innovations agronomiques

n°101 / Avril 2025



Connaissances et outils

pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices

Ce volume fait suite au Carrefour de l'innovation INRAE, organisé par Inrae, Agreenium et l'Institut Agro Dijon, les 26 et 27 novembre 2024 de restitution du projet sur les Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices (COPRAA).

/// Crédit photo : Aurélie BAQUET / INRAE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

Innovations Agronomiques
Agriculture / Alimentation / Environnement

Innovations Agronomiques

Volume 101 – Avril 2025

Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices

Ce volume fait suite au carrefour de l'innovation INRAE, organisé par INRAE, Agreenium et l'Institut Agro Dijon, les 26 et 27 novembre 2024 de restitution du projet sur les Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices (COPRAA).

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 : Nathalie Colbach, INRAE ; Aurélie Baquet, INRAE ; Frédérique Angevin, INRAE ; Delphine Moreau, INRAE ; Marie Flament, Agro-Transfert-RT

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) : 978-2-7380-1477-1

ISBN (ePub) : 978-2-7380-1478-8

DOI : https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol101

Pour citer ce numéro : Collectif. (2025). *Innovations agronomiques, volume 101, avril 2025. Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices* (Version 1). Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement. https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol101

Photo de couverture : Aurélie Baquet / INRAE

Licence : CC BY 4.0

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

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

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

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

Sommaire

Production de connaissances sur les processus et modélisation

Quentin COURNAULT, Nathalie COLBACH et Delphine MOREAU, 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 **https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art01**

Solèmne SKORUPINSKI, Hugues BUSSET, Jacques CANEILL, Delphine MOREAU, Brice MOSA, Eugène MOTTON et Nathalie COLBACH, 2025 - **Effets des opérations de travail du sol sur la fragmentation des racines du chardon des champs (Cirsium arvense).** Innovations Agronomiques 101, 16-27 **https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art02**

Delphine MOREAU, Inès MAHE, Bruno CHAUVEL, Nathalie COLBACH, Stéphane CORDEAU, Aurélie GFELLER et Antje REISS, 2025 - **Le rôle de l'allélopathie dans la régulation des adventices : entre rêve et réalité.** Innovations Agronomiques 101, 28-37 **https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art03**

Laurène PERTHAME, Sandrine PETIT et Nathalie COLBACH, 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
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art04

Evaluation de techniques innovantes avec des essais réels et virtuels (simulations)

Stéphane CORDEAU, Alicia ROUGE, Guillaume ADEUX, Hugues BUSSET, Céline COLOMBET, Rodolphe HUGARD, Emilien LAURENT, Juliette MARTIN, Annick MATEJICEK, Brice MOSA, Eric VIEREN, Delphine MOREAU et Jean-Philippe GUILLEMIN, 2025 - **Rôle des couverts d'interculture et de leurs modes de destruction dans la régulation des adventices.**
Innovations Agronomiques 101, 48-59
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art05

Nathalie COLBACH, Judith BURSTIN et Delphine MOREAU, 2025 - **Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : Exemple du pois associé au blé.**
Innovations Agronomiques 101, 60-73
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art06

Pierre LEBRETON, Aurélie BAQUET, Laurent BEDOUSSAC, Catherine BONNET, Etienne-Pascal JOURNET, Éric JUSTES et Nathalie COLBACH, 2025 - **Motifs de semis, traits et proportions d'espèces pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations légumineuse-céréale.**
Innovations Agronomiques 101, 74-84
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art07

Stéphane CORDEAU, Bastien BOQUET, Philippe CHAMOY, Annick MATEJICEK, Brice MOSA, Bertrand OMON et Violaine DEYTIEUX, 2025 - **Effet de l'écimage des adventices sur leurs nuisibilités.**
Innovations Agronomiques 101, 85-93
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art08

Nathalie COLBACH et Stéphane CORDEAU, 2025 - **Gérer les adventices sans travail du sol ni herbicides n'est pas possible dans les systèmes de grande culture.**
Innovations Agronomiques 101, 94-106
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art09

Jeanne DELSAUT, Bastien BOQUET, Jean-Marc MEYNARD, Jérôme PERNEL et Marie FLAMENT, 2025 - **Vers une meilleure maitrise du laiteron des champs en Hauts-de-France.**
Innovations Agronomiques 101, 107-118
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art10

Développement d'outils d'aide à la décision

Nathalie COLBACH, Nicolas CAVAN, Marie FLAMENT, Thibault MAILLOT, Delphine MOREAU, Jérôme PERNEL, Wilfried QUEYREL et Jean VILLERD, 2025 - **La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides.**
Innovations Agronomiques 101, 119-134
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art11

Marianne CERF, Marie-Hélène JEUFFROY, Jean-Marc MEYNARD, Thibault LEFEUVRE, Wilfried QUEYREL et Lorène PROST, 2025 - **Une analyse des situations d'usage pour concevoir des outils d'aide au changement de pratiques.**
Innovations Agronomiques 101, 135-148
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art12

Thibault MAILLOT, Mathieu CHANIS, Jean VILLERD, Wilfried QUEYREL, Laurène PERTHAME, Nicolas CAVAN, Jean-Baptiste VIOIX et Nathalie COLBACH, 2025 - **OPTIFLORSYS : Un outil pour aider à la conception de stratégies agroécologiques de gestion d'adventices.**

Innovations Agronomiques 101, 149-162
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art13

Diagnostic et conception participative de systèmes de culture

Marie FLAMENT, Jérôme PERNEL et Pierre-Yves BERNARD, 2025 - **Diagnostic sociotechnique du salissement parcellaire en région Hauts-de-France.**
Innovations Agronomiques 101, 163-173
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art14

Nicolas CAVAN, Jeanne ALEXANDRE, Claire GOETZ, Alice NIDRICHE, Lucille TRINH-QUY, Nathalie COLBACH, Wilfried QUEYREL et Frédérique ANGEVIN, 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
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art15

Wilfried QUEYREL, Alice NIDRICHE, Thibault LEFEUVRE, Nathalie COLBACH, Nicolas CAVAN et Frédérique ANGEVIN, 2025 - **Elaboration d'un guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice.**
Innovations Agronomiques 101, 186-200
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art16

Bertrand OMON, Nicolas CAVAN, Nathalie COLBACH et Frédérique ANGEVIN, 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
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art17

Christian HUYGHE, 2025 - Conclusions du séminaire Copraa.
Innovations Agronomiques 101, 217-223
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art18

Articles additionnels

Gentiane MAILLET, Arnaud DUFILS, René BAUMONT, Sonia RAMONTEU et Frédérique ANGEVIN, 2025 - **L'introduction d'animaux en vergers et en vignes : une solution agroécologique pour gérer les adventices ?**
Innovations Agronomiques 101, 224-240
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art19

Mathilde DIONISI, Marie-Hélène JEUFFROY, Louise PERRISSEAU, Priscila DUARTE MALANSKI et Jean-Marc MEYNARD, 2025 - **Capitaliser les pratiques d'agriculteurs innovants pour nourrir le conseil : exemple de l'abandon du glyphosate en grande culture.**
Innovations Agronomiques 101, 241-259
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art20

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

Quentin COURNAULT[1,2,3], Nathalie COLBACH[1], Delphine MOREAU[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

[2] Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

[3] AgroParisTech, 91123 Palaiseau, France

Correspondance : delphine.moreau@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art01

Résumé

FLORSYS est un modèle qui simule la dynamique pluriannuelle des adventices en grandes cultures en fonction du système de culture et pédoclimat. Il est utilisé pour évaluer des systèmes de culture en termes d'impacts des adventices sur la production et la biodiversité. Sa version actuelle prend en compte la compétition pour la lumière et pour l'azote entre plantes, mais pas pour l'eau, ce qui constitue un frein à l'utilisation du modèle dans un contexte de changement climatique, où la limitation en eau devrait devenir plus fréquente. Cet article présente la construction d'un module de compétition plante–plante pour l'eau pour FLORSYS, ancré sur ses variables préexistantes. Le prélèvement d'eau par les plantes y est fonction de la disponibilité en eau du sol, de la demande en eau de la plante ainsi que de la demande en eau des plantes voisines. En cas de prélèvement insuffisant, le module représente les impacts du stress hydrique sur la morphologie des plantes et la photosynthèse, en conjonction avec les stress azoté et lié à l'ombrage. Une fois évaluée, la nouvelle version de FLORSYS sera utilisée pour identifier des règles qui guideront la co-conception de systèmes durables et résilients face au changement climatique.

Mots-clés : Changement climatique, Modélisation mécaniste, Stress hydrique, Traits morphologiques, Compétition cultures-adventices, Diversité interspécifique

Abstract: Modelling crop–weed competition for water to design agroecological weed management strategies resilient to climate change

The FLORSYS model simulates the multi-annual weed dynamics in arable crops from cropping system and pedoclimate. It is used as a virtual field to evaluate cropping systems in terms of weed impacts on crop production and biodiversity. Its current version includes plant–plant competition for light and nitrogen, but not yet for water, which limits its use in the context of climate change, where lack of water is assumed to become more frequent. This article presents the construction of a plant–plant water competition submodel for FLORSYS, anchored on its pre-existing variables. In the submodel, plant water uptake is a function of soil water availability, plant water demand and the water demand of neighbouring plants. In the case of insufficient uptake, the submodel represents the impact of water stress on plant morphology and photosynthesis, in conjunction with nitrogen and shade stress. Once evaluated, the new FLORSYS version will be used to identify rules for guiding the co-design of sustainable and resilient systems to climate change.

Keywords: Climate change, Mechanistic modelling, Water stress, Morphological traits, Crop–weed competition, Interspecies diversity

1. Introduction

Les adventices concurrencent la culture principale pour les ressources indispensables à la croissance (lumière, minéraux, eau). Elles représentent la première cause biotique de pertes de rendement en grandes cultures (Oerke, 2006). La gestion de ces adventices est aujourd'hui confrontée à deux défis : d'une part la nécessité de réduire l'usage d'herbicides pour des raisons environnementales et sanitaires (Comoul and Mougin, 2024), et d'autre part l'impact du changement climatique. En effet, ce dernier va réduire la disponibilité future d'une ressource-clé pour les plantes : l'eau du sol (Fatima *et al*., 2022). D'une part, l'augmentation des températures induit une plus forte transpiration végétale et donc une hausse de la demande en eau par les plantes (Dinpashoh *et al*., 2019). D'autre part, la modification du cycle annuel des précipitations se caractérise par (1) une diminution de l'occurrence et (2) une intensification des pluies, en particulier sur les sols secs (Seneviratne *et al*., 2010). Cela entraîne une diminution des pluies efficaces responsables du remplissage de la réserve utile en eau pour les plantes, et donc une baisse de l'offre en eau.

La raréfaction de l'eau pourra amplifier la compétition cultures–adventices pour l'eau et leurs besoins en eau ne seront plus satisfaits (Zimdahl, 2004). Le stress hydrique résultant pourra impacter leur croissance et modifier leur morphologie selon les espèces et les stades de développement (ex : diminution de la surface foliaire, augmentation de l'allocation de biomasse aux racines) (Farooq *et al*., 2009 ; Moreau *et al*., 2022).

La gestion des adventices doit donc être entièrement repensée. D'une part, les herbicides doivent être remplacés par une combinaison de techniques culturales essentiellement préventives et à effet partiel. D'autre part, ces combinaisons doivent réduire la compétition cutures–adventices pour l'eau et/ou rendre les cultures moins sensibles au stress hydrique. Pour tester une large gamme de combinaisons et identifier celles permettant de répondre à ces objectifs, nous avons besoin de modèles des effets des systèmes de culture, en interaction avec le pédoclimat, sur le complexe cultures–adventices.

FLORSYS est aujourd'hui le modèle le plus complet en termes de techniques culturales, d'interactions cultures–adventices et d'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité (Colbach *et al*., 2019a, 2021, 2024 ; Moreau *et al*., 2021). Ce modèle a déjà été utilisé comme outil d'aide à la (re)conception de systèmes de culture innovants (Omon *et al*., 2024 ; Queyrel *et al*., 2023) et d'anticipation de la nuisibilité adventice future (Cavan *et al*., 2020). Cependant, FLORSYS ne prend pas en compte l'ensemble des mécanismes importants pour le changement climatique, en particulier la compétition pour l'eau, et ne peut donc pas encore entièrement évaluer les conséquences du changement climatique pour la gestion des adventices.

Par conséquent, l'objectif de cet article est de proposer un nouveau module pour FLORSYS qui représente la compétition plante–plante pour l'eau ainsi que ses conséquences sur la morphologie et la croissance des plantes adventices et cultivées.

2. Cadre de modélisation

2.1. FLORSYS : un modèle mécaniste simulant la flore adventice et ses conséquences en grande culture

FLORSYS est un modèle mécaniste qui simule, au pas de temps quotidien, les effets des opérations culturales sur les processus biophysiques déterminant la dynamique pluriannuelle des cultures et des adventices et les conséquences sur la production agricole et la biodiversité (Colbach *et al*., 2019a,

2021). FLORSYS prend en entrée (1) le stock initial de semences d'adventices (généralement estimé à partir de statistiques régionales), (2) le pédoclimat journalier (jeux de données historiques de Météo France ou projections climatiques) et (3) les caractéristiques du système de culture testé (espèces et variétés, rotations, opérations culturales). Le modèle simule ensuite des variables d'état quotidiennes décrivant le sol (température, teneur en eau, etc.), les semences de cultures et d'adventices (viabilité, dormance, etc.) et les plantes (biomasse, surface foliaire, hauteur, etc.). Le couvert est décrit en 3D et de manière individu-centré, c'est-à-dire que la position et la morphologie de chaque plante adventice ou cultivée est représentée dans la parcelle virtuelle en 3D. Pour simplifier la comparaison des systèmes de culture testés, le modèle fournit aussi en sortie une série d'indicateurs évaluant la production des cultures (rendement), l'impact des adventices sur cette production (pertes de rendement, salissement des champs, etc.) et sur la biodiversité (offre trophique pour les abeilles, etc.).

La version actuelle de FLORSYS inclut déjà la compétition plante–plante pour la lumière (Munier-Jolain *et al*., 2013) et l'azote (Moreau *et al*., 2021). Ces processus sont simulés à l'échelle de voxels (pixels 3D), qui constituent le grain spatial (unité de base) de FLORSYS (**Figure 1**). FLORSYS intègre aussi l'effet du potentiel hydrique du sol sur la germination-levée des semences, mais pas la compétition plante–plante pour l'eau après la levée des plantes.

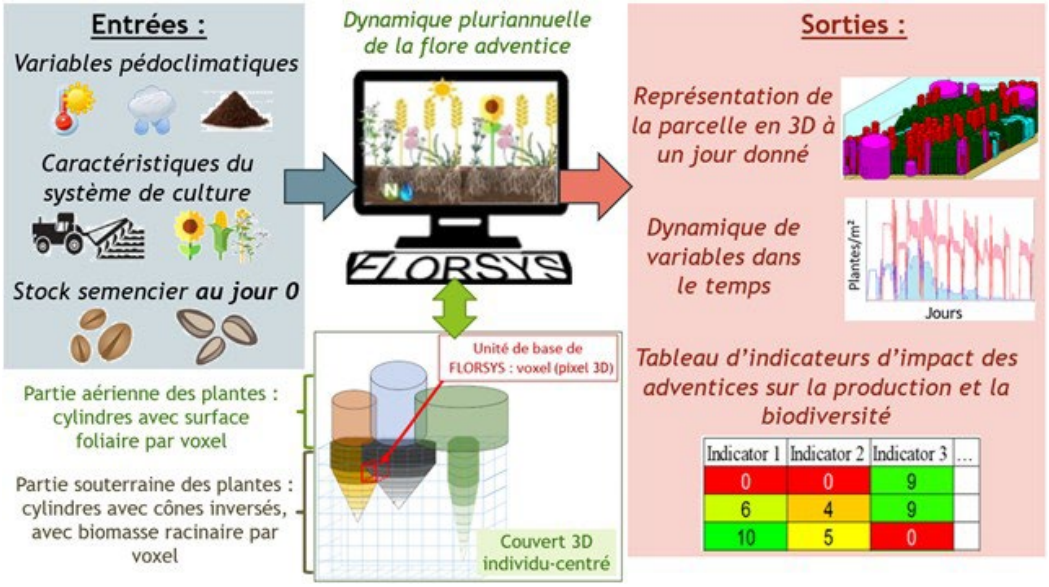


Figure 1 : Représentation schématique du fonctionnement de FlorSys (Colbach *et al*., 2021). FlorSys simule le cycle de vie de chaque plante (cultivée et adventice) dans la parcelle : c'est un modèle individu-centré. Les plantes sont représentées de manière simplifiée et peuvent être visualisées en 3D. Le grain spatial de base dans FlorSys est le voxel (pixel 3D), à l'échelle duquel les processus de compétition pour les ressources sont modélisés.

