurs) ou concevoir des systèmes agroécologiques (porteurs de projet et maraîchers) **si et seulement si** l'outil numérique était conçu à partir d'un ensemble de valeurs et de principes en cohérence avec leur expérience et leur vision du monde. En effet, nous avons mis en évidence 73 décisions de design prises au cours du processus (non détaillées ici) qui se rattachent à **13 principes de design** et **4 valeurs de design** (Tableau 1). En termes de valeurs, notre outil devait (i) respecter la diversité et la complexité des systèmes agricoles, (ii) être accessible à une diversité de profils d'usagers, (iii) valoriser l'expertise humaine et soutenir l'autonomie de décision, (iv) être géré comme un « commun numérique ». Les 13 principes de design sont présentés dans le **Tableau 1**. A ces conditions, l'outil numérique était perçu comme pouvant avoir un grand potentiel pour soutenir des approches agroécologiques en permettant aux usagers d'explorer et de réfléchir à des scénarios contrastés.

En guise d'illustration, nous pouvons considérer le principe de design « Garder l'outil numérique le plus simple possible en valorisant au maximum l'expertise des agriculteurs et de ceux qui les accompagnent plutôt que de se reposer sur la modélisation pour rendre compte de la complexité des processus biophysiques dans les systèmes agroécologiques ». Les maraîchers ont souligné le fait que pendant leur période de maturité la quantité de tomates pouvant être récoltée sur une surface donnée était variable chaque semaine. C'est un problème complexe car la dynamique de production de tomates est impactée par de multiples interactions entre la variété utilisée, les pratiques agricoles, les conditions climatiques etc. Sur une ferme maraîchère diversifiée pouvant cultiver 50 types de légumes avec 300 variétés (incluant des variétés populations peu documentées), essayer de modéliser finement la temporalité des récoltes peut vite devenir un cauchemar de complexité. En tant que chercheurs, nous souhaitions malgré tout réfléchir à la manière de modéliser au mieux ces dynamiques. Cependant, lors des ateliers, les maraîchers nous ont demandé de « faire au plus simple car de toute façon on n'arriverait pas à modéliser la réalité et que cela pouvait avoir un effet pervers en faisant croire aux usagers que l'on maîtrisait totalement les processus et qu'il fallait mieux fournir une approximation en étant clair que c'était une approximation ». Ainsi, pour chaque type de légume, la Pépinière-Mesclun fournit une fourchette de rendement (bas-moyen-haut) dans lequel l'utilisateur doit se positionner en fonction de sa variété et de son expérience et l'outil considère que la production est homogène chaque semaine sur toute la période de récolte (ce qui est peu réaliste). Ces données permettent aux usagers une première approximation du potentiel de production chaque semaine par unité de surface pour une première approche large de leur planification à partir des critères de commercialisation. Cependant, l'outil permet aux usagers de modifier les rendements en distinguant des variétés s'ils le jugent pertinent et d'adapter manuellement les rendements semaine après semaine à partir de leur expertise. A partir d'un rendement moyen hebdomadaire, les maraîchers peuvent décider de baisser les quantités produites en début et fin de cycle et de les augmenter en milieu de cycle. **S'ils n'ont pas cette expertise, ils sont encouragés à discuter avec d'autres maraîchers ou des conseillers pour affiner les courbes à partir de l'expertise humaine, ce qui encourage le partage d'idées, d'expérience et les apprentissages. Les résultats de ce processus d'apprentissage dans la vie réelle en interagissant entre humains peuvent ensuite être renseignés comme données d'entrée dans l'outil numérique.**

Pour favoriser le fait que les agriculteurs explorent les impacts environnementaux de leurs pratiques, il leur a semblé **pertinent que l'évaluation environnementale se greffe à un outil qui remplit un enjeu stratégique fort de l'agriculteur** (dans notre cas planification/assolement) et se base au maximum sur les données déjà saisies par l'agriculteur (sobriété en données) **plutôt que de développer des outils d'évaluation environnementale déconnectés des enjeux opérationnels ou stratégiques des agriculteurs.**



Tableau 1 : Valeurs et principes de design ayant guidé le développement de la Pépinière-Mesclun et nombre de décisions de design associées.

