



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.

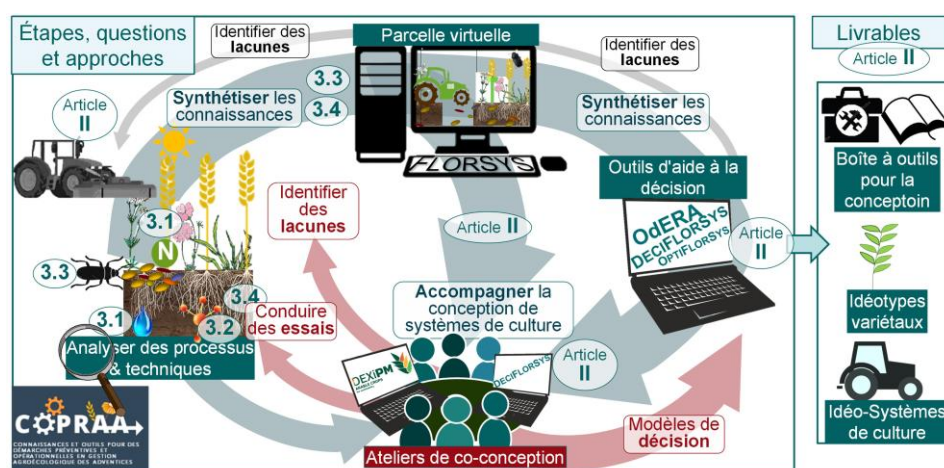


Figure 1 : Organisation des étapes du projet COPRAA, avec les questions, approches, outils et livrables. Les numéros renvoient aux sections de cet article qui illustre des exemples de ces étapes. « Article II » fait référence

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.

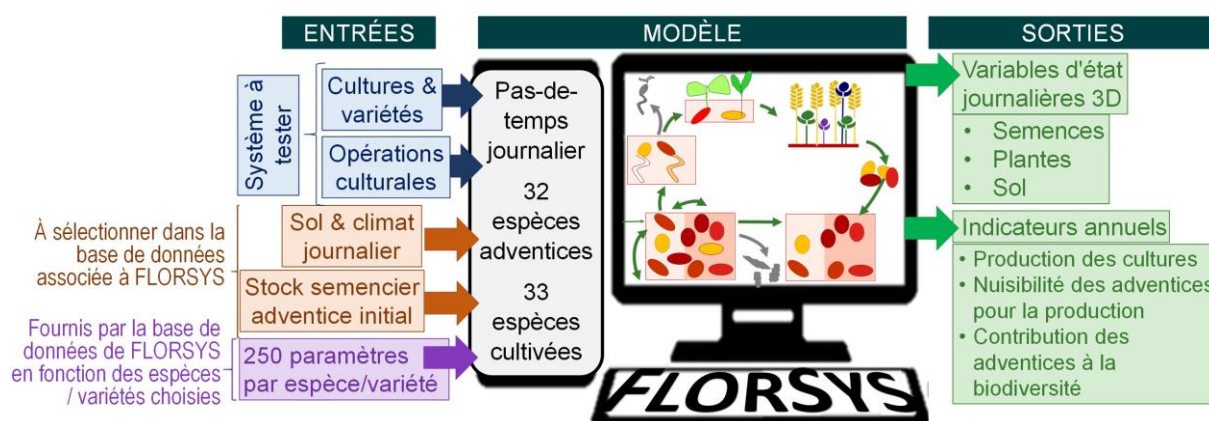


Figure 2 : Le modèle « parcelle virtuelle » FLORSYS simule le développement et la croissance des cultures et des adventices à partir du système de culture, de la météo et du sol, avec une représentation mécaniste des processus biophysiques au jour le jour et en 3D individu-centré (Colbach et al. 2019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