2.2. Principes pour modéliser la compétition plante-plante pour l'eau

Dans leur étude, Aschehoug *et al*. (2016) distinguent le mécanisme de compétition pour l'eau et les conséquences de la compétition pour l'eau sur la croissance des plantes. Le nouveau module pour FLORSYS est construit sur cette base avec deux parties imbriquées (**Figure 2**). Il représente (1) l'état hydrique du sol et le prélèvement de l'eau par les plantes à l'échelle du voxel pour calculer l'éventuel stress hydrique subi par la plante et (2) les conséquences du stress induit par la compétition pour l'eau sur la croissance à l'échelle de la plante, en interaction avec les effets du stress azoté et de l'ombrage, déjà implémentés dans FLORSYS (Moreau *et al*., 2021 ; Munier-Jolain *et al*., 2013).

La modélisation suit trois principes :

1. Ancrer le nouveau module de compétition pour l'eau sur les variables pré-existantes dans FLORSYS et le connecter avec les autres modules de FLORSYS (phénologie, azote, lumière entre autres) ;
2. Lorsque cela est possible, adapter des formalismes existants dans d'autres modèles ou dans d'autres modules de FLORSYS (par exemple le module de compétition pour l'azote) ; sinon, réaliser des expérimentations en conditions contrôlées et définir de nouveaux formalismes adaptés à nos besoins ;
3. Construire un module générique, c'est-à-dire dont les équations sont valides pour l'ensemble des espèces et des stades phénologiques inclus dans FLORSYS. Les espèces sont alors distinguées par différentes combinaisons de valeurs de paramètres.

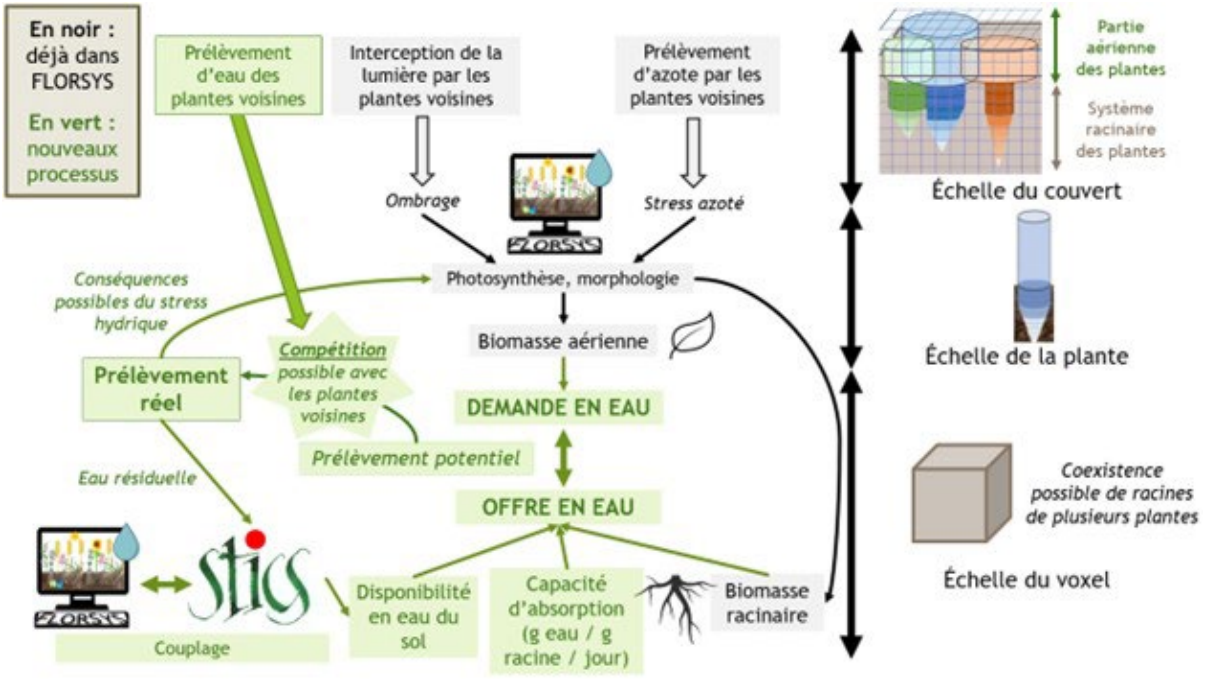


Figure 2 : Organisation multi-échelles (voxel, plante, canopée) du module de compétition pour l'eau (adapté de Cournault *et al*. (2024b)).

3. Comment modéliser l'offre, la demande et le prélèvement de l'eau ?

Chaque jour, le nouveau module calcule la quantité d'eau totale prélevée par chaque plante dans la parcelle virtuelle FLORSYS en sommant les quantités prélevées dans les voxels de sol où elle possède des racines. Dans chaque voxel, la quantité prélevée dépend de (1) l'eau disponible pour la plante et (2) de la demande de la plante et (3) de l'éventuelle compétition qui peut subvenir entre les plantes qui y possèdent des racines.

3.1. L'offre en eau

Dans un voxel, l'eau disponible pour une plante dépend de l'offre en eau du sol ainsi que de la quantité maximale d'eau que ses racines lui permettent de récupérer. Il n'est pas nécessaire de recréer des formalismes pour simuler l'offre en eau du sol, car ce mécanisme est déjà bien représenté dans de nombreux modèles. Nous avons donc couplé le module de compétition pour l'eau à un modèle mécaniste de culture (STICS, Brisson *et al*., (2008)), dont le module sol calcule l'offre journalière en eau

des couches de sol en simulant les principaux mécanismes hydrologiques (ruissellement, infiltration, percolation) à partir de différentes variables (précipitations, type de sol…). L'eau présente dans les couches de sol STICS est alors répartie dans les voxels FLORSYS, selon le schéma présenté en **Figure 3**.

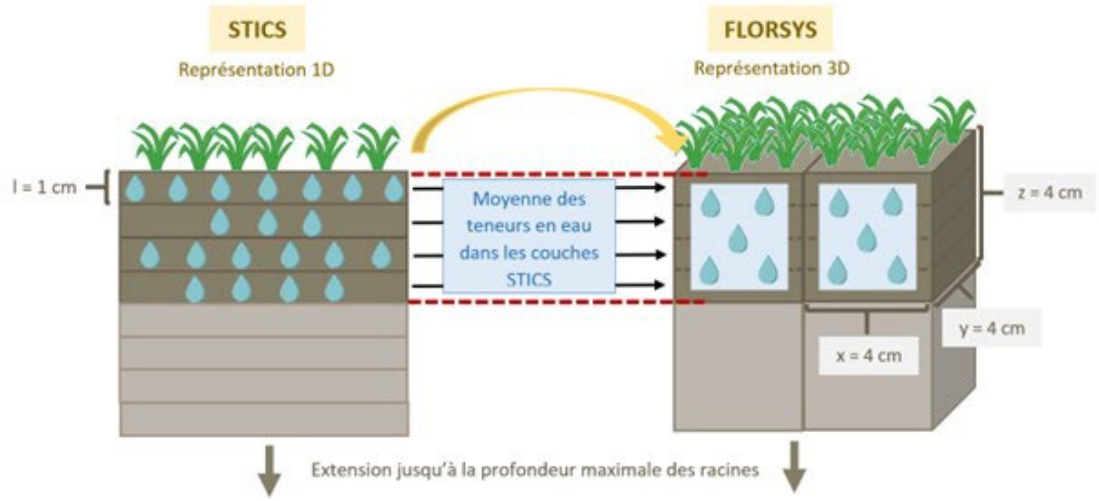


Figure 3 : Répartition de l'eau des couches STICS dans les voxels FlorSys (adapté de Cournault *et al.*, 2023). Exemple pour des voxels de dimension 4 × 4 × 4 cm. Le nombre de gouttes d'eau correspond à la concentration en eau de chaque couche STICS. Tous les voxels FlorSys d'une même couche z contiennent la même teneur en eau.

Cependant, l'intégralité de l'offre en eau du voxel n'est pas forcément disponible pour la plante. Sa capacité à accéder à cette eau dépend de la biomasse racinaire qu'elle a dans le voxel (calculée chaque jour dans FLORSYS) et de la capacité d'absorption de ses racines (en g eau / g racine / jour). Ce paramètre a été calculé pour 12 espèces de FLORSYS, dans des expérimentations en conditions contrôlées, en quantifiant la quantité d'eau absorbée par les racines de plantes cultivées en pots individuels, en conditions hydriques optimales (travaux de Couchoud *et al.*, 2020 ; Cournault *et al.*, 2024). Pour les espèces non testées en expérimentation, ce paramètre est estimé sur la base du clade d'appartenance (monocotylédones / dicotylédones). Les dicotylédones ont alors une capacité d'absorption racinaire 2,5 fois plus importante que les monocotylédones dans FLORSYS.

3.2. La demande en eau

La demande en eau d'une plante est calculée chaque jour en répartissant la demande en eau globale de la canopée aux plantes individuelles, à l'aide de formalismes adaptés du modèle de croissance d'espèces prairiales « Virtual Grassland » (Louarn and Faverjon, 2018).

La demande de la canopée dépend de trois variables principales : l'indice de surface foliaire (cm² feuilles / cm² sol, prédit par FLORSYS), l'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith (mm, une variable d'entrée provenant de relevés météorologiques ou de projections climatiques futures) et le coefficient cultural de la canopée. Ce coefficient ajuste l'évapotranspiration potentielle selon l'abondance relative des espèces présentes dans la parcelle (Allen *et al.*, 1998). La demande de la canopée est ensuite répartie sur les différentes plantes de la parcelle au prorata du rayonnement qu'elles interceptent au cours de la journée (Louarn and Faverjon, 2018) et prédit par FLORSYS. Enfin, la demande en eau totale de la plante est distribuée dans les voxels de sol en fonction de la biomasse de racines qu'elle y possède, ainsi que selon l'offre en eau des voxels (Maurel and Nacry, 2020) : à biomasse racinaire égale dans deux voxels de sol, une plante cherchera à prélever davantage dans le voxel qui contient le plus d'eau.

3.3. Prélèvement et compétition éventuelle pour l'eau

La confrontation de l'eau disponible et de la demande en eau permet de déterminer dans chaque voxel de sol la quantité d'eau que chaque plante pourrait récupérer au maximum : c'est le prélèvement potentiel. Cependant, il existe des situations où plusieurs plantes possèdent des racines dans un même voxel dont l'eau disponible ne permet pas de satisfaire l'ensemble des demandes : il y a alors compétition pour la ressource (Zimdahl, 2004). Dans ce cas, l'eau du voxel est répartie au prorata des prélèvements potentiels de chaque plante dans le voxel. Sur le modèle de ce qui est fait pour l'azote (Moreau *et al*., 2021), une boucle de compensation sur les voxels est réalisée suite à la première boucle de prélèvements, afin de réattribuer une partie de l'eau résiduelle dans certains voxels aux plantes qui y possèdent des racines et dont la demande n'a pas été totalement satisfaite. Suite à ces deux boucles, la quantité d'eau totale absorbée par chaque plante de la parcelle peut être calculée.

3.4. Stress hydrique

La plante subit un stress hydrique si le prélèvement d'eau ne permet pas de satisfaire la demande. Ce stress peut être causé par (1) de la compétition ardue avec les plantes voisines, (2) une quantité insuffisante de pluies efficaces (qui remplissent la réserve utile en eau pour les plantes) ou (3) un système racinaire insuffisant pour faire face à la demande, même en l'absence de plantes voisines.

Pour chaque jour de simulation et pour chaque plante, le modèle calcule un indice de stress hydrique qui affectera la photosynthèse et la morphologie de la plante. Cet indice correspond à la proportion de la demande en eau qui n'a pas été satisfaite. Pour tenir compte des stress passés, l'indice est calculé sur la durée de vie de la plante (depuis l'émergence), avec un poids plus important donné aux limitations en eau les plus récentes, selon le même principe que pour l'indice d'ombrage (Munier-Jolain *et al*., 2014). En cohérence avec l'indice d'ombrage et l'indice de stress azoté déjà introduits dans FLORSYS (Moreau *et al*., 2021 ; Munier-Jolain *et al*., 2013), les valeurs de l'indice de stress hydrique varient de 0 (la demande en eau de la plante est satisfaite) à 1 (il n'y a pas de prélèvement d'eau pour satisfaire la demande de la plante).

4. Conséquences du stress hydrique sur la morphologie et la photosynthèse

4.1. Formaliser la réponse morphologique des plantes au stress hydrique

4.1.1. Principe de l'expérimentation

La compétition pour l'eau conduit certaines plantes à ne pas prélever à hauteur de leur demande et donc à un stress hydrique. Si certaines études montrent (1) que le stress hydrique a des conséquences sur la morphologie des plantes et (2) que cette plasticité morphologique dépend des espèces et des stades (Moreau *et al*., 2022), peu d'études fournissent des données sur les adventices (Chahal *et al*., 2018 ; Zhou *et al*., 2020) et à des stades phénologiques avancés (végétatif / reproducteur) (Singh *et al*., 2022). Par conséquent, notre équipe a réalisé des expérimentations en conditions contrôlées (Cournault *et al*., 2024a ; Moreau *et al*., 2022) afin de :

- suivre la réponse morphologique d'une gamme de cinq espèces adventices et deux espèces cultivées (décrites dans le Tableau 1) au stress hydrique, en mesurant quatre traits morphologiques des plantes soumises à différents niveaux de stress hydrique ;
- traduire ces résultats en une équation prédisant cette réponse morphologique en fonction du stress et de deux paramètres spécifiques de la combinaison trait × espèce × stade ;
- caractériser la variabilité inter-espèces et inter-stades des réponses.

Tableau 1 : Caractéristiques des espèces testées (adapté de Cournault *et al*. (2024a)). Les espèces testées sont fréquemment retrouvées dans les grandes cultures françaises et peuvent lever au cours d'une ou plusieurs saisons (d'après Gardarin *et al*. (2010)), abrégées comme suit : A = automne ; H = hiver ; P = printemps ; E = été. La saison de levée principale est écrite en gras.

Code espèce (EPPO)	Nom commun de l'espèce	Clade	Famille	Statut	Saison de germination
ABUTH	Abutilon de Théophraste	Dicotylédone	Malvacée	Adventice	**P** - E
ALOMY	Vulpin des champs	Monocotylédone	Poacée	Adventice	**A** – H - P
AVEFA	Folle avoine	Monocotylédone	Poacée	Adventice	A – H - **P**
BRSNN	Colza (variété Kador)	Dicotylédone	Brassicacée	Culture	**A**
GERDI	Géranium à feuilles découpées	Dicotylédone	Geraniacée	Adventice	**A** - P
MATIN	Matricaire inodore	Dicotylédone	Asteracée	Adventice	A – H – P - E
TRZAW	Blé tendre d'hiver (variété Calumet)	Monocotylédone	Poacée	Culture	**A** - H

4.1.2. Traits morphologiques mesurés

Les quatre traits morphologiques mesurés sont utilisés dans FLORSYS et jouent un rôle clé dans la compétition pour la lumière (Colbach *et al*., 2019b) et l'azote (Perthame *et al*., 2022). Deux traits décrivent la manière dont les plantes répartissent la biomasse entre les différents compartiments (traits d'allocation de la biomasse) :

- le ratio biomasse racinaire / biomasse totale (Root Biomass Ratio RBR, en g/g) reflète la proportion de biomasse allouée aux racines et donc la capacité à explorer le sol pour y prélever eau et nutriments. Plus sa valeur est élevée, plus les plantes favorisent la croissance des racines au détriment de celle des parties aériennes ;
- le ratio biomasse foliaire / biomasse aérienne (Leaf Biomass Ratio LBR, en g/g) reflète la proportion de biomasse aérienne allouée aux feuilles et donc l'interception de la lumière. Plus sa valeur est élevée, plus les plantes favorisent la production de la surface d'interception de la lumière aux dépens de celle des tiges.

Deux autres traits décrivent la façon dont la biomasse est transformée en volume :

- le ratio surface foliaire / biomasse foliaire, également appelé surface foliaire spécifique (Specific Leaf Area SLA, en cm²/g), reflète la capacité à traduire la biomasse foliaire en surface foliaire pour l'interception de la lumière. Des valeurs élevées indiquent de grandes feuilles par unité de biomasse foliaire (et donc des feuilles fines), tandis que des valeurs faibles indiquent des feuilles plus petites par unité de biomasse foliaire (et donc des feuilles épaisses) ;
- le ratio hauteur / biomasse aérienne (Height Biomass Ratio HBR, en cm/g) reflète la capacité à croître en hauteur à partir d'une biomasse aérienne donnée et, par conséquent, à dominer la canopée pour l'interception de la lumière. Plus ce ratio est élevé, plus les plantes sont hautes pour une biomasse aérienne donnée.

4.1.3. Estimation des paramètres de réponse des espèces au stress hydrique

Pour chaque combinaison de trait × espèce × stade, une régression non-linéaire à deux paramètres a été ajustée aux valeurs de traits mesurées en fonction d'un indice de stress hydrique basé sur la physiologie de la plante. La figure 4 montre un exemple de régression pour la surface foliaire spécifique

(SLA). Plus le stress hydrique augmente, plus la surface foliaire spécifique diminue. En d'autres termes, les feuilles deviennent plus petites et plus épaisses.