Valeurs de design	Principes de design	Exemple de décision de design (« L'outil doit permettre de... »)	Nb de décisions de design
Respecter la diversité et la complexité des systèmes agricoles	Permettre une approche systémique en considérant des fonctionnalités, dimensions et indicateurs pertinents pour les agriculteurs	Partir des débouchés commerciaux pour en déduire les surfaces cultivées ou l'inverse ou de combiner les deux approches.	19
	Permettre une flexibilité d'usage selon la diversité des pratiques (agricoles, de conception, de gestion) et des contextes sociotechniques	Fournir des rendements par défaut pour des conditions en agriculture biologique et conventionnelle.	8
	Prendre en compte la variabilité et les incertitudes des processus agricoles	Considérer des marges d'erreur dans les estimations de production.	3
	<i>Sous-total pour cette valeur</i>		30
Être accessible à une diversité de profils d'utilisateurs	Limiter les données de départ requises en s'appuyant au maximum sur une base de données par défaut en laissant ensuite la possibilité à chaque usager de personnaliser ses données si besoin	Fournir des données par défaut de périodes possibles d'implantation et de récolte pour différents légumes dans une zone climatique donnée.	7
	Permettre différents niveaux de précision en fonction des besoins de l'usager et des contextes d'utilisation (phase exploratoire ou d'approfondissement, but de formation ou conception d'une ferme réelle)	De raisonner la production à l'échelle de la ferme ou en spécifiant différents débouchés commerciaux.	4
	Présenter des interfaces intuitives et simples d'utilisation pour les agriculteurs	Fournir un tableau de bord avec des indicateurs clés d'évaluation de la durabilité de la ferme.	4
	<i>Sous-total pour cette valeur</i>		15
Valoriser l'expertise humaine et soutenir l'autonomie de décision	Garder l'outil numérique le plus simple possible en valorisant au maximum l'expertise des agriculteurs et de ceux qui les accompagnent (conseiller, formateur) plutôt que de se reposer sur la modélisation pour rendre compte de la complexité des processus biophysiques dans les systèmes agroécologiques	Fournir une période de récolte pour les légumes à récolte échelonnée et laisser l'usager préciser les moments et quantités de récolte sur cette période en fonction de ses pratiques et de la variété.	6
	Développer des fonctionnalités pour soutenir le partage de connaissances et la formation	Permettre de générer des sorties visuelles permettant de nourrir des discussions collectives.	5
	Permettre la simulation et l'évaluation d'options stratégiques contrastées plutôt que de fournir une solution optimale de manière prescriptive	Permettre à l'usager de préciser ses règles de rotation et d'évaluer son plan de culture en fonction.	3
	<i>Sous-total pour cette valeur</i>		14
Être géré comme un commun numérique	Permettre l'accès libre aux données non personnelles, modèles et codes de l'outil numérique. Permettre un partage des données personnelles sur la base du volontariat dans un cadre transparent, juste et protecteur	Partager les données d'un usager selon des conditions qu'il contrôle.	5
	Créer une communauté d'utilisateurs pouvant contribuer à améliorer l'outil numérique et des ressources associées pour soutenir son usage dans différents réseaux et contextes	D'organiser le partage de jeux de données via une interface ergonomique accessible à différents profils d'utilisateurs.	3



Développer un modèle de gouvernance permettant aux usagers finaux ou à leurs représentants de discuter et d'orienter le développement stratégique de l'outil	Prioriser collectivement les futurs développements informatiques.	4
Développer un modèle économique pérenne considéré comme juste par les utilisateurs finaux et discutés collectivement	Soutenir un usage gratuit de l'outil ou financé par des dispositifs de formation.	2
<i>Sous-total pour cette valeur</i>		14
Total du nombre de décisions de design		73

Les maraîchers se sont **montrés sceptiques quant à la possibilité de développer des outils numériques qui prédiraient de manière précise l'impact sur tel ou tel ravageur de leviers agroécologiques** mis en place (car ils perçoivent la grande variabilité des situations spécifiques). Ainsi modéliser l'impact phytosanitaire de différents leviers agroécologiques et de leur combinaison ne leur paraissait pas pertinent. Les principaux freins à la mise en place de pratiques agroécologiques liés à la diversification des cultures et des couverts sont liés aux contraintes d'assolement, de travail, de rentabilité. **Par conséquent, les agriculteurs sont plus sensibles à des outils qui leur permettent de réfléchir à comment intégrer des leviers agroécologiques de manière cohérente dans leur système de production (par exemple à quel moment placer des couverts végétaux dans la rotation, quel travail induit, quel impact sur la rentabilité) que d'évaluer analytiquement l'impact de ces pratiques sur tel ou tel bioagresseur.**