Au final, quatre équations à deux paramètres caractérisent la réponse des traits morphologiques des espèces au stress hydrique dans le module de compétition pour l'eau rajouté à FLORSYS. L'un des paramètres ($SLA0_{sx}$ pour la SLA dans la figure 4) correspond à la morphologie attendue pour la combinaison espèce × stade en l'absence de stress hydrique, et l'autre ($SLA_resist_{W_{sx}}$ pour la SLA) est le paramètre de réponse de la combinaison espèce × stade au stress hydrique. Pour la SLA, plus la résistance est élevée, plus l'espèce est capable de maintenir des feuilles larges et fines (qui transpirent plus) en cas de manque d'eau.

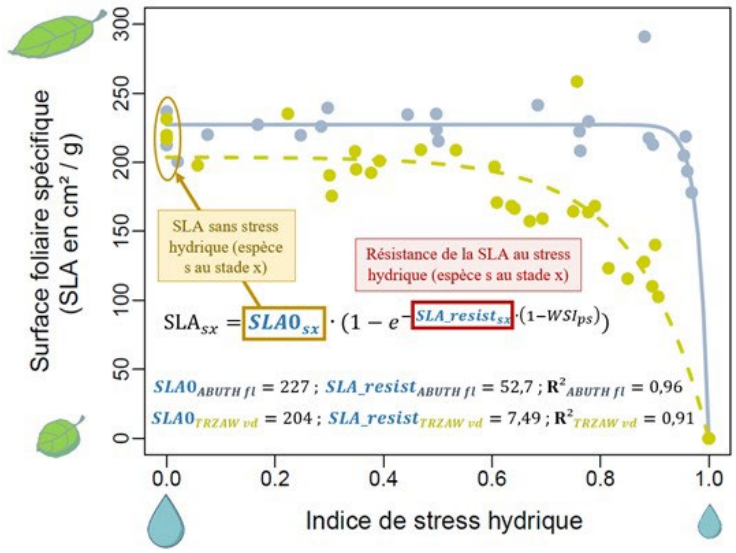


Figure 4 : Formalisation de la réponse de la surface foliaire spécifique au stress hydrique pour FlorSys, sur l'exemple de l'espèce Abutilon theophrasti (ABUTH) au stade floraison (fl) et blé tendre d'hiver (TRZAW) au stade début végétatif (vd). L'indice de stress hydrique prend des valeurs allant de 0 (pas de stress hydrique) à 1 (stress hydrique maximal). Chaque point correspond à une plante. Dans l'équation, « WSI_{ps} » est l'indice de stress hydrique (sans dimension) pour la plante p au stade s.

4.2. Le stress hydrique induit des tendances générales de réponse morphologique chez les plantes

Sur l'ensemble des espèces et stades étudiés, les traits morphologiques répondent de différentes manières face à l'augmentation du stress hydrique (**Tableau 2**).

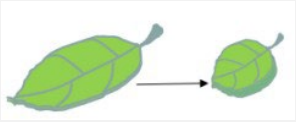
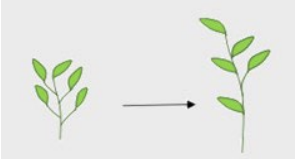
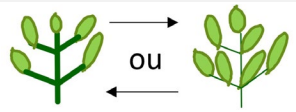
Les deux traits de « transformation de la biomasse en volume » sont très sensibles au stress hydrique. (1) La surface foliaire spécifique (SLA) est le trait morphologique le plus plastique face à l'augmentation du stress hydrique. À biomasse foliaire constante, les feuilles voient leur surface foliaire diminuer (elles deviennent plus petites et plus épaisses) à mesure que le stress augmente : ce mécanisme permet de limiter la demande en eau requise pour la photosynthèse (Poorter *et al.*, 2009). (2) Le ratio de hauteur sur biomasse aérienne (HBR) est lui aussi très sensible à l'augmentation du stress hydrique et connaît une augmentation exponentielle. Lorsque la croissance ralentit suite au stress (et produit moins de biomasse aérienne), ce mécanisme permet aux plantes de rester grandes et de conserver le plus possible un accès à la lumière, indispensable pour réaliser la photosynthèse et continuer à croître (Moreau *et al.*, 2022).

Au contraire, les deux traits d'allocation de biomasse répondent de manière moins importante au stress hydrique. (1) Le ratio de biomasse racinaire sur biomasse totale (RBR) augmente de manière exponentielle avec le stress hydrique pour plus de la moitié des combinaisons espèce × stade, mais l'amplitude de réponse est beaucoup moins importante que pour le ratio de hauteur sur biomasse aérienne (HBR). Ce mécanisme permet de compenser la sécheresse en explorant mieux le sol pour augmenter le prélèvement en eau (Brouwer, 1962 ; Carretero *et al.*, 2014). (2) Le ratio de biomasse foliaire sur biomasse aérienne (LBR) est le seul trait dont le sens de réponse au stress hydrique varie selon les combinaisons espèce × stade : il peut diminuer (en particulier pour les espèces

monocotylédones), rester stable ou augmenter (en particulier chez les dicotylédones et au stade floraison) en réponse au stress hydrique.

Derrière ces réponses générales, il existe pour chacun des traits morphologiques une diversité de réponses au stress hydrique selon les combinaisons espèce × stade.

Tableau 2 : Réponses globales des traits morphologiques au stress hydrique. Pour chaque trait, la couleur des flèches indique le sens de réponse (↑ augmentation, ↓ diminution) et la taille des flèches indique la sensibilité du trait morphologique au stress hydrique.

Trait morphologique	Unité	Réponse au stress hydrique	Variation relative lorsque le stress hydrique passe de 0 à 1
Surface foliaire spécifique SLA (surface foliaire / biomasse foliaire)	cm^2/g	↓ 	- 100 % pour toutes les combinaisons espèce × stade
Ratio de hauteur sur biomasse aérienne HBR	cm/g	↑ 	+ 10 % à + 990 %
Ratio de biomasse racinaire sur biomasse totale RBR	g/g	↑ 	0 % à + 300 %
Ratio de biomasse foliaire sur biomasse aérienne LBR	g/g	↑ ↓ 	- 15 % à + 60 %

4.3. Une diversité de réponses selon les espèces et les stades et des stratégies privilégiées devant être modélisés

Afin de caractériser la diversité des réponses des espèces selon leurs stades phénologiques, nous avons réalisé une analyse en composante principale (**Figure 5**). Les variables affichées sont les paramètres de réponse des traits morphologiques au stress hydrique estimés à l'aide des régressions non-linéaires à la section 3.1. (exemple du paramètre de résistance de la surface foliaire spécifique au stress hydrique, **figure 4)**, et utilisés ici comme indicateurs de diversité. Les combinaisons espèce × stade sont également représentées et réparties dans des clusters (groupes homogènes) ayant des réponses similaires au stress hydrique. Trois stratégies sont identifiées :

- Diminuer la demande en eau à biomasse foliaire constante (= diminuer la surface foliaire spécifique SLA dès les faibles niveaux de stress hydrique)
- Augmenter le prélèvement d'eau (= augmenter l'allocation de biomasse racinaire RBR)
- Conserver l'accès à la lumière à biomasse aérienne constante (= augmenter le ratio hauteur / biomasse aérienne HBR)

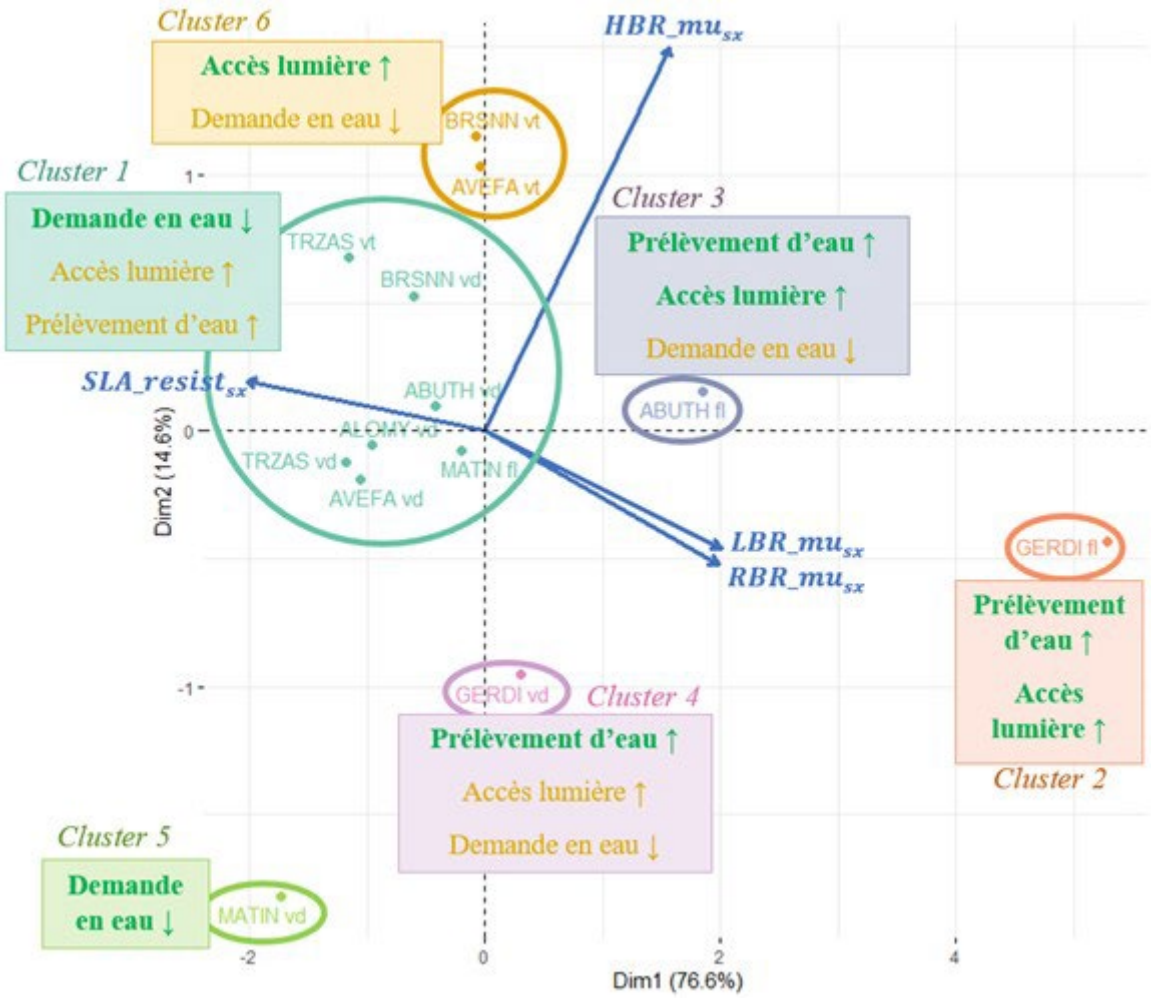


Figure 5 : Typologie de réponses des espèces au stress hydrique, selon leur stade phénologique (adapté de Cournault *et al*. (2024)). Les paramètres de réponse des quatre traits morphologiques au stress hydrique sont les variables de l'analyse en composante principale (SLA_resist_{sx} pour la surface foliaire spécifique, LBR_mu_{sx} pour le ratio de biomasse foliaire sur biomasse aérienne, RBR_mu_{sx} pour le ratio de biomasse racinaire sur biomasse totale et HBR_mu_{sx} pour le ratio de hauteur sur biomasse aérienne). Les combinaisons espèce (décrites dans le Tableau 1) × stade phénologique (vd : végétatif début ; vt : végétatif tardif ; fl : floraison) ont été regroupées en clusters par la méthode HCPC (Classification Hiérarchique sur Composantes Principales). Les stratégies impliquées dans la réponse au stress hydrique sont indiquées pour chaque cluster (stratégies majeures en vert et mineures en jaune) : augmentation (↑) du prélèvement d'eau ou de l'accès à la lumière, diminution (↓) de la demande en eau par unité de biomasse foliaire.

La majorité des combinaisons espèce × stade phénologique mobilise l'ensemble des trois stratégies, mais de manière plus ou moins forte selon les stades. Aux stades les plus avancés de la croissance (végétatif tardif, floraison), certaines espèces ou groupes d'espèces vont même jusqu'à se spécialiser en mobilisant seulement une ou deux stratégies. Ainsi, même si le stress augmente, la matricaire inodore (MATIN) ne fait que diminuer sa demande en eau par unité de biomasse foliaire alors que le géranium à feuilles découpées (GERDI) mobilise l'ensemble des stratégies sauf celle-ci (prélèvement d'eau, accès à la lumière).

Cette diversité de comportements modifie les conditions de compétition pour les ressources et plus largement les interactions entre plantes. Cependant, il semble y avoir un compromis entre compétition

pour la lumière et celle pour l'eau. En effet, la réduction de la demande en eau et l'augmentation du prélèvement d'eau se font au détriment de l'interception de la lumière puisqu'elles sont accompagnées de feuilles plus petites et d'un système racinaire plus étendu (laissant moins de biomasse aux feuilles). Le gagnant dépend donc du pédoclimat journalier et des capacités des plantes voisines, un système trop complexe pour tirer des conclusions sans modéliser les différents processus impliqués.

4.4. Conséquences du stress hydrique sur la photosynthèse

Le stress hydrique n'impacte pas seulement la morphologie des plantes, mais aussi la photosynthèse. Cet effet a été inclus dans le module de compétition pour l'eau pour FLORSYS, avec une diminution de la photosynthèse proportionnelle au stress hydrique de la plante. Ce formalisme simple s'inspire de deux modèles de culture (APSIM et DSSAT) (Ritchie, 1998 ; Zheng *et al.*, 2015), et est similaire au formalisme utilisé pour l'effet du stress azoté par FLORSYS (Moreau *et al.*, 2021).

4.5. Coupler les effets des stress hydrique, azoté et de l'ombrage

Une plante située dans un champ peut subir plusieurs limitations en ressources (eau, lumière, azote), en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques des plantes voisines. Pour tenir compte de ces interactions, les impacts du stress hydrique sur la croissance doivent être modélisés en interaction avec les impacts de l'ombrage (Munier-Jolain *et al.*, 2013) et du stress azoté (Moreau *et al.*, 2021). Le **Tableau 3** synthétise les impacts des différents stress sur les traits morphologiques dans FLORSYS. Lorsque plusieurs stress agissent dans le même sens sur un trait morphologique, seul l'effet du stress le plus fort est pris en compte. Au contraire, quand deux stress ont des effets opposés sur un trait morphologique, ces stress se compensent.

Tableau 3 : Effets des stress hydrique, azoté et ombrage sur les traits morphologiques (Cournault *et al.*, 2024a). La couleur des flèches indique le sens de réponse (↑ augmentation, ↓ diminution, 0 stable) et la taille des flèches indique la sensibilité du trait morphologique au stress hydrique.

Type de stress	Trait morphologique			
	Surface foliaire spécifique (SLA)	Ratio hauteur / biomasse aérienne (HBR)	Ratio biomasse foliaire / aérienne (LBR)	Ratio biomasse racinaire / totale (RBR)
Stress hydrique	↓	↑	↑↓	↑
Stress azoté (Perthame *et al.*, 2022, 2020 ; Pointurier *et al.*, 2021)	↓	↑↓	↑↓	↑
Ombrage (Colbach *et al.*, 2020 ; Munier-Jolain *et al.*, 2014 ; Pointurier *et al.*, 2021)	↑	↑	↑↓	**0**

5. Conclusion et perspectives

Le module de compétition pour l'eau étend le domaine de validité de FLORSYS à des situations de limitation en eau. De nouvelles séries d'expérimentations au printemps 2024 ont permis de paramétrer sept nouvelles espèces sur la base de leurs réponses au stress hydrique. La nouvelle version de

FLORSYS sera évaluée sur sa capacité à reproduire les dynamiques historiques de flore adventice (et ses conséquences) observées dans 10 systèmes de grandes cultures de la plateforme expérimentale INRAE de Dijon-Bretenières (présentés dans Pointurier *et al*. (2021)). Avec ce module, FLORSYS devient le premier modèle de dynamique de flore adventice en grandes cultures à simuler la compétition pour les trois ressources nécessaires à la croissance des plantes : l'eau, la lumière et l'azote.

Cette version de FLORSYS sera utilisée pour étudier les impacts du changement climatique sur la nuisibilité adventice en grandes cultures à l'échelle de la France métropolitaine. L'intégration de projections climatiques à haute résolution dans FLORSYS (Skamarock *et al*., 2019 ; Xu *et al*., 2021) permettra de modéliser les trajectoires futures des espèces adventices et d'évaluer leurs impacts dans des milliers de systèmes de culture en place dans diverses régions agricoles.

À partir des traits des adventices les plus dommageables pour les rendements, nous proposerons des règles pour guider la co-conception de systèmes de cultures répondant au triple objectif d'économie en herbicides, résilience face au changement climatique, et faible impact des adventices sur le rendement.

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 de cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de cet 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

Quentin Cournault : https://orcid.org/0009-0003-1513-6154 ;

Nathalie Colbach : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X ;

Delphine Moreau : https://orcid.org/0000-0003-2640-9931.

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont participé au développement du modèle et à la rédaction de cet article.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel de la plateforme 'serres_4PMI' de l'INRAE Dijon pour son assistance technique lors de l'expérimentation en serre, Marion Prudent (Agroécologie, INRAE, 21000 Dijon, France) pour ses conseils et son aide dans la paramétrisation et Gaëtan Louarn et Romain

Barillot (P3F - Prairies et plantes fourragères, INRAE, 86600 Lusignan, France) pour les discussions sur la construction du module.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été soutenu par INRAE, le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (thèse de Quentin Cournault), les projets COPRAA (financé par l'Office Français de la Biodiversité), ANR PPR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008, www6.inrae.fr/specifics/), ANR PPR MoBiDiv (ANR-20-PCA-0006, www6.inrae.fr/mobidiv/), financés par le programme prioritaire de recherche français « Cultiver et protéger autrement » (PPR-CPA, ANR), ainsi que le projet Horizon Europe IntercropVALUES (N°101081973) de l'Union Européenne.

Références bibliographiques

Allen R., Pereira L., Daes D., Smith M., 1998. Chapter 6 - ETc - Single crop coefficient (Kc), dans: Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.

Aschehoug E.T., Brooker R., Atwater D.Z., Maron J.L., Callaway, R.M., 2016. The Mechanisms and Consequences of Interspecific Competition Among Plants. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 47, 263–281. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032123

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual basis, formalisations and parametrisation of the STICS crop model, Update Sciences and Technologies. Quae Editions, Versailles.

Brouwer R., 1962. Nutritive influences on the distribution of dry matter in the plant. Neth. J. Agric. Sci. 10, 399–408. https://doi.org/10.18174/njas.v10i5.17581

Carretero R., Bert F.E., Podestá G., 2014. Maize root architecture and water stress tolerance: an approximation from crop models. Agron. J. 106, 2287–2295. https://doi.org/10.2134/agronj14.0214

Cavan N., Castel T., Pergaud J., Angevin F., Colbach, N., 2020. Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique. Innov. Agron. 81, 209–225. https://doi.org/10.15454/fqye-3778

Chahal P.S., Irmak S., Jugulam M., Jhala A.J., 2018. Evaluating effect of degree of water stress on growth and fecundity of Palmer amaranth (Amaranthus palmeri) using soil moisture sensors. Weed Sci. 66, 738–745. https://doi.org/10.1017/wsc.2018.47

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 Res. 261, 108006. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006

Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., Maillot T., Villerd J., Moreau D., 2019a. Du champ virtuel au champ réel - ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies durables de gestion des adventices et reconcevoir des systèmes de culture ? Agron. Environ. Soc. 9, 111–128.

Colbach N. Flament M., Maillot T., Pernel J., Queyrel W., Villerd J., 2024. La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides. Innov. Agron., in press.

Colbach N., Gardarin A., Moreau D., 2019b. The response of weed and crop species to shading: which parameters explain weed impacts on crop production? Field Crops Res. 238, 45–55. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.008

Colbach N., Munier-Jolain N., Dugué F., Gardarin A., Strbik F., Moreau D., 2020. The response of weed and crop species to shading. How to predict their morphology and plasticity from species traits and ecological indexes? Eur. J. Agron. 121, 126158. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126158

Comoul X., Mougin C., 2024. Chapitre 14 - Impacts de l'herbicide glyphosate dans un contexte de santé globale, dans: Sols urbains, environnement et santé, repenser les usages. Versailles, pp. 219–223.

Couchoud M., Salon C., Girodet S, Jeudy C., Vernoud V., Prudent M., 2020. Pea Efficiency of Post-drought Recovery Relies on the Strategy to Fine-Tune Nitrogen Nutrition. Front. Plant Sci. 11. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00204

Cournault Q., Colbach N., Busset H., Matejicek A., Souche-Suchovsky P., Prudent M., Moreau D., 2024a. Interspecies diversity in morphological responses to water stress: Study on a panel of weed and crop species. Env. Exp. Bot. 224, 105825. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105825

Cournault Q., Moreau D., Castel T., Colbach N., 2024b. Adapting FLORSYS for climate change: implementing plant-plant competition for water in a 3D mechanistic model for predicting future crop/weed interactions and their consequences in arable cropping systems. 18th Congress of the European Society for Agronomy, Rennes, France.

Cournault Q., Moreau D., Colbach N., 2023. Déterminer la disponibilité journalière en eau du sol dans le modèle FLORSYS, par couplage au module sol de STICS. XIIIth STICS seminar, Latresne, France.

Dinpashoh Y., Jahanbakhsh-Asl S., Rasouli A.A., Foroughi M., Singh V.P., 2019. Impact of climate change on potential evapotranspiration (case study: west and NW of Iran). Theor Appl Climatol 136, 185–201. https://doi.org/10.1007/s00704-018-2462-0

Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D., Basra S.M.A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agron. Sustain. Dev. 29, 185–212. https://doi.org/10.1051/agro:2008021

Fatima Z., Naz S., Iqbal P., Khan A., Ullah H., Abbas G., Ahmed, M., Mubeen, M., Ahmad, S., 2022. Field Crops and Climate Change, dans: Jatoi, W.N., Mubeen, M., Ahmad, A., Cheema, M.A., Lin, Z., Hashmi, M.Z. (Eds.), Building Climate Resilience in Agriculture: Theory, Practice and Future Perspective. Springer International Publishing, Cham, pp. 83–94. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79408-8_6

Gardarin A., Guillemin J.-P., Munier-Jolain N., Colbach N., 2010. Estimation of key parameters for weed population dynamics models: Base temperature and base water potential for germination. Eur. J. Agron. 32, 162–168. https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.09.006

Louarn G., Faverjon L., 2018. A generic individual-based model to simulate morphogenesis, C–N acquisition and population dynamics in contrasting forage legumes. Ann. Bot. 121, 875–896. https://doi.org/10.1093/aob/mcx154

Maurel C., Nacry P., 2020. Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. Nat. Plants 6, 744–749. https://doi.org/10.1038/s41477-020-0684-5

Moreau D., Busset H., Matejicek A., Prudent M., Colbach N., 2022. Water limitation affects weed competitive ability for light. A demonstration using a model-based approach combined with an automated watering platform. Weed Res. 62, 381–392. https://doi.org/10.1111/wre.12554

Moreau D., Pointurier O., Perthame L., Beaudoin N., Villerd J., Colbach N., 2021. Integrating plant-plant competition for nitrogen into a 3D individual-based model simulating the effects of cropping systems on weed dynamics. Field Crops Res. 268, 108166. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108166

Munier-Jolain N., Collard A., Busset H., Guyot S.H.M., Colbach N., 2014. Investigating and modelling the morphological plasticity of weeds. Field Crops Res. 155, 90–98. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.018

Munier-Jolain N., Guyot S.H.M., Colbach N., 2013. A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies: Model structure and evaluation. Ecol. Model. 250, 101–110. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.023

Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests. J. Agric. Sci., 144. https://doi.org/10.1017/S0021859605005708

Omon B., Colbach N., Cavan N., Angevin F., 2024. L'accompagnement de la transition vers des systèmes deculture gérant les adventices avec moins d'herbicides : avec quelle mobilisation de la connaissance, et des outils et modèles ? Innov. Agron. in press.

Perthame L., Colbach N., Brunel-Muguet S., Busset H., Lilley J.M., Matejicek A., Moreau D., 2020. Quantifying the nitrogen demand of individual plants in heterogeneous canopies: A case study with crop and weed species. Eur. J. Agron. 119, 126102. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126102

Perthame L., Colbach N., Busset H., Matejicek A., Moreau D., 2022. Morphological response of weed and crop species to nitrogen stress in interaction with shading. Weed Res. 62, 160–171. https://doi.org/10.1111/wre.12524

Pointurier O., Moreau D., Pagès L., Caneill J., Colbach N., 2021. Individual-based 3D modelling of root systems in heterogeneous plant canopies at the multiannual scale. Case study with a weed dynamics model. Ecol. Model. 440, 109376. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109376

Poorter H., Niinemets Ü., Poorter L., Wright I.J., Villar R., 2009. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. New Phytol. 182, 565–588. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x

Queyrel W., Van Inghelandt B., Colas F., Cavan N., Granger S., Guyot B., Reau R., Derrouch D., Chauvel B., Maillot T., Colbach N., 2023. Combining expert knowledge and models in participatory workshops with farmers to design sustainable weed management strategies. Agric. Syst. 208, 103645. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103645

Ritchie J.T., 1998. Soil water balance and plant water stress, dans: Understanding Options for Agricultural Production. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 41–54. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_3

Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A.J., 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. Earth Sci. Rev. 99, 125–161. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004

Singh M., Thapa R., Kukal M.S., Irmak S., Mirsky S., Jhala A.J., 2022. Effect of water stress on weed germination, growth characteristics, and seed production: a global meta-analysis. Weed Sci. 70, 621–640. https://doi.org/10.1017/wsc.2022.59

Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y., 2019. A description of the advanced research WRF model version 4. No. NCAR/TN-556+STR. https://doi.org/10.5065/1DFH-6P97

Xu Z., Han Y., Tam C.-Y., Yang Z.-L., Fu C., 2021. Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). Sci Data 8, 293. https://doi.org/10.1038/s41597-021-01079-3

Zheng B.Y., Chenu K., Doherty A., Chapman, S., 2015. The APSIM-Wheat module (7.5 R3008) documentation. APSRU: Toowoomba, Australia. 33.

Zhou H., Zhou G., He Q., Zhou L., Ji Y., Zhou M., 2020. Environmental explanation of maize specific leaf area under varying water stress regimes. Environ. Exp. Bot. 171, 103932. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103932

Zimdahl R., 2004. Definition of Plant Competition, dans: Weed-Crop Competition. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 6–8. https://doi.org/10.1002/9780470290224.ch2

Pour citer cet article : Quentin Cournault, Nathalie Colbach, Delphine Moreau. 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*, 2025, 101, pp.1-15. 10.17180/ciag-2025-vol101-art01

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

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

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

Effets des opérations de travail du sol sur la fragmentation des racines du chardon des champs (*Cirsium arvense*)

Solèmne SKORUPINSKI[1], Hugues BUSSET[1], Jacques CANEILL[1], Delphine MOREAU[1], Brice MOSA[2], Eugène MOTTON[1], Nathalie COLBACH[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

[2] INRAE, U2E, Unité Expérimentale du domaine d'Epoisses, Bretenière F-21110, France

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art02

Résumé

La réduction de l'usage des herbicides et du travail du sol favorise les espèces adventices vivaces qui sont très problématiques en grandes cultures. Ces espèces développent des organes de stockage capables de régénérer de nouvelles plantes par multiplication végétative. Le travail du sol est identifié comme un levier de gestion à optimiser pour réduire les adventices vivaces mais ses effets sont mal connus. Dans cette étude, l'effet du passage des outils de travail du sol sur la fragmentation des racines traçantes de *Cirsium arvense* a été analysé. La longueur des fragments de racine produits a été mesurée. La herse rotative a produit les plus petits fragments (3,7 cm en moyenne), la charrue, les plus longs fragments (12,7 cm) et les autres outils, des fragments de longueur intermédiaire (8-10 cm). Ces résultats alimenteront des modèles de systèmes de culture pour comprendre l'effet des modalités du travail du sol sur les adventices vivaces.

Mots-clés : gestion des adventices, adventices vivaces, outils, longueur de fragment

Abstract: Effects of tillage operations on the fragmentation of Cirsium arvense roots

The reduction of herbicide use and tillage favors perennial weeds, which are highly problematic in field crops. These species develop storage organs capable of regenerating new plants (vegetative multiplication). Tillage has been identified as a management lever to be optimized to reduce perennial weeds but its effects are poorly understood. In this study, the effect of tillage tools on the fragmentation of *Cirsium arvense* creeping roots was analyzed. The length of the root fragments produced was measured: the rotary harrow produced the smallest fragments (3.7 cm on average), the plough the longest fragments (12.7 cm) and the other tools fragments of intermediate length (8-10 cm). These results will be used in cropping system models to understand the effect of tillage methods on perennial-weeds.

Keywords: weed management, perennial weeds, tillage tools, fragment length

1. Introduction

Les adventices sont la première cause de perte de rendement en grandes cultures (Oerke, 2006), principalement parce qu'elles sont en compétition avec les cultures pour les ressources. Pour diminuer la nuisibilité des adventices, la technique la plus simple et la plus efficace est l'utilisation d'herbicides mais il est de plus en plus urgent de réduire cette utilisation à cause des nombreux impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine qui leur sont liés (Hasanuzzaman *et al*., 2020). Comme il n'existe pas d'autre technique curative aussi simple et efficace que les herbicides, la gestion non-chimique des adventices doit s'appuyer sur des combinaisons de techniques culturales partiellement efficaces et préventives (Liebman et Gallandt, 1997). Le travail du sol est un levier de gestion non-chimique

essentiel dont l'utilisation doit être optimisée. En effet, le travail du sol peut générer des impacts négatifs : diminuer la faune du sol, favoriser l'érosion, le ruissèlement et les émissions de gaz à effet de serre. Le travail du sol est aussi couteux et chronophage pour les agriculteurs (Holland, 2004). A cause de ces impacts négatifs, les agriculteurs réduisent de plus en plus souvent le travail du sol et certains pratiquent l'agriculture de conservation des sols. Dans un tel contexte, les adventices sont d'autant plus difficiles à gérer (Nichols *et al*., 2015 ; Colbach et Cordeau, 2022), ce qui demande d'acquérir davantage de connaissances sur les effets et les réponses des adventices dans les systèmes de culture.

La réduction de l'utilisation des herbicides (Turner *et al*., 2007) et du travail du sol (Trichard *et al*., 2013 ; Derrouch *et al*., 2022), est souvent accompagnée d'une augmentation d'adventices vivaces, des espèces vivaces, jusqu'à présent moins étudiées que les espèces annuelles (Hatcher, 2017 ; Gerowitt, 2022). Les espèces vivaces accumulent des réserves nutritives dans des organes de stockage à partir desquels de nouveaux individus peuvent être produits par multiplication végétative. Cela permet notamment de régénérer de nouvelles plantes après une perturbation qui a détruit ou endommagé les parties aériennes et/ou les organes de stockage. Même un petit fragment d'organe de stockage peut donner naissance à un nouvel individu autonome (Hakansson, 1982). Les adventices vivaces qui se propagent de façon spontanée et qui développent des organes de réserve souterrains sont les plus problématiques. Par exemple, le chiendent rampant (*Elymus repens* (L.) Gould) qui se multiplie via des rhizomes et le chardon des champs (*Cirsium arvense* (L.) Scop.), via des racines traçantes. Ces organes souterrains se propagent rapidement et sont résistants aux conditions environnementales défavorables, faisant des espèces vivaces des espèces persistantes et difficiles à contrôler sans herbicide ou travail du sol (Mohler *et al*., 2021).

Epuiser les réserves contenues dans les organes de stockage est important pour diminuer la présence des espèces vivaces et entraver la régénération et la prolifération de nouvelles plantes (Graglia *et al*., 2006). À cette fin, le travail du sol est un levier important car il détruit les parties aériennes des plantes (empêchant l'apport de carbone pour constituer des réserves) et fragmente les organes de stockage souterrains situés dans les couches de sol travaillées (réduisant la quantité de réserves disponibles par plante). Pour minimiser le nombre de plantes régénérées après un travail du sol, les fragments produits doivent contenir une quantité insuffisante de réserves pour permettre aux pousses souterraines d'atteindre la surface (levée) et de développer de nouvelles plantes (Hakansson, 1982). De précédentes études ont montré, pour plusieurs espèces d'adventices vivaces, que la probabilité et la vitesse d'émergence des pousses souterraines diminuaient avec la taille des fragments et augmentaient avec la profondeur d'enfouissement des fragments (Sciegienka *et al*., 2011 ; Torssell *et al*., 2015 ; Skorupinski *et al*., 2024b). Pour diminuer le succès de repousse des adventices vivaces à partir des fragments, l'outil de travail du sol devrait fragmenter les organes de stockage en morceaux aussi petits que possible tout en les enfouissant profondément. Cependant, une seule expérimentation a été menée à ce jour pour quantifier l'effet des outils de travail du sol sur la fragmentation des racines traçantes de chardon des champs et de laiteron des champs (*Sonchus arvensis* L.).

L'objectif de cette étude est de caractériser l'effet des outils de travail du sol sur la taille des fragments de racine traçante du chardon des champs (*Cirsium arvense* (L.) Scop.) situées dans les couches de sol travaillées. Nous supposons que le choix de l'outil impacte la longueur des fragments selon la profondeur de travail, le type d'outil (lames, disques etc.), la surface de recouvrement, le mouvement engendré (retournement, animation) et l'orientation de l'action de coupe (horizontale/verticale). La longueur des fragments de racine a été analysée pour cinq outils à action mécanique et profondeur de travail contrastées : une charrue à socs, une herse rotative, un déchaumeur à disques et deux types de chisel : à socs étroits et à pattes d'oie. Nous avons choisi d'étudier le chardon des champs car c'est l'une des adventices vivaces les plus problématiques en grande culture en Europe (Favrelière *et al*., 2020). La présence de chardon dans les parcelles cultivées engendre de lourdes pertes de rendement,

particulièrement dans les systèmes en agriculture biologique avec une grande proportion de céréales (Salonen *et al*., 2023).