Les usagers ont exprimé leur volonté que l'outil numérique soit géré selon les 4 principes des communs numériques définis par Dulong De Rosnay et Stalder (2020): (i) des données, modèles et outils disponibles en ligne avec un accès libre permettant (ii) une contribution collective au développement de l'outil, à son alimentation avec de nouvelles données et à la création de supports et ressources associées, (iii) une pérennité économique de l'outil numérique basée sur un modèle alternatif ni fondé sur une commercialisation marchande ni dépendante de subventions publiques, (iii) guidée par une gouvernance collective et horizontale, c'est-à-dire reposant sur une prise de décision partagée entre les acteurs impliqués, sans hiérarchie centralisée.

Le premier principe a été suivi pendant le développement de la Pépinière et les bases données, maquettes, codes informatiques de l'outil sont disponibles en libre accès avec des licences ouvertes. Cependant, les partenaires du projet ont souligné que les trois autres principes soulevaient de nombreux défis :

- (i) Comment faire pour que des structures d'accompagnement agricole (ex : réseau chambres d'agriculture et réseau FNAB) collaborent sur le long terme au développement d'un outil en commun en mutualisant leurs efforts et leurs données alors que ces organisations peuvent être en compétition et que la tendance actuelle est au développement d'outils en propre pour chaque organisation et uniquement accessibles à ses membres ?
- (ii) Comment développer un modèle économique juste et pérenne sur le long terme permettant idéalement l'accès gratuit ou le moins cher possible au plus grand nombre d'utilisateurs tout en rémunérant l'hébergement, la maintenance et de possibles futurs développements de l'outil numérique ? La question de la gratuité a fait l'objet de nombreuses discussions et débats entre les partenaires et avec les usagers. Pour certains, l'accès gratuit à tous les usagers est primordial si l'on veut que l'outil soit utilisé largement par des maraîchers, en particulier ceux qui sont en difficultés économiques. Pour d'autres, il est « préférable de payer un petit abonnement et d'avoir un outil fonctionnel qui est maintenu dans le temps avec un service après-vente plutôt qu'un outil gratuit rempli de bugs ». Différents modèles économiques ont été discutés : don ou mécénat ; outil gratuit pour un usage privé mais licence payante pour un usage en formation ou conseil avec des supports pédagogiques complémentaires ; parrainage des maraîchers par des consommateurs (ex : AMAP) ou des collectivités voulant soutenir



l'installation de maraîchers ; prix libre ; prix proportionnel à la surface ou aux chiffres d'affaires. A cette heure, la question n'est pas encore tranchée ;

- (iii) Comment maintenir sur le long terme une émulation collective autour du développement de l'outil numérique une fois que le financement public (obtenu uniquement pour la phase initiale de conception et développement) est terminé ? Quelles formes juridiques et modes d'organisation pour permettre la gouvernance collective d'un outil numérique ?

4. Discussions

4.1. Limites de notre étude

Les résultats présentés proviennent de l'analyse d'un unique cas d'étude d'un projet de développement d'un outil numérique. Pour étayer, nuancer voire contredire certaines de nos conclusions, il serait nécessaire de mener des démarches similaires pour d'autres productions agricoles et d'autres types de réseau. En ce qui nous concerne, même au sein du secteur de la production de légumes, les usagers qui se sont impliqués étaient avant tout des maraîchers diversifiés, pour qui l'enjeu de planification est particulièrement complexe. Certains de nos résultats semblent très liés à ce public singulier. Par exemple, nous avons présenté plus haut que les maraîchers préféreraient avoir une approche systémique plutôt que d'évaluer analytiquement l'impact de leurs pratiques sur tel ou tel bioagresseur pour une culture donnée. Ce résultat se comprend pour des systèmes diversifiés dans lesquels le revenu repose sur une multitude de cultures. Dans ce cadre, la réussite et la maîtrise technique d'une seule culture n'est pas forcément prioritaire. Il est possible que ce constat puisse être nuancé dans des systèmes plus spécialisés. De plus, les usagers qui ont participé aux ateliers l'ont fait car ils montraient une certaine ouverture ou intérêt pour un outil numérique. Nous n'avons donc pas rencontré de maraîchers formellement opposés à l'usage de technologies numériques dans leur activité.

Dans notre analyse, nous nous sommes focalisés sur les décisions de design, les principes et les valeurs qui les sous-tendaient. Nous avons présenté ces éléments de **manière statique** à partir des décisions de design stabilisées à la mise en ligne du premier prototype opérationnel en 2023. Cependant, ces décisions ont fait l'objet d'une dynamique avec des débats, des essais-erreurs, des idées testées et abandonnées et ont été soumises à des jeux d'acteurs. Notre article ne rend pas compte de cette dimension qui fera l'objet d'un prochain article en cours de rédaction.

4.2. Contribution à la littérature et perspectives

Certains articles ou rapports scientifiques ont formulé des suggestions sur les conditions nécessaires pour que des outils numériques soutiennent la transition agroécologique. Cependant, dans la majorité des cas, leurs propos sont génériques et exprimés de manière prospective comme agenda de recherche en articulant conceptuellement des travaux de la littérature scientifique autour de l'innovation numérique et de l'agroécologie (Ajena et al., 2022 ; Bellon-Maurel et al., 2022 ; Leveau et al., 2019). Très peu d'études se basent sur des cas concrets de terrain pour explorer les conditions selon lesquelles les outils numériques peuvent être compatibles avec les attentes des réseaux agricoles portant une vision de l'agroécologie basée sur la reconception des systèmes agricoles. Notre projet contribue à combler ce trou de connaissance et met en lumière des valeurs et principes de design qui sont globalement cohérents avec les propos des articles plus théoriques mentionnés plus haut et également avec les études existant sur le terrain (Hilbeck et al., 2023 ; Wittman et al., 2020).

Notre travail de terrain apporte de nouveaux enseignements intéressants. Par exemple, les articles théoriques mettent en lumière d'un côté la nécessité pour les outils numériques de soutenir l'autonomie décisionnelle des agriculteurs et de valoriser leur expertise. D'un autre côté, ils évoquent le dilemme de modéliser des systèmes agroécologiques hautement complexes, ce qui pourrait nécessiter des modèles



lourds en données avec de grosses capacités de calcul, tout en promouvant la sobriété numérique (c'est-à-dire l'usage réfléchi des ressources dans le développement des outils numériques). Notre travail montre qu'une manière de sortir de ce dilemme est d'articuler ces deux dimensions. **Il suggère ainsi de valoriser l'expertise des usagers en complémentarité de modèles simples n'ayant ni la vocation ni la prétention de prédire des processus biophysiques complexes. Cela alors permet d'aborder des processus complexes en restant sobre et en valorisant l'expertise humaine.**

Les études analysant l'usage des outils numériques par les agriculteurs se focalisent souvent sur deux types d'outils : les technologies numériques de production (des outils conçus pour la prise de décision opérationnelle, comme par exemple l'optimisation de l'usage des intrants) et les technologies numériques d'information et de communication (pour accéder à et échanger des connaissances, par exemple via les médias sociaux (Rose et al., 2016 ; Schnebelin, 2022)). Schnebelin (2022) a montré sur des fermes en agriculture biologiques que les technologies numériques de production avaient tendance à soutenir des trajectoires d'industrialisation alors que les technologies numériques d'information et de communication pouvaient soutenir l'écologisation des pratiques agricoles. L'outil numérique que nous avons développé appartient à une autre catégorie : les outils numériques d'aide à la conception stratégique de systèmes agroécologiques. Notre travail montre que ce type d'outils numériques peut être particulièrement pertinent pour des agriculteurs engagés dans des approches agroécologiques qui reposent sur la (re)conception des fermes (Duru et al., 2015 ; Martin et al., 2013) plutôt que sur l'optimisation des pratiques existantes qui semblent être l'objectif de la majorité des technologies numériques pour la production. Nous pensons donc que les rôles, potentialités et caractéristiques des outils numériques pour soutenir la (re)conception des systèmes agricoles dans une perspective agroécologique mériteraient plus d'attention de la recherche et des acteurs du monde agricole.