2. Matériel et méthode

2.1. Objectifs et principe

Afin de caractériser l'effet de différents outils de travail du sol sur la longueur des fragments de racine de chardon après un passage, cinq outils (Tableau 1) ont été passés indépendamment dans une parcelle non travaillée depuis plus de six mois. Puis, les fragments de racine de chardon retrouvés jusqu'à la profondeur de travail ont été collectés. Au laboratoire, les fragments ont été mesurés (longueur, diamètre, biomasse sèche, etc.) et leur longueur a été analysée en fonction des outils. Les outils ont été choisis pour constituer un panel diversifié en termes de : type de lame (par exemple., disque, dents), profondeur de travail (travail profond ou superficiel), surface de recouvrement (par exemple., dents ou pattes d'oie), mouvement engendré (retournement ou non, outil animé ou non) et orientation de coupe (horizontale ou verticale).

2.2. Morphologie et fonctionnement du système racinaire du chardon

L'organe de réserve et de propagation du chardon des champs est la racine traçante. Les racines traçantes se développent rapidement dans le sol, de façon horizontale et verticale, et descendent généralement à plus d'un mètre de profondeur, le maximum observé étant 6 mètres de profondeur (Tiley, 2010). Des bourgeons dits adventifs peuvent se former n'importe où sur les racines traçantes, de façon spontanée ou bien en réponse à une perturbation. A partir de ces bourgeons, des tiges appelées drageons, se développent et croissent verticalement jusqu'à la surface. Une fois le drageon émergé en surface, une plantule se développe (Figure 1).

D'après la littérature, les racines traçantes peuvent régénérer de nouvelles plantes à partir d'une épaisseur de 1 mm de diamètre (Hamdoun, 1970). Concernant les drageons, ils ne contiennent pas de réserve pendant leur phase de croissance souterraine (c.-à-d., avant d'avoir émergé) et ne peuvent donc pas régénérer de nouvelles plantes. Cependant, une fois que les drageons ont émergé et que les plantules se sont suffisamment développées, ces dernières accumulent des réserves. Les drageons desquels elles sont issues s'épaississent, se ramifient en racines traçantes et absorbantes et deviennent ainsi les « racines pivots » de ces plantes. A partir d'un certain moment (lié à la quantité de réserves accumulées), un fragment de drageon qui a émergé et développé une plante contient assez de réserves pour régénérer une nouvelle plante.

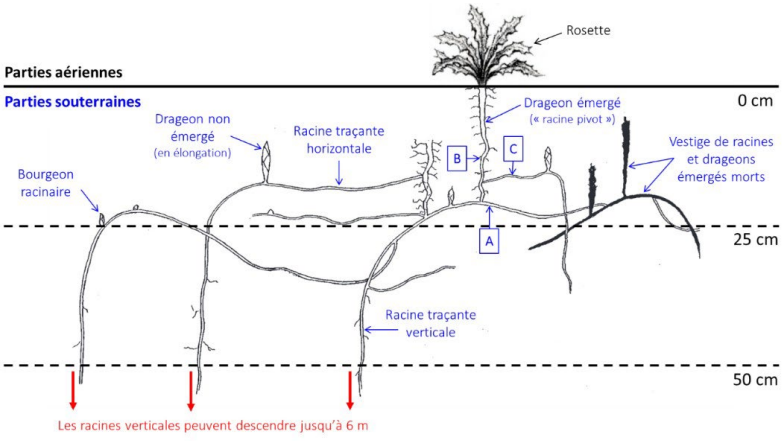


Figure 1 : Représentation d'un système souterrain de chardon des champs. Extrait et adapté de l'article de Tiley (2010), lui-même extrait de l'ouvrage de Lund et Rostrup (1901). Exemple avec une racine traçante (A) qui a produit un drageon (B) qui a émergé en surface et développé une nouvelle plante ; le vieux drageon (B) s'est ensuite épaissi et a initié une nouvelle racine traçante (C).

Tableau 1 : Présentation des outils de travail du sol (CC-BY-NC-ND : Solèmne Skorupinski) comparés lors de l'expérimentation de terrain pour l'analyse de l'effet sur la fragmentation des racines de chardon.

OUTIL Profondeur de travail Action(s) mécanique(s) principale(s)		CHARRUE À SOCS 22-25 cm Coupe horizontale et retournement du sol	
CHISEL À SOCS ÉTROITS 13-15 cm Coupe verticale		DÉCHAUMEUR À DISQUES 10-12 cm Coupe verticale	
CHISEL À PATTES D'OIE 6-8 cm Coupe verticale et horizontale		HERSE ROTATIVE 6-8 cm Coupe verticale et mouvement circulaire	

2.3. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été réalisée en novembre 2022 et en janvier 2023 sur la plateforme expérimentale de l'INRAE Dijon-Epoisses (Bretenière, France, 47.237881 N, 5.099605 E) sur une parcelle présentant une densité importante de chardons des champs. La parcelle est gérée depuis plusieurs années sans pesticide avec un travail du sol régulier. Le dernier travail de sol a été réalisé fin mars 2022 (travail superficiel) et a précédé une culture d'oignon. La texture moyenne de l'horizon travaillé dans cette parcelle se compose à 32 % d'argile, 61 % de limons et 7 % de sable. Deux bandes enherbées perpendiculaires au sens de travail délimitent la parcelle en 3 blocs (Figure 2). Ces bandes ont été travaillées mais n'ont pas été échantillonnées.

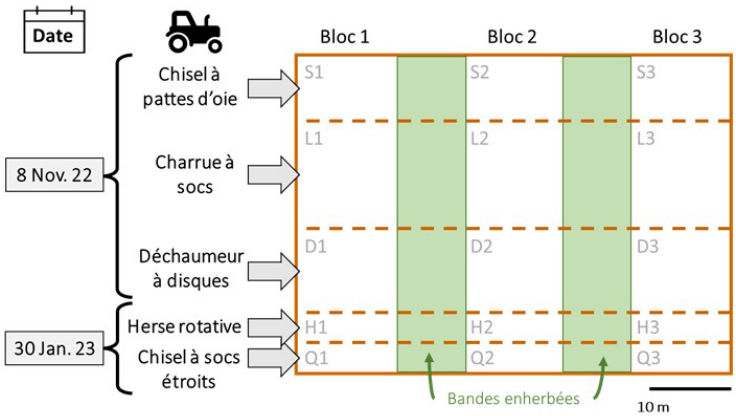


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental pour comparer l'effet des outils sur la taille des fragments de racines de chardon. Les lignes pointillées délimitent les zones relatives à chaque outil. Les bandes enherbées, représentées en vert, délimitent les 3 blocs.

En novembre 2022, toutes les taches de chardon visibles en surface sur la parcelle (hors bandes enherbées) ont été géolocalisées avec une canne GPS (Trimble®). La parcelle a ensuite été délimitée en cinq bandes d'une largeur suffisante pour permettre au moins un passage d'outil et de sorte à contenir au moins 3 taches de chardon (Figure 2). Chaque bande a été travaillée avec un seul outil ; la charrue, le déchaumeur à disques et le chisel à pattes d'oie ont été passés le 8 novembre 2022 ; la herse rotative et le chisel à socs étroits ont été passés le 30 janvier 2023. La parcelle étant très argileuse, le taux de compaction du sol était trop élevé en automne pour passer la herse rotative et le chisel à socs étroits. A chaque date de travail (novembre et janvier), et pour chaque bande relative à un outil, un profil cultural (suivant Manichon, 1982, 1987) de 60 cm de profondeur a été réalisé pour décrire la structure des différents horizons. Dans les jours suivant le passage des outils, tous les fragments de chardon (parties souterraines et aériennes) retrouvés dans l'horizon travaillé (dont la profondeur dépend de l'outil, voir Tableau 1) ont été prélevés à l'intérieur de quadrats (50 × 50 cm). Trois quadrats par bloc, chacun placé à l'intérieur d'anciennes taches de chardon (localisées grâce aux données GPS) ont été prélevés. Une fois prélevés, les fragments étaient immédiatement placés dans des sacs opaques (1 sac par quadrat) puis stockés dans une chambre froide à 3°C jusqu'au jour des mesures.

2.4. Méthode de mesure des fragments

Une fois tous les prélèvements réalisés, les fragments ont été mesurés. Un par un, les sacs ont été vidés dans une bassine avec de l'eau et les fragments ont été lavés pour retirer la terre. Les fragments qui provenaient d'autres espèces ont été écartés. Puis, les fragments de chardon ont été triés de sorte à ne garder que ceux qui étaient capables de régénération (voir section 2.2). Ainsi, les racines de diamètre inférieur à 1 mm et les drageons non émergés (reconnaissables par leur aspect très blanc, creux et constitués d'écailles foliaires) ont été écartés (Figure 3). Enfin, les parties aériennes et souterraines des fragments ont été séparées.

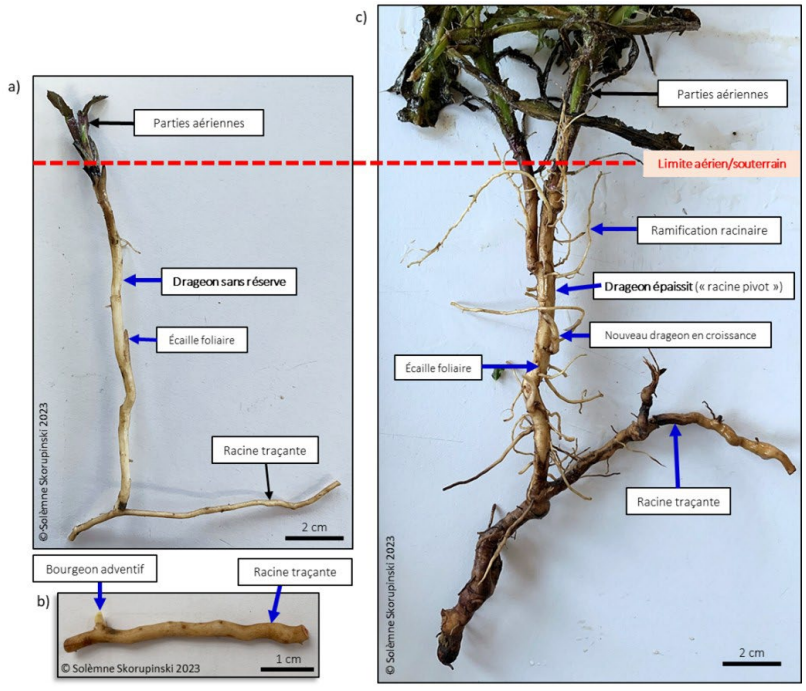


Figure 3 : Photographies (Crédit Solèmne Skorupinski) de quelques fragments des parties souterraines du chardon des champs (*Cirsium arvense*) prélevés sur le terrain : a) une portion de racine traçante portant un drageon émergé mais en encore très fin et sans ramification, b) une portion de racine traçante avec un bourgeon adventif, c) une portion de racine traçante portant un drageon épaissit avec une nouvelle plante développée.

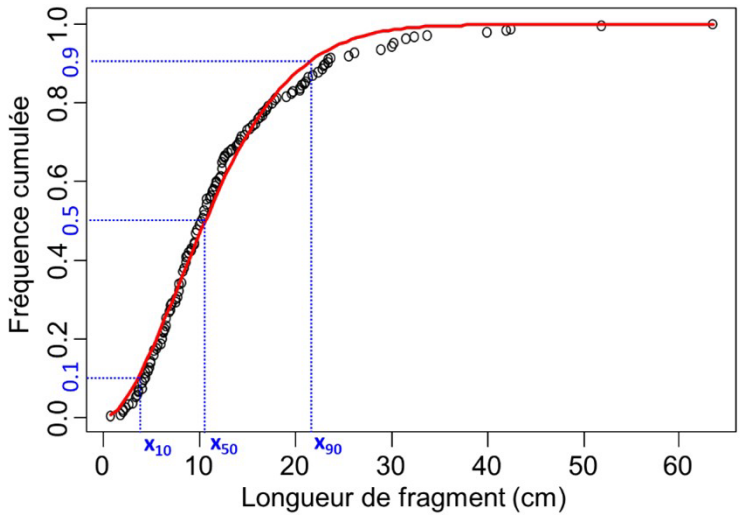
La longueur de chaque fragment de racine a été mesurée avec une règle et son diamètre avec un pied à coulisse numérique. Pour les fragments souterrains avec plusieurs axes (ramifications), l'axe le plus long a été distingué des axes plus courts et a été considéré comme l'axe principal. Enfin, le fragment a été séché à l'étuve à 80°C pendant 48h et sa biomasse sèche a été pesée. Pour plus de détails sur la méthode employée dans cette étude, voir Busset *et al*., (2023) et Skorupinski *et al*., (2024a).

2.5. Méthodes d'analyse statistique

Pour cette étude, les longueurs des fragments ont été analysées pour chaque outil. Pour les fragments avec des ramifications, seule la longueur de l'axe le plus long a été analysée. Les racines et les drageons émergés (voir section 2.2) ont été analysés sans distinction. Pour quantifier la distribution des tailles de fragment après le passage de chaque outil, un modèle non linéaire a été ajusté aux fréquences cumulées des longueurs observées pour chaque combinaison *Outil* × *Bloc.* Le modèle utilisé est une fonction de Weibull (Figure 4) avec deux paramètres a et b. Comme ces paramètres ne sont pas simples à interpréter, ils ont été utilisés pour calculer trois autres variables :

- la longueur médiane des fragments (x_{50}, en cm) à laquelle 50 % des fragments sont plus courts et 50% sont plus longs ;
- les premier et neuvième déciles (x_{10} et x_{90}, en cm) avec x_{10} (resp. x_{90}) la longueur en dessous de laquelle se situent 10 % (resp. 90 %) des fragments.

Afin de déterminer si l'outil utilisé impacte la distribution des tailles de fragment et pour voir s'il y a un effet de la localisation du passage dans la parcelle (bloc), une analyse de variance a été réalisée pour chacune des trois valeurs de quantile (fonction Anova type III, R Core Team, 2024) en fonction de l'outil et du bloc. Enfin, une comparaison de moyennes deux à deux selon un test LSD (« Least Significant difference », fonction *lsmeans* du package *lsmeans* dans R) a été réalisée pour comparer les tailles des fragments selon l'outil.



$$y = 1 - e^{(-a\,x^b)} \quad (1)$$

$$x_i = \left(-\frac{\ln\left(1-\frac{i}{100}\right)}{a}\right)^{1/b} \quad (2)$$

y = fréquence cumulée
x = longueur de fragment
a, b = paramètres
i = numéro du quantile

Figure 4 : Fréquence cumulée de la longueur des fragments après un passage de travail du sol (exemple de la charrue au bloc 1). Symboles o : observations ; ligne continue rouge : ajustement de l'équation de Weibull (équation 1). L'équation 2 permet d'en tirer les quantiles (x10, x50, x90) caractéristiques de la distribution des tailles de fragment (traits pointillés bleus).

3. Résultats

L'analyse de variance sur les quantiles de distribution des longueurs de fragment post-travail du sol montre que le bloc n'a jamais d'effet significatif. Cela signifie que les conditions expérimentales étaient

homogènes entre blocs. Au contraire, l'effet de l'outil de travail du sol est significatif pour les trois quantiles, expliquant environ 80% de la variabilité (R^2) des valeurs de quantiles (Tableau 2). Les outils de travail du sol ne fragmentent donc pas les parties souterraines du chardon de la même façon.

Tableau 2 : Effet de l'outil de travail du sol sur la fragmentation des parties souterraines du chardon des champs (Cirsium arvense). Comparaison de moyenne (test LSD) des quantiles des tailles de fragment en fonction des outils (les moyennes d'une colonne suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes à p = 0.05).

OUTILS	QUANTILES (CM)					
	Plus petite longueur (x_{10})		Longueur médiane (x_{50})		Plus grande longueur (x_{90})	
HERSE ROTATIVE	1.2	**a**	3.1	**a**	5.7	**a**
CHISEL À SOCS ÉTROITS	2.1	**a b**	5.9	**a b**	11.3	**a b**
DÉCHAUMEUR À DISQUES	2.6	**b c**	7.1	**b**	13.7	**b**
CHISEL À PATTES D'OIE	3.3	**b c**	8.0	**b c**	14.1	**b c**
CHARRUE À SOCS	3.7	**c**	10.8	**c**	21.4	**c**

Quel que soit l'outil utilisé, les longueurs de fragments variaient majoritairement de 1 à 20 cm (seuls 6 % des fragments sont supérieurs à 20 cm, Figure 5). Les deux outils les plus contrastés étaient la herse rotative et la charrue : la herse rotative a fait les fragments les plus courts et les moins variables et la charrue, les fragments les plus longs et les plus variables. En effet, après un passage de herse rotative, 50 % des fragments retrouvés étaient inférieurs à 3,1 cm et 90 % inférieurs à 5,7 cm, tandis que pour la charrue seulement 10 % étaient inférieurs à 3,7 cm et 10% des fragments pouvaient dépasser 21 cm. Les distributions des tailles de fragment après passage avec les déchaumeurs à dents, disques et pattes d'oie étaient similaires et intermédiaires entre celles de la herse rotative et celles de la charrue : les valeurs de longueurs minimales variaient entre 2,1 et 3,3 cm et les valeurs maximales entre 11,3 et 14,1 cm (Tableau 2).

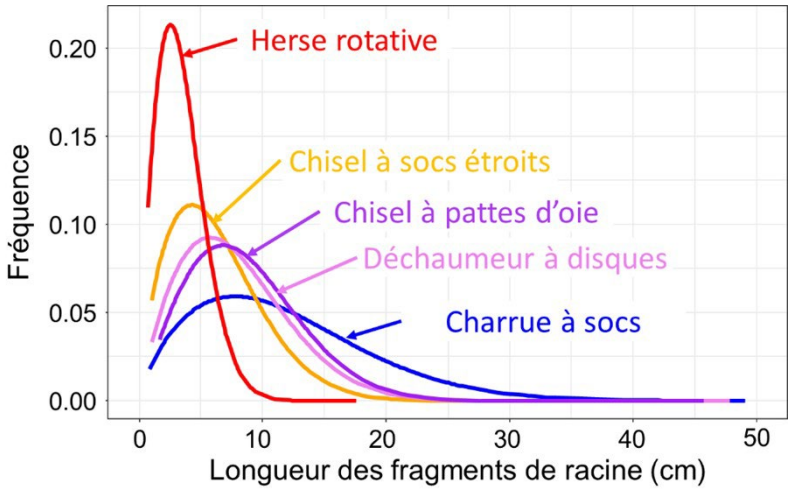


Figure 5 : Densité de probabilité (dérivée de la fonction Weibull, Figure 4) des longueurs de fragments des parties souterraines du chardon (Cirsium arvense) selon l'outil de travail du sol utilisé.

Les différentes longueurs de fragment observées peuvent s'expliquer par la profondeur de travail de l'outil et son type d'action de coupe. La herse rotative a travaillé peu profondément (6-8 cm, Tableau 1) et est animée d'un mouvement circulaire, ce qui a augmenté les points de coupe et donc la fragmentation, conduisant surtout à de très petits fragments (pic de densité de distribution fin, Figure 5). La charrue a travaillé profondément (22-25 cm) ce qui explique la présence de plus grands fragments, mais a provoqué aussi un retournement des mottes de terre. Ces mottes ont pu se casser et/ou se fissurer et provoquer la fragmentation des racines à l'intérieur, d'autant plus que le pourcentage d'argile dans le sol était élevé (32 %, Section 0), ce qui peut expliquer la présence de plus petits fragments et donc une densité de distribution plus étalée (Figure 5).

Les effets des déchaumeurs à pattes d'oie et à dents étaient similaires (Figure 5) malgré la différence de profondeur de travail (6-8 cm et 13-15 cm, respectivement) et de la forme des lames. Les ailettes sur les dents en pattes d'oie n'augmentent donc pas la fragmentation par rapport à des dents simples. De même, les effets des disques et des dents étaient similaires alors que des différences étaient attendues : les actions de coupe de ces deux outils étaient différentes puisque d'une part, l'écartement entre les disques est plus faible que celui entre les dents et d'autres part, que les disques engendrent un retournement du sol.

4. Discussion et conclusion

4.1. Originalité de ce travail

Jusqu'à présent, très peu d'études se sont intéressées à l'effet des outils de travail du sol sur la gestion des adventices vivaces et se sont concentrées sur des mesures de taux d'infestation au champ (par exemple., Brandsæter *et al*., 2011). Une telle approche est fortement liée au contexte d'étude et ne permet pas de comprendre l'effet direct des outils sur les organes des vivaces. Seuls Leblanc et Lefebvre (2018) au Canada ont analysé l'effet des outils de travail du sol sur la taille de fragments de racine de chardon et laiteron des champs, mais dans un contexte climatique et pédologique (sol limoneux) très différent. L'étude ici présentée est la première à faire le lien entre les outils de travail du sol et la taille des fragments de racines de chardon en climat tempéré dans un sol limono-argileux. Elle apporte des éléments clés pour comprendre les mécanismes qui régissent l'efficacité du travail du sol sur la gestion du chardon et des vivaces en général.

4.2. Cohérence avec la littérature

Les résultats qui concernent la herse rotative concordent avec ceux de Leblanc et Lefebvre (2018). Dans leur étude, un rotoculteur (outil animé à coupes horizontales) et une herse rotative ont coupé les racines en très petits fragments. Les profondeurs de travail étaient bien plus élevées (18,7 et 28,2 cm respectivement) que dans notre étude. Cela suggère que pour ces outils, c'est surtout le mouvement animé des lames (en augmentant le nombre de points de coupe) qui permet d'augmenter l'intensité de la fragmentation. Cependant, dans l'étude de Leblanc et Lefebvre (2018) le passage d'un déchaumeur à pattes d'oie à 10 cm de profondeur et a produit des fragments de 16 cm de longueur en moyenne, soit le double de la valeur médiane trouvée pour cet outil (section 3). Cette différence peut être liée au type de sol : dans des sols plus légers, les racines peuvent être davantage trainées avant de se casser.

4.3. Conséquence pour la gestion des adventices au champ

Pour gérer les adventices vivaces via la fragmentation de leurs organes de réserve par le travail du sol, il faut prendre en compte 1) la taille des fragments : les petits fragments ont moins de réserves et développent des pousses plus petites (Skorupinski *et al*., 2024b) et 2) la profondeur d'enfouissement des fragments : plus elle est grande, plus les pousses ont besoin de réserves pour émerger (Sciegienka

et al., 2011). Ici, aucun des outils testés n'a permis à la fois de faire des petits fragments et de les enfouir profondément. Utiliser un outil animé plus profondément (cf. Leblanc et Lefebvre, 2018) pourrait permettre, en plus de faire des petits fragments, de les enfouir plus en profondeur. Cependant, c'est peu envisageable dans des sols très argileux. Une autre solution est de faire une combinaison d'outils avec, par exemple, le passage d'un outil animé puis un travail profond avec retournement. De plus, il ne faut pas négliger le moment de l'intervention pour fragmenter les organes quand les réserves sont les plus faibles, c'est-à-dire, à la floraison en été et au moment des premières émergences à la fin de l'hiver.

4.4. Pistes d'approfondissement et perspectives

Notre étude a permis de mettre en évidence que les longueurs des fragments de racine traçante du chardon des champs après un travail du sol varient en fonction de l'outil utilisé. Il faudrait tester cependant davantage d'outils et comparer plusieurs profondeurs de travail pour un même outil afin de décorréler l'effet de la profondeur et celui du type de coupe. Le lien entre l'outil utilisé et la profondeur d'enfouissement des fragments devrait aussi être analysé. A ce jour, seul le mouvement des semences dans le sol selon l'outil de travail du sol a été étudié en détails par de nombreux auteurs (par exemple., Colbach *et al*., 2014). Ces résultats pourront être utilisés dans un premier temps.

Cependant, le travail du sol n'est pas le seul facteur qui influence la dynamique des adventices vivaces et de plus, leur gestion doit être raisonnée à une échelle pluriannuelle. Pour gérer cette complexité, les modèles sont de plus en plus utilisés pour concevoir et affiner des stratégies de gestion durable des adventices (Chantre et González-Andújar, 2020). En particulier, les modèles mécanistes sont des outils utiles pour synthétiser les connaissances sur les processus des vivaces, produites à partir d'expériences comme dans la présente étude, et pour passer de l'échelle de l'organe à l'échelle du champ afin d'identifier des systèmes de culture efficaces pour le contrôle des adventices (Colbach *et al*., 2010).

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

Solèmne SKORUPINSKI : https://orcid.org/0009-0001-9573-1396 ;

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X ;

Delphine MOREAU : https://orcid.org/0000-0003-2640-9931.

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont participé à la conception et la mise e œuvre de l'expérimentation et de ses analyses. Solèmne Skorupinski (version initiale), Nathalie Colbach, Delphine Moreau et Jacques Caneill (relectures) ont participé à la rédaction de l'article.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient Anna Busset, Pierre Lebreton, Nicolas Cavan ainsi que l'équipe du domaine expérimental d'Epoisses, en particulier Philippe Chamoy, Pascal Farcy, Jeremy Gervais and Benjamin Pouilly pour leur soutien technique.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été soutenu par INRAE, le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (thèse de Solèmne Skorupinski) et le projet COPRAA financé par l'Office Français de la Biodiversité.

Références bibliographiques

Brandsæter, L. O., Bakken, A. K., Mangerud, K., Riley, H., Eltun, R., & Fykse, H., 2011. Effects of tractor weight, wheel placement and depth of ploughing on the infestation of perennial weeds in organically farmed cereals. *European Journal of Agronomy*, *34*(4), 239-246. https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.001.

Busset, H., Caneill, J., Mosa, B., Motton, E., Moreau, D., Colbach, N., & Skorupinski, S., 2023. *Comment quantifier les effets des opérations de travail du sol sur la fragmentation des racines du chardon des champs (*Cirsium arvense*) ?* COLUMA Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Orléans.

Chantre, G. R., & González-Andújar, J. L. (Éds.)., 2020. *Decision Support Systems for Weed Management*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44402-0.

Colbach, N., Busset, H., Roger-Estrade, J., & Caneill, J. 2014., Predictive modelling of weed seed movement in response to superficial tillage tools. *Soil and Tillage Research*, *138*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.still.2013.12.002.

Colbach, N., & Cordeau, S., 2022. Are no-till herbicide-free systems possible? A simulation study. *Frontiers in Agronomy*, *4*, 823069. https://doi.org/10.3389/fagro.2022.823069.

Colbach, N., Kurstjens, D. A. G., Munier-Jolain, N. M., Dalbiès, A., & Doré, T., 2010. Assessing non-chemical weeding strategies through mechanistic modelling of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) dynamics. *European Journal of Agronomy*, *32*(3), 205-218. https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.11.005.

Derrouch, D., Chauvel, B., Cordeau, S., & Dessaint, F. 2022., Functional shifts in weed community composition following adoption of conservation agriculture. *Weed Research*, *62*(2), 103-112. https://doi.org/10.1111/wre.12517.

Favrelière, E., Ronceux, A., Pernel, J., & Meynard, J.-M., 2020. Nonchemical control of a perennial weed, *Cirsium arvense*, in arable cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *40*(4), 31. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00635-2.

Gerowitt, B. 2022., Advances in managing arable weed propagules. In P. Kudsk (Éd.), *Advances in integrated weed management* (p. 47-84). Burleigh Dodds Science Publishing. https://doi.org/10.19103/AS.2021.0098.

Graglia, E., Melander, B., & Jensen, R. K. 2006., Mechanical and cultural strategies to control *Cirsium arvense* in organic arable cropping systems. *Weed Research*, *46*(4), 304-312. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2006.00514.x.

Hakansson, S., 1982. *Multiplication, growth and persistence of perennial weeds.* https://www.cabi.org/ISC/abstract/19820741230.

Hamdoun, A. M., 1970. The anatomy of subterranean structures of *Cirsium arvense* (L.) Scop. *Weed Research*, *10*(3), 284-287. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1970.tb00952.x.

Hasanuzzaman, M., Mohsin, S. M., Bhuyan, M. H. M. B., Bhuiyan, T. F., Anee, T. I., Masud, A. A. C., & Nahar, K., 2020. Phytotoxicity, environmental and health hazards of herbicides : Challenges and ways forward. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation* (p. 55-99). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00003-9.

Hatcher, P. 2017. *Perennial Weeds : Expanding Horizons* (p. 389-412). https://doi.org/10.1002/9781119380702.ch13.

Holland, J. M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe : Reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *103*(1), 1-25. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.018.

Leblanc, M., & Lefebvre, E. M., 2018. Impact de différents outils de travail du sol sur le système racinaire du chardon et du laiteron. *Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement*. https://irda.blob.core.windows.net/media/5365/leblanc-lefebvre-2018-impact_de_differents_outils_de_travail_du_sol_sur_le_systeme_racinaire_du_chardon_et_du_laiteron.pdf.

Liebman, M., & Gallandt, E. R., 1997. Many little hammers : Ecological management of crop-weed interactions. In *Ecology in Agriculture* (Elsevier, p. 291-343). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-012378260-1/50010-5.

Lund, S., & Rostrup, E., 1901. Marktidselen, *Cirsium arvense*. En Monografi. Dem Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Skrifter, Raekke 6. *Naturvidenskabelig og Mathematisk Afdenling*, *10*, 149-316. Danish (summary in french in Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et des Lettres de Danemark, Copenhague).

Manichon, H., 1982. *Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : Élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique.* INAPG; Institut National Agronomique Paris-Grignon.

Manichon, H., 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. In *Soil Compaction and Regeneration*. Routledge.

Mohler, C. L., Teasdale, J. R., & DiTommaso, A. (avec Sustainable Agriculture Research & Education (Program))., 2021. *Manage weeds on your farm : A guide to ecological strategies*. Sustainable Agriculture Research & Education (SARE).

Nichols, V., Verhulst, N., Cox, R., & Govaerts, B., 2015. Weed dynamics and conservation agriculture principles : A review. *Field Crops Research*, *183*, 56-68. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.012

Oerke, E.-C., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, *144*(1), 31-43. https://doi.org/10.1017/S0021859605005708.

R Core Team., 2024. *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [Logiciel]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/.

Salonen, J., Jalli, H., Muotila, A., Niemi, M., Ojanen, H., Ruuttunen, P., & Hyvönen, T., 2023. Fifth survey on weed flora in spring cereals in Finland. *Agricultural and Food Science*, *32*(2), 51-68. https://doi.org/10.23986/afsci.130009.

Sciegienka, J., Keren, E., & Menalled, F., 2011. Impact of root fragment dimension, weight, burial depth, and water regime on *Cirsium arvense* emergence and growth. *Canadian Journal of Plant Science*, *91*(6), 1027-1036. https://doi.org/10.4141/cjps2011-059.

Skorupinski, S., Busset, H., Caneill, J., Moreau, D., Mosa, B., Motton, E., & Colbach, N., 2024. Combining a field experiment and literature to model the regrowth probability of perennial storage organs fragmented by tillage: Case study of *Cirsium arvense* (L.) Scop. *Soil & Tillage Research*, *224*. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106279.

Skorupinski, S., Colbach, N., Busset, H., Matejicek, A., & Moreau, D., 2024. Rhizome fragment weight and density of competing shoots determine belowground regrowth of *Elymus repens*. *Weed Research*, *64*(3), 207-218. https://doi.org/10.1111/wre.12623.

Tiley, G. E. D., 2010. Biological Flora of the British Isles : *Cirsium arvense* (L.) Scop. *Journal of Ecology*, *98*(4), 938-983. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01678.x.

Torssell, B., Eckersten, H., Anbari, S., Lundkvist, A., & Verwijst, T., 2015. Modelling below-ground shoot elongation and emergence time of *Sonchus arvensis* shoots. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, *65*, 582-588. https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1044463.

Trichard, A., Alignier, A., Chauvel, B., & Petit, S., 2013. Identification of weed community traits response to conservation agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *179*, 179-186. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.012.

Turner, R. J., Davies, G., Moore, H., Grundy, A. C., & Mead, A., 2007. Organic weed management: A review of the current UK farmer perspective. *Crop Protection*, *26*(3), 377-382. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.01.021.

Pour citer cet article : Solèmne Skorupinski, Hugues Busset, Jacques Caneill, Delphine Moreau, Brice Mosa, *et al.*. Effets des opérations de travail du sol sur la fragmentation des racines du chardon des champs (Cirsium arvense). *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.16-27. 10.17180/ciag-2025-vol101-art02

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

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

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

Le rôle de l'allélopathie dans la régulation des adventices : entre rêve et réalité

Delphine MOREAU[1], Inès MAHE[1], Bruno CHAUVEL[1], Nathalie COLBACH[1], Stéphane CORDEAU[1], Aurélie GFELLER[2], Antje REISS[3]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro Dijon, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

[2] Herbology in Field Crops, Plant Production Systems, Agroscope, Nyon, Switzerland

[3] Chr. Hansen A/S, Hørsholm, Denmark

Correspondance : delphine.moreau@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art03

Résumé

L'allélopathie peut-elle aider à réguler les adventices au champ ? Cette question non résolue revêt un intérêt majeur en agroécologie, mais quantifier les effets de ce mécanisme présente une difficulté : dissocier les effets de l'allélopathie de ceux de la compétition pour les ressources. Nous avons mené une revue de la littérature pour identifier des preuves au champ du rôle de l'allélopathie (par des cultures vivantes) dans la régulation des adventices, indépendamment de la compétition (en considérant les études comparant l'eff*et al*lélopathique de plusieurs variétés cultivées d'une même espèce). Dans la plupart des articles, le rôle de la compétition n'est pas correctement pris en compte. Ainsi, contrairement aux conclusions des auteurs de ces articles, il n'est pas possible de déterminer si la régulation des adventices est due aux interactions allélopathiques ou à la compétition pour les ressources. Au bilan, peu d'études fournissent des preuves convaincantes des effets de l'allélopathie au champ.

Mots-clés : Revue de la littérature, compétition, variété, composés allélochimiques

Abstract: The role of allelopathy in weed regulation: between dream and reality

To what extent can allelopathy contribute to regulate weeds in the field? This controversial question is of major interest in agroecology. Quantifying the effects of this mechanism, however, presents a difficulty: dissociating the effects of allelopathy from those of other mechanisms, such as competition for resources. Here, a systematic review of the scientific literature was conducted to identify field-based evidence of the role of allelopathy (by living crops only) in weed regulation, independently of competition (focusing on studies comparing different crop varieties of the same species). We show that, in most articles, the role of competition is not considered or studied exhaustively. Thus, contrary to the authors' conclusions, it is not possible to determine whether weed regulation is due to allelopathy or competition. Overall, few studies provide convincing evidence of the effects of allelopathy in the field.