La gestion en communs numériques est un point particulièrement intéressant qui a surgi de notre démarche de co-conception mais qui pose de nombreuses questions d'organisation et de gouvernance (cf. Résultats). Etant donné que très peu d'exemples de communs numériques appliqués à l'agriculture sont documentés (Calvet-Mir et al., 2018), cela suscite un besoin fort de recherche pour mieux explorer et relever ces défis. Ces questions seront approfondies dans le cadre du projet CASDAR Démultiplication MESCLUN&CO (2025–2028), au sein duquel plusieurs scénarios de pérennisation seront analysés et comparés afin d'aboutir à une stratégie opérationnelle. Ce travail s'appuiera notamment sur l'étude de trajectoires de succès et d'échec d'autres outils issus de la recherche après l'arrêt des financements publics ayant soutenu leur développement.

5. Conclusion

Notre projet montre qu'il y a de la place pour le développement d'outils numériques adaptés aux besoins et valeurs des usagers impliqués dans des approches agroécologiques. Cependant, nous pensons qu'impliquer les usagers finaux à toutes les étapes du processus de design a été la clé pour identifier leurs besoins spécifiques et intégrer leurs retours pour s'assurer que le développement de l'outil numérique soit en phase avec leurs attentes. Cela rend le processus de développement très chronophage et étalé dans le temps. A cet égard, cela peut être un défi pour des entreprises privées de développer des outils numériques pour l'agroécologie car elles ont souvent besoin d'assurer un retour rapide sur investissement et une rentabilité rapide. Dans notre cas, bien que le projet ait impliqué une start-up privée et un designer indépendant, le processus de co-design a été piloté par des chercheurs d'institutions publiques en partenariat avec des structures de l'accompagnement, de la R&D et de la formation agricoles dont la participation a été soutenue par des fonds publics (ici le programme Ecophyto 2+). Sans la participation de ces acteurs, l'entreprise privée informatique aurait eu certainement plus de difficultés pour accéder aux réseaux agricoles des usagers et pour obtenir la légitimité requise pour collaborer avec eux. Une partenariat public-privé semble donc nécessaire pour de tels projets. Dans notre expérience, ce partenariat a été très riche mais a demandé



de consacrer du temps et de l'attention à construire un langage commun entre les différents participants et considérer les contraintes et objectifs spécifiques de chacun. De même, si notre projet a soulevé un intérêt pour une démarche de communs numériques, les questions d'organisation et de modèle économique associées, si elles ont été précisées, demeurent et seront au cœur de futurs projets en continuité de cette dynamique. En effet, à ce stade, une première version de la Pépinière-Mesclun est accessible en ligne gratuitement. Plusieurs centaines de personnes ont créé un compte et nous avons des retours positifs du terrain. Cependant, un gros travail est envisagé pour démultiplier l'usage de l'outil à l'échelle nationale avec de futurs projets qui viseraient à (i) **enrichir les bases de données** de référence pour faciliter l'usage de l'outil dans différents contextes régionaux (le prototype actuel est calibré uniquement pour le Grand Ouest), (ii) **continuer le développement informatique pour améliorer les fonctionnalités existantes**, (iii) **développer collectivement les usages de la Pépinière comme outil de formation et d'accompagnement** en formant des enseignants et conseillers partenaires, identifier une diversité d'usages de l'outil en situation réelle, organiser des retours d'expérience et coconstruire des supports et ressources d'accompagnement adaptés pour favoriser son large emploi dans une diversité de contextes, (iv) **s'accorder collectivement sur et déployer une organisation en communs numériques**.

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, D, A ; Paul Appert : M, D ; Fabien Moritz et Florence Amardeilh : M, 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 remercions tous les partenaires du projet MESCLUN DURAB et les experts extérieurs ayant participé aux comités de pilotage du projet. Nous tenons également à remercier tous les usagers (porteurs de projet, maraîchers, conseillers, formateurs) qui ont participé aux ateliers de co-conception et de test de l'outil. Nous remercions également le GIS PICLég pour son soutien.



Déclaration de soutien financier

Le projet MESCLUN DURAB est une action pilotée par les Ministères chargés de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT), de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA), de la Santé et de la Prévention, (MSP), et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR), avec l'appui financier de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au plan Écophyto II+. Ce projet a également été co-financé par la Fondation Daniel et Nina Carasso, la Région Bourgogne Franche Comté, la Région Nouvelle Aquitaine et le métaprogramme Métabio d'INRAE.