Keywords: Literature review, competition, variety, allelochemicals

1. Introduction

Les adventices peuvent réduire considérablement le rendement et la qualité de la récolte, principalement en entrant en compétition avec la culture pour le prélèvement des ressources (Oerke, 2006). Différentes pratiques peuvent réguler la dynamique des adventices, mais leur efficacité n'est pas totale. C'est la raison pour laquelle les herbicides de synthèse, avec leur haut niveau d'efficacité et leur d'utilisation plus faible, jouent généralement un rôle clé pour assurer la production des cultures dans les systèmes de culture conventionnels. Cependant, la réduction de l'utilisation des herbicides est devenue

nécessaire compte tenu de leur nocivité pour l'environnement (dont la diversité des communautés biologiques) et la santé publique et de l'impasse technique résultant de la résistance aux herbicides.

L'utilisation d'espèces/variétés cultivées réprimant les adventices apparaît comme une des options prometteuses pour favoriser la régulation biologique des adventices (Andrew *et al.*, 2015; Petit *et al.*, 2018). La compétition pour les ressources (lumière, nutriments ou eau) est le mécanisme sous-jacent le plus fréquemment cité et a été étudié de manière exhaustive jusqu'à présent (Zimdahl, 2007). L'allélopathie a également été suggérée pour jouer un rôle dans la régulation des adventices par les cultures vivantes. Malgré un grand nombre d'études, l'allélopathie reste un sujet scientifique controversé. Bien qu'il soit reconnu que les plantes émettent un grand nombre de substances, le rôle effectif de ces molécules est très difficile à démontrer (Inderjit and Del Moral, 1997). En limitant la définition aux interactions culture-adventice, l'allélopathie se réfère ici à tout effet nuisible direct d'une plante sur une autre par la production de composés chimiques (allélochimiques) exsudés par les racines (Rice, 1974). Plusieurs cultures appartenant à des familles botaniques diverses telles que les Astéracées, Brassicacées, Fabacées, Poacées et Polygonacées ont été étudiées pour leur potentiel allélopathique contre les adventices, et des différences entre les espèces et les variétés d'une espèce donnée ont été signalées (Wu *et al.*, 1999; Tesio and Ferrero, 2010; Jabran *et al.*, 2015). Néanmoins, l'eff*et al*lélopathique des cultures sur les adventices a principalement été observé en conditions contrôlées (Kato-Noguchi and Salam, 2013), alors que les expériences sur le terrain sont rares. Caractériser l'allélopathie uniquement en laboratoire semble insuffisant. En effet, même si une variété a montré un potentiel allélopathique élevé en conditions contrôlées, l'eff*et al*lélopathique peut être inefficace en conditions de terrain en raison d'interactions complexes dans les agroécosystèmes (Khanh *et al.*, 2005).

Deux raisons principales expliquent pourquoi il est difficile de démontrer des effets allélopathiques sur le terrain **:**

- les effets liés à l'allélopathie sont difficiles à dissocier de ceux liés à la compétition pour les ressources (lumière, nutriments, eau). Les plantes doivent être suffisamment proches pour que les substances allélochimiques libérées par le donneur soient absorbées par le receveur. Mais avec une telle proximité, les plantes sont en compétition pour les ressources ;
- alors que la compétition pour la lumière se produit systématiquement dans les couverts cultivés, dès que les feuilles des plantes voisines se chevauchent ou que les plantes à croissance rapide dépassent leurs voisines, la production d'allélochimiques et la sensibilité de la plante réceptrice varient en fonction de l'espèce végétale, du stade de la plante et de l'environnement (Inderjit and Del Moral, 1997).

Ainsi, l'allélopathie et la compétition peuvent se produire de manière concomitante, ce qui rend difficile de déterminer si seule l'allélopathie par les plantes cultivées peut affecter de manière significative la croissance des adventices dans le champ.

Pour exclure autant que possible les effets de la compétition entre les cultures, une option consiste à étudier les effets allélopathiques de différentes variétés d'une espèce cultivée donnée. En effet, différentes variétés peuvent être judicieusement choisies pour avoir (Figure 1) :

- une morphologie et une dynamique de croissance similaires (attestées par des mesures de caractéristiques végétales), et donc un effet compétitif comparable contre les adventices, mais (2) des propriétés allélopathiques différentes (caractérisées en conditions contrôlées). Dans cette situation, les différences variétales dans l'effet de suppression des adventices au champ qui sont corrélées avec les différences dans les propriétés allélopathiques peuvent être considérées comme une preuve de l'allélopathie, indépendamment de la compétition ;

- des caractéristiques différentes relatives à la fois à la compétition et aux propriétés allélopathiques. Dans ce cas, les différences variétales dans l'effet de suppression des adventices au champ qui sont en corrélation avec les différences dans les propriétés allélopathiques mais pas avec les différences dans les valeurs des caractères liés à la compétition peuvent être considérées comme fournissant également des preuves de l'allélopathie, indépendamment de la compétition.

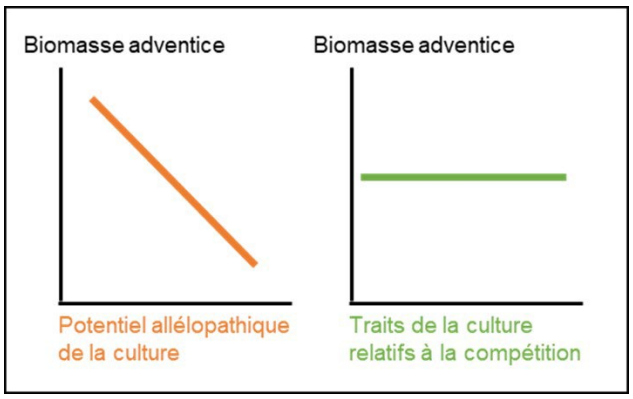


Figure 1 : Exemple schématique de preuves convaincantes du rôle de l'allélopathie des cultures (indépendamment de la compétition) dans la régulation des adventices en comparant différentes variétés d'une même espèce cultivée. Corrélation entre la biomasse des adventices et le potentiel allélopathique de la culture (a), sans corrélation entre la biomasse des adventices et les valeurs des traits de compétition de la culture (b). Les corrélations sont calculées indépendamment pour plusieurs traits de compétitivité des cultures. Un point représente une variété de cultivée.

Dans ce contexte, l'objectif de cet article était de rechercher dans la littérature des preuves scientifiques de la régulation des adventices par l'allélopathie des cultures dans des conditions de terrain. L'accent a été mis sur les études comparant différentes variétés d'une espèce donnée, afin de distinguer les effets de l'allélopathie de ceux de la compétition. Nous avons limité notre analyse à l'exsudation racinaire par les plantes vivantes (en excluant les études sur l'allélopathie par les résidus de culture). Notre approche a consisté à réaliser une revue systématique. Contrairement à la revue narrative qui vise à discuter d'un large éventail de questions sur un sujet donné, une revue systématique consiste à effectuer une recherche exhaustive de tous les articles entrant dans le cadre du sujet de recherche. Cette approche nous a permis de fournir une analyse exhaustive, reproductible, quantitative et critique de la littérature. L'identification des forces et faiblesses dans les articles que nous avons étudiés nous a permis de fournir des indications sur les dispositifs expérimentaux à mettre en œuvre pour quantifier les effets de l'allélopathie au champ, indépendamment de la compétition.

2. Matériels et méthodes

Une première étape a visé à identifier un corpus d'articles liés au sujet de recherche. Les articles ont été collectés en effectuant une recherche sur la base de données Web of Science (www.webofscience.com/wos) à partir de 1956. La recherche a été menée en deux grandes phases (Tableau 1).

La première a consisté à constituer un corpus initial d'articles (étape 1 du Tableau 1) puis, sur cette base, à exclure les articles en dehors de notre question de recherche (étapes 2, 3, 4) ou qui ne présentaient pas des résultats primaires (nous empêchant d'accéder aux données brutes) (étape 5). Des articles qui ne pouvaient pas être extraits avec la requête de recherche ont été ajoutés manuellement au corpus (étape 6).

Dans un deuxième temps, tous les articles ont été examinés en détail. D'abord, les articles qui, d'après leur résumé, n'étaient finalement pas liés à notre question ont été écartés (étape 7). Ensuite, comme nous nous intéressions aux effets allélopathiques sur les adventices et à la distinction entre l'allélopathie et la compétition pour les ressources, les articles devaient fournir des données quantitatives sur la pression exercée par les adventices et sur les caractéristiques compétitives de la culture. Des articles ont donc été supprimés lorsque la pression des adventices n'était pas quantifiée,

ou lorsque la compétition n'était pas prise en compte, pas étudiée ou pas présentée avec des données quantitatives (étape 8).

Tableau 1 : Étapes de la recherche bibliographique et nombre d'articles associés.

Étape	Objectif	Nombre d'articles
1	Sélection d'un corpus initial	523
2	Exclusion des articles ne traitant pas de l'allélopathie sur les adventices	467
3	Exclusion des articles ne ciblant pas les effets allélopathiques par des plantes vivantes	370
4	Exclusion des articles ne comportant pas d'expérimentation au champ	70
5	Exclusion des articles de synthèse	61
6	Ajout d'articles qui n'ont pas été sélectionnés dans les étapes précédentes	66
7	Exclusion d'articles après la lecture du résumé	45
8	Exclusion d'articles après la lecture du matériel et méthode	25

3. Résultats et discussion

3.1. Très peu d'études sur la caractérisation des effets de l'allélopathie ont été conduites au champ

L'analyse des principaux goulots d'étranglement dans la sélection du corpus (Tableau 1) a permis d'illustrer les principaux points faibles des recherches antérieures. Parmi les différents critères de sélection de la requête, le critère d'expérimentation au champ était le plus restrictif, réduisant le nombre d'articles de 81 % (étape 4 du Tableau 1). Cette constatation confirme quantitativement que, dans la plupart des études sur l'allélopathie, les essais ont été réalisés dans des conditions contrôlées.

3.2. Peu d'études prennent explicitement en compte la compétition en plus de l'allélopathie

Un autre point-clé a été le goulot d'étranglement en étape 8 qui visait à évincer les articles qui ne quantifiaient pas la pression des adventices ou dans lesquels la compétition n'était pas prise compte, étudiée ou présentée par des données quantitatives. Ainsi, malgré la nécessité de différencier l'allélopathie de la compétition (voir la section Introduction), environ un tiers des articles dans ce corpus ignoraient la compétition par culture.

De manière surprenante, pour la plupart d'entre eux, les auteurs ont supposé que l'allélopathie était le seul mécanisme expliquant la variation de l'infestation par les adventices entre les variétés de cultures, ce qui est peu probable. Dans quelques articles, les auteurs ont estimé que les variétés cultivées testées présentaient des traits morphologiques similaires (et donc des aptitudes similaires à la compétition) sans toutefois disposer de données quantitatives pour étayer leurs affirmations. Quelques articles n'ont pas présenté de données quantitatives sur la pression des adventices, ce qui ne permet pas de comparer les variétés cultivées sur cette variable de réponse.

Au total, seuls 25 articles ont étudié les effets différentiels des variétés cultivées sur la pression des adventices, en tenant compte explicitement de l'allélopathie et de la compétition (la liste complète des références est donnée dans Mahé *et al.* (2022)). Par la suite, seul ces articles ont été analysés.

3.3. Peu d'articles ont fourni des preuves convaincantes de la présence d'effets allélopathiques sur le terrain

Par l'analyse détaillée des conclusions des 25 articles prenant en compte explicitement les effets de la compétition, en plus de l'allélopathie, nous avons identifié 18 articles pour lesquels les auteurs rapportaient un effet significatif de l'allélopathie au champ sur la régulation des adventices (Figure 2a). Treize d'entre eux rapportaient des effets combinés de l'allélopathie et de la compétition, alors que cinq autres considéraient que l'allélopathie était le seul mécanisme à l'origine des différences entre variétés dans leur aptitude à réguler les adventices.

Nous avons alors mené une analyse détaillée de ces 18 derniers articles par une approche qualitative (pertinence des dispositifs et des protocoles expérimentaux) et quantitative (gammes de variation des variables mesurées, analyses de corrélation) afin de déterminer s'ils fournissaient effectivement des preuves convaincantes des effets de l'allélopathie indépendamment de la compétition (Figure 2a). D'après l'analyse, 11 articles n'étaient pas convaincants pour deux raisons majeures :

1. une corrélation entre l'aptitude à la compétition des variétés et leur aptitude à réguler les adventices a été identifiée ; l'allélopathie et la compétition n'ont pas pu être différenciées ;
2. l'aptitude à la compétition des variétés n'était pas suffisamment caractérisée, si bien que, même si des différences de régulation des adventices étaient observées entre variétés au champ, on ne pouvait pas exclure un effet de la compétition.

Au final, seuls sept articles pouvaient vraiment fournir des éléments de preuve des effets de l'allélopathie au champ. Ils concernent uniquement des espèces cultivées graminées annuelles : sorgho, blé, seigle, orge et triticale. Néanmoins, même pour ces sept articles, nous avons émis quelques réserves liées principalement à l'absence de mesures permettant de s'assurer que les ressources du sol n'étaient pas limitantes (condition importante pour s'assurer de l'absence de compétition souterraine).

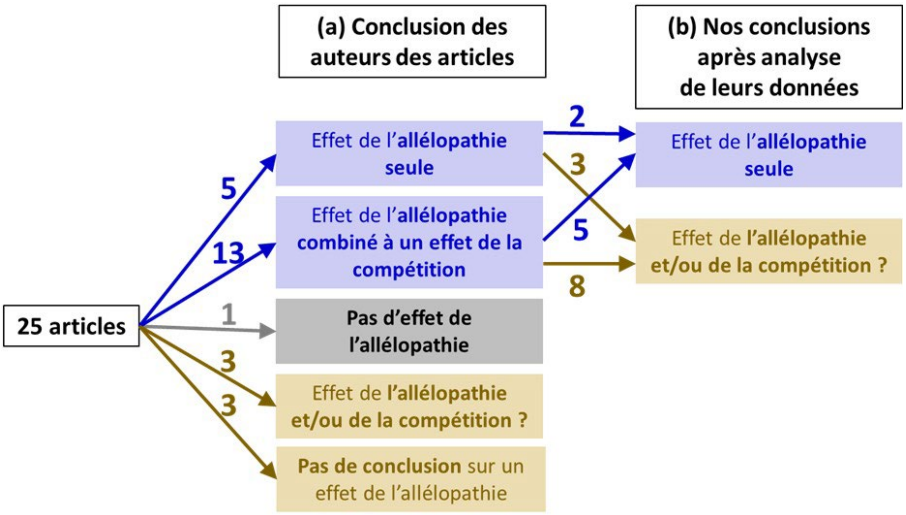


Figure 2 : Cohérence entre les conclusions des auteurs (a) et nos conclusions (b) sur les preuves au champ des effets de l'allélopathie des cultures sur les adventices pour les 25 articles étudiés en détail. Les chiffres représentent le nombre d'articles, divisés en absence de preuve d'allélopathie (marron), preuve de l'absence (gris) et présence (bleu) d'allélopathie. La liste complète des références des 25 articles est donnée dans Mahé *et al.* (2022)

3.4. Quels dispositifs pour quantifier les effets de l'allélopathie au champ ?

Les faiblesses et les forces des articles analysés dans la présente revue systématique ont mis en évidence des aspects méthodologiques-clés et nous ont permis d'énumérer un certain nombre de critères à prendre en compte dans un protocole optimal pour évaluer la contribution de l'allélopathie dans la régulation des adventices par les variétés cultivées sur le terrain (Figure 3). Il n'y a pas de réponse simple à la question du protocole idéal (par exemple, le nombre de répétitions, d'observations et de dates de mesure, la taille de la parcelle ou le nombre de traits compétitifs mesurés), car tous ces éléments sont un compromis pour chaque expérimentation et dépendent principalement des ressources humaines, techniques et financières. Néanmoins, ils déterminent ensuite la puissance statistique et la fiabilité des résultats.

- **Dispositif expérimental**

Notre analyse justifie l'importance de mener des expériences sur l'allélopathie pendant plusieurs années et sur plusieurs sites dans des conditions pédoclimatiques variées. En effet, les conditions environnementales influencent en partie la capacité de suppression des adventices par les variétés cultivées. Les microorganismes présents dans le sol et susceptibles de dégrader/transformer les allélochimiques semblent être une raison importante de résultats très contrastés entre sites, années et conditions environnementales.

En outre, il est particulièrement recommandé de semer des adventices pour assurer une pression homogène en termes d'espèces et de densité d'adventices entre les parcelles, ou au moins de s'assurer que la pression naturelle d'adventices est homogène.