Références bibliographiques :

- Ajena, F., Bossard, N., Clément, C., Hibeck, A., Tiselli, E., Oehen, B., 2022. Agroecology and Digitalisation: traps and opportunities to transform the food system. https://orgprints.org/id/eprint/44648/1/IFOAMEU_Agroecology_Digitalization_2020.pdf
- Anand, R.V., Dinakaran, M., 2016. Popular agile methods in software development: Review and analysis. *International Journal of Applied Engineering Research* 11, 3433–3437.
- Bellon-Maurel, V., Lutton, E., Bisquert, P., Brossard, L., Chambaron-Ginhac, S., Labarthe, P., Lagacherie, P., Martignac, F., Molenat, J., Parisey, N., 2022. Digital revolution for the agroecological transition of food systems: A responsible research and innovation perspective. *Agricultural Systems* 20, 103524.
- Calvet-Mir, L., Benyei, P., Aceituno-Mata, L., Pardo-de-Santayana, M., López-García, D., Carrascosa-García, M., Perdomo-Molina, A., Reyes-García, V., 2018. The contribution of traditional agroecological knowledge as a digital commons to agroecological transitions: The case of the CONECT-e platform. *Sustainability* 10, 3214.
- Cash, D.W., Clark, W.C., Alcock, F., Dickson, N.M., Eckley, N., Guston, D.H., Jäger, J., Mitchell, R.B., 2003. Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100, 8086–8091.
- Cerf, M., Jeuffroy, M. H., Prost, L., and Meynard, J. M. (2012). Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 899-910.
- Di Bianco, S., Ghalli, M., 2022. Outils numériques: enjeux de coordination d'acteurs, de partage et de valorisation de la donnée. *Enjeux Numériques, Annales des Mines*, 19, 53.
- Dulong De Rosnay, M., Stalder, F., 2020. Digital commons. *Internet Policy Review*. 9 (4), 15.
- Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.-A., Justes, E., Journet, E.-P., Aubertot, J.-N., Savary, S., Bergez, J.-E., Sarthou, J.P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 1259-1281.
- Hilbeck, A., Tiselli, E., Crameri, S., Sibuga, K.P., Constantine, J., Shitindi, M.J., Kilasara, M., Churi, A., Sanga, C., Kihoma, L., Brush, G., Stambuli, F., Mjunguli, R., Burnier, B., Maro, J., Mbele, A., Hamza, S., Kissimbo, M., Ndee, A., 2023. ICT4 Agroecology: a participatory research methodology for agroecological field research in Tanzania. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 48(4), 465-500.
- Hill, S. B., MacRae, R. J., 1996. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of sustainable agriculture* 7(1), 81-87.
- Lacombe, C., Couix, N., & Hazard, L., 2018. Designing agroecological farming systems with farmers: A review. *Agricultural systems*, 165, 208-220.
- Leveau, L., Bénel, A., Cahier, J.-P., Pinet, F., Salembier, P., Soullignac, V., Bergez, J.-E., 2019. Information and communication technology (ICT) and the agroecological transition. *Agroecological transitions: from theory to practice in local participatory design*, 263–287.
- Martin, G., Martin-Clouaire, R., Duru, M., 2013. Farming system design to feed the changing world. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 131–149.



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, 143-153.

Miles, M.B., Huberman, A.M., 1984. *Qualitative data analysis: a sourcebook of new methods*. Beverly Hills, Calif., Etats-Unis, Royaume-Uni, Inde.

Rose, D.C., Sutherland, W.J., Parker, C., Lobley, M., Winter, M., Morris, C., Twining, S., Ffoulkes, C., Amano, T., Dicks, L.V., 2016. Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems* 149, 165–174.

Schnebelin, É., 2022. Linking the diversity of ecologisation models to farmers' digital use profiles. *Ecological Economics* 196, 107422.

Wittman, H., James, D., and Mehrabi, Z. (2020). Advancing food sovereignty through farmer-driven digital agroecology. *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura*, 47(3), 235-248.

Zahm, F., Barbier, J. M., Cohen, S., Boureau, H., Girard, S., Carayon, D., ... & Guichard, L., 2019. IDEA4: une méthode de diagnostic pour une évaluation clinique de la durabilité en agriculture. *Agronomie, Environnement et Sociétés* 9(2), 39-51.

Pour citer cet article : Kevin Morel, Paul Appert, Fabien Moritz, Florence Amardeilh. Quel numérique pour l'agroécologie ? Enseignements de la co-conception de la Pépinière-Mesclun, une application en ligne pour les maraîchers. *Innovations Agronomiques*, 2026, 110, pp.81-93. [10.17180/ciag-2026-vol110-art07](https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol110-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.