Il convient également de vérifier que les ressources du sol (c'est-à-dire l'eau et les nutriments) ne sont pas limitées afin de minimiser la compétition. Une mesure de la quantité d'azote aérienne de la culture peut être utilisée pour vérifier que les plantes ne souffrent pas de carences en azote et un indice de nutrition azotée peut également être calculé (Perthame *et al.*, 2020; Louarn *et al.*, 2021). De plus, l'eau semble nécessaire à l'établissement de l'eff*et al*lélopathique, puisque les substances allélochimiques doivent être libérées dans le milieu pédologique et que, comme pour toutes les molécules, l'absorption des substances allélochimiques par le système racinaire de la plante réceptrice dépend de la teneur en eau du sol.

- **Mesures**

Trois catégories de mesures doivent être effectuées pour s'assurer que la part de la variance de l'infestation d'adventices non expliquée par la compétition puisse être expliquée, au moins en partie, par l'allélopathie (Figure 3) : la caractérisation des adventices, la caractérisation de l'aptitude à la compétition de la culture, et l'évaluation du potentiel allélopathique de la culture. Ces deux dernières catégories de mesures doivent ensuite être analysées par des régressions multiples afin d'évaluer leur contribution respective à l'explication de la biomasse d'adventices.

Il semble que l'allélopathie affecte moins la phase de germination des graines que la phase de croissance des plantes (Zhang *et al.*, 2021). Par conséquent, les efforts devraient être concentrés sur l'étude de la croissance des adventices plutôt que sur leur nombre. Idéalement, l'infestation d'adventices devrait être évaluée par la biomasse d'adventices, sinon par une estimation visuelle.

Il existe deux façons d'estimer le potentiel allélopathique d'une variété : i) en identifiant et en quantifiant les substances allélochimiques ou ii) en mesurant l'inhibition des adventices en conditions contrôlées. L'inhibition des adventices en conditions contrôlées doit être évaluée en utilisant les principales espèces d'adventices observées sur le terrain, car l'allélopathie peut être sélective et l'effet peut dépendre de l'espèce adventice.

Les traits de compétitivité présentés dans la Figure 3 ne constituent pas une liste exhaustive des mesures à effectuer, mais plutôt une « boîte à outils » dans laquelle les chercheurs peuvent choisir des mesures adaptées à la disponibilité de leur personnel et à leurs ressources matérielles et financières.

Néanmoins, le nombre de caractères doit être maximisé pour garantir une bonne caractérisation de la compétitivité des cultures, y compris des mesures à des stades précoces et tardifs. Les caractères doivent être choisis pour couvrir différentes échelles : l'échelle de la plante (par exemple, la hauteur, le nombre de tiges) et l'échelle du couvert, qui est plus intégrative (c'est-à-dire la combinaison de plusieurs caractères de la plante), et pour caractériser l'occupation verticale de la culture, la couverture du sol ainsi que la production globale de biomasse. Certains traits sont substituables lorsqu'ils fournissent globalement les mêmes informations, comme l'indice de surface foliaire et la couverture du sol par exemple. En outre, il est conseillé de mesurer les traits de compétitivité des cultures dans des parcelles exemptes d'adventices afin d'évaluer le potentiel de compétitivité des cultures vis-à-vis des adventices. Le moment choisi pour mesurer les caractéristiques des cultures peut influencer la caractérisation de la compétitivité des cultures. La vigueur précoce de la culture contribue fortement à la compétition ultérieure entre la culture et les adventices, c'est pourquoi certains traits de compétitivité devraient être mesurés à un stade précoce du développement de la culture (par exemple, une ou deux semaines avant l'épiaison).

D'autres techniques (neutralisation des composés allélochimiques par des absorbants, utilisation de filets pour limiter la compétition pour la lumière, etc.) peuvent également être mobilisées pour différencier allélopathie et compétition, comme discuté dans Mahé *et al.* (2022).

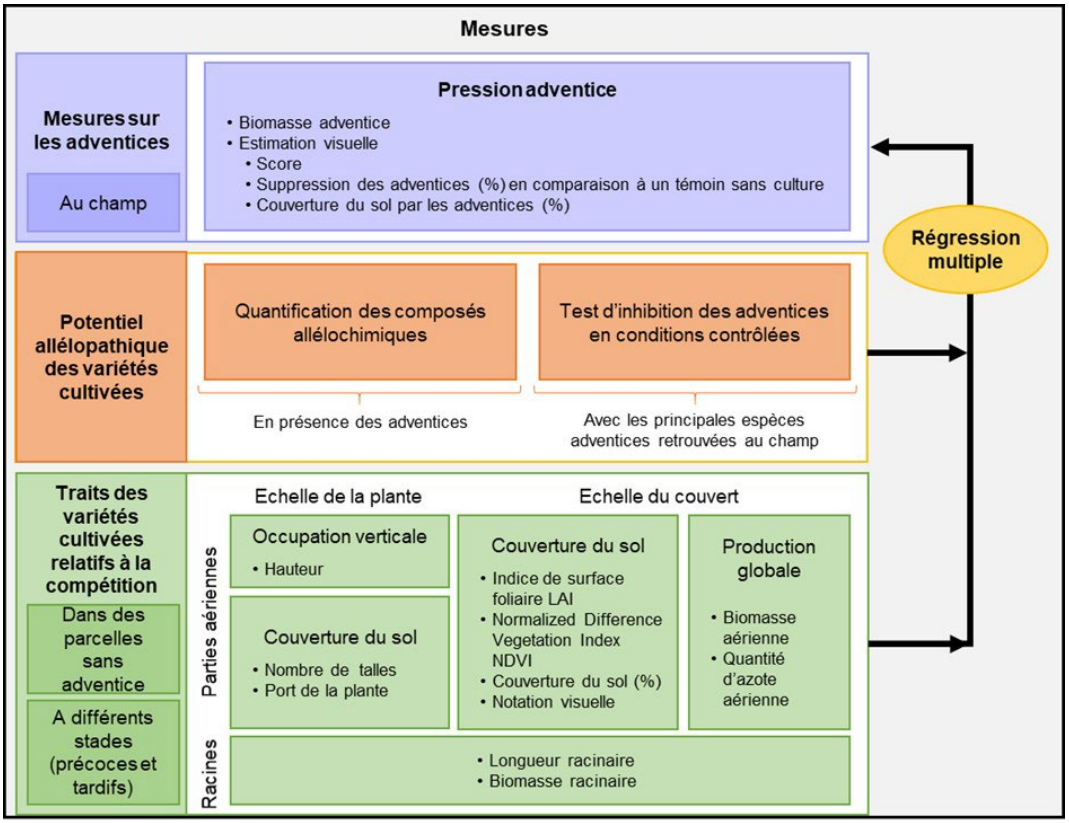


Figure 3 : Principaux points méthodologiques à prendre en compte lors de la mise en œuvre d'une expérimentation au champ visant à caractériser les effets allélopathiques de différentes variétés cultivées.

4. Conclusion

Cette première revue systématique de la littérature scientifique sur le sujet a permis d'identifier trois éléments marquants :

- la grande majorité des études portant sur les effets allélopathiques des variétés cultivées sur les plantes adventices sont menées uniquement en conditions contrôlées ; ce résultat

s'explique probablement par la difficulté d'isoler au champ les effets strictement dus à l'allélopathie de ceux de la compétition ;
- ce travail pointe la nécessité d'être très vigilant lors de la lecture d'articles rapportant des effets de l'allélopathie au champ ; en effet, peu d'entre eux mettent en œuvre des moyens suffisants pour s'assurer que les effets observés sont uniquement dus à l'allélopathie, et pas aussi à d'autre mécanismes (notamment la compétition) ;
- sur l'ensemble de la littérature scientifique depuis 1956, nous avons identifié seulement sept articles mettant en œuvre des mesures pour quantifier les effets de l'allélopathie sur les adventices au champ, avec néanmoins quelques réserves ne nous permettant pas d'écarter complètement un effet de la compétition.

Ainsi, la pertinence de développer une sélection variétale sur des traits relatifs à l'allélopathie dans une optique de régulation des adventices reste une question ouverte. A noter qu'il existe des variétés allélopathiques de riz en Chine, mais leur effet au champ n'est pas décrit dans la littérature internationale.

Cette analyse bibliographique ne remet pas en question la capacité de nombreuses espèces végétales à réguler les adventices au champ : de nombreuses études ont montré un effet régulateur des couverts végétaux sur les adventices, sans chercher à identifier les mécanismes sous-jacents (Teasdale *et al.*, 2007; Mirsky *et al.*, 2011; Rouge *et al.*, 2022). Elle ne remet pas non plus en question l'existence du phénomène biologique de l'allélopathie (c'est-à-dire la capacité d'espèces végétales à émettre des composés allélochimiques) dans les interactions entre espèces végétales dans les agrosystèmes ou dans les écosystèmes naturels. Elle met en avant la difficulté scientifique et technique à quantifier le rôle spécifique de l'allélopathie au champ.

L'analyse de la littérature scientifique a permis d'identifier les forces et faiblesses des approches menées pour mesurer les effets de l'allélopathie sur les adventices au champ. Pour aller plus loin sur ce sujet, de nouvelles expérimentations pourront être menées en s'appuyant sur les recommandations formulées en matière de dispositif expérimental, de mesures à effectuer et d'analyse statistique des données.

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

Delphine MOREAU : https://orcid.org/0000-0003-2640-9931

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X

Stéphane CORDEAU : https://orcid.org/0000-0003-1069-8388

Aurélie GFELLER : https://orcid.org/0000-0003-3459-9667

Contributions des auteurs

DM a dirigé l'étude. DM et NC ont financé l'étude. IM, DM, NC, BC et SC ont rassemblé les premiers documents pour définir les questions de recherche. AG et AR ont fourni des données et des articles complémentaires. IM a recherché la littérature, analysé les articles et rédigé la première version. Tous les auteurs ont contribué à l'analyse de la littérature et à la rédaction.

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

Ce travail a été soutenu par INRAE, le projet Casdar RAID financé par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale « Développement agricole et rural »), et le projet COPRAA qui a été soutenu par l'Office Français de la Biodiversité dans le cadre de l'appel Ecophyto « Approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques : combiner les produits préventifs et curatifs dans les filières, de l'agriculteur au consommateur » lancé par les Ministères français en charge de l'Ecologie, de l'Agriculture, de la Santé et la Recherche. Ce travail s'inscrit dans un projet « Partenariat Hubert Curien (PHC) - Germaine de Staël ».

Références bibliographiques

Andrew I. K. S., Storkey J., Sparkes D. L., 2015. A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management. Weed Research 55, 239-248.

Inderjit Del Moral, R., 1997. Is separating resource competition from allelopathy realistic? The botanical review 63, 221-230.

Jabran K., Mahajan G., Sardana V., Chauhan B. S., 2015. Allelopathy for weed control in agricultural systems. Crop Protection 72, 57-65.

Kato-Noguchi H., Salam M. A., 2013. Allelopathy of bangladeshi rice: application in the agricultural systems. In: Heidelberg, Berlin

Khanh T., Chung M., Xuan T., Tawata S., 2005. The exploitation of crop allelopathy in sustainable agricultural production. Journal of Agronomy and Crop Science 191, 172-184.

Louarn G., Bedoussac L., Gaudio N., Journet E.-P., Moreau D., Steen Jensen E., Justes E., 2021. Plant nitrogen nutrition status in intercrops– a review of concepts and methods. European Journal of Agronomy 124, 126229.

Mahé I., Chauvel B., Colbach N., Cordeau S., Gfeller A., Reiss A., Moreau D., 2022. Deciphering field-based evidence for weed regulation by crop allelopathy. A review. Agronomy for Sustainable Development 42, 50.

Mirsky S. B., Curran W. S., Mortenseny D. M., Ryany M. R., Shumway D. L., 2011. Timing of Cover-Crop Management Effects on Weed Suppression in No-Till Planted Soybean using a Roller-Crimper. Weed Science 59, 380-389.

Oerke E. C., 2006. Crop losses to pests. Journal of Agricultural Science 144, 31-43.

Perthame L., Colbach N., Brunel-Muguet S., Busset H., Lilley J. M., Matejicek A., Moreau D., 2020. Quantifying the nitrogen demand of individual plants in heterogeneous canopies: a case study with crop and weed species. European Journal of Agronomy 119

Petit S., Cordeau S., Chauvel B., Bohan D., Guillemin J. P., Steinberg C., 2018. Biodiversity-based options for arable weed management. A review. Agronomy for Sustainable Development 38, 21-21.

Rice E. L., 1974. Allelopathy. Academic Press, New York, 353-353 p.

Rouge A., Adeux G., Busset H., Hugard R., Martin J., Matejicek A., Moreau D., Guillemin J.-P., Cordeau S., 2022. Weed suppression in cover crop mixtures under contrasted levels of resource availability. European Journal of Agronomy 136, 126499.

Teasdale J., Brandsaeter L., Calegari A., Neto F. S., Upadhyaya M., Blackshaw R., 2007. Cover crops and weed management. Non chemical weed management principles. Concepts and Technology, CABI, Wallingford, UK 49-64.

Tesio F., Ferrero A., 2010. Allelopathy, a chance for sustainable weed management. International Journal of Sustainable Development and World Ecology 17, 377-389.

Wu H., Pratley J., Lemerle D., Haig, T., 1999. Crop cultivars with allelopathic capability. Weed Research 39, 171-180.

Zhang Q., Zhang Q., Lin S., Wang P., Li J., Wang H., He, H., 2021. Dynamic analysis on weeds inhibition and phenolic acids of allelopathic rice in field test. Archives of Agronomy and Soil Science 67, 1809-1821.

Zimdahl R. L., 2007. Weed-crop competition: A review. 2nd edition. Blackwell Publishing, 219-219 p.

Pour citer cet article : Delphine Moreau, Inès Mahe, Bruno Chauvel, Nathalie Colbach, Stéphane Cordeau, *et al.*. Le rôle de l'allélopathie dans la régulation des adventices : entre rêve et réalité. Innovations agronomiques, 2025, 101, pp.28-37. 10.17180/ciag-2025-vol101-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.

La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture

Laurène PERTHAME[1,2], Sandrine PETIT[1], Nathalie COLBACH[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon

[2] Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR EcoSys, 91120 Palaiseau

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art04

Résumé

L'objectif était d'évaluer la contribution de la prédation des semences adventices par les carabes à la régulation biologique des adventices dans les systèmes de grande culture. Un modèle a été développé à partir de nos travaux passés et de la littérature, pour prédire le taux de prédation journalier des semences adventices à partir des conditions environnementales, des opérations culturales et des traits des semences adventices. Ce modèle a été intégré dans le modèle FLORSYS qui simule la dynamique journalière de la flore adventice et le rendement des cultures des systèmes de culture. Des simulations ont été comparées à des observations de terrain, montrant qu'inclure la prédation dans FLORSYS améliore sa qualité de prédiction. Les simulations ont montré que la prédation des semences adventices peut réduire l'infestation des champs par les adventices et améliorer les rendements des cultures, mais l'effet du système de culture et du pédoclimat reste plus important.

Mots-clés : adventice, régulation biologique, gestion agroécologie, modèle de simulation, validation de modèle, prédation de semences

Abstract: Weed seed predation by carabid beetles can help to regulate weeds in field crop systems

The aim was to assess the contribution of weed seed predation by carabids to the biological regulation of weeds in arable cropping systems. A model was developed from our past experiments and the literature, to predict the daily weed seed predation rate from environmental conditions, cropping operations and weed seed traits. The model was integrated into the FLORSYS model, which simulates the daily weed dynamics and the crop yields over the years, from cropping system and pedoclimate. Simulations were compared with field observations, showing that including predation in FLORSYS improves its predictive quality. Simulations also showed that weed seed predation can reduce field infestation by weeds and improve crop yields, but the effect of cropping system and weather is more influential.

Keywords: weed, biological regulation; agroecological management; simulation model; model validation; seed predation

1. Introduction

Afin de réduire l'utilisation d'herbicides, différentes voies de régulation biologique des adventices (« mauvaises herbes ») sont actuellement étudiées. Parmi celles-ci, la prédation des graines d'adventices par les carabes semble prometteuse. Bien qu'observée dans différents systèmes de culture et conditions de terrain (Petit *et al.*, 2018), il n'a pas encore été démontré que ce processus influence réellement la dynamique des adventices dans le temps et réduit la nuisibilité des adventices pour la production des cultures.

La prédation des différentes espèces adventices par les carabes est d'abord déterminée par les préférences alimentaires des carabes (Petit *et al.*, 2014). L'activité des carabes et la prédation des graines d'adventices qui en résulte dépendent de la qualité de l'habitat dans le champ, notamment de la densité et de la structure du couvert végétal, de la température, des sources de nourriture disponibles ou de la présence d'autres prédateurs (Holland and Luff, 2000). La présence de bordures de champs, c'est-à-dire d'habitats semi-naturels linéaires qui délimitent les champs (Marshall and Moonen, 2002), peut également améliorer la diversité et l'activité des carabes. A contrario, les opérations culturales, notamment le travail du sol et les applications de pesticides, perturbent les carabes et tendent à réduire la prédation des semences adventices.

Comme la prédation des semences et la dynamique des adventices dépendent ainsi de nombreux facteurs, plusieurs équipes ont proposé des modèles synthétisant les connaissances existantes sur la prédation des semences (par exemple, Westerman *et al.*, 2006; Daouti *et al.*, 2022). Cependant, aucun de ces modèles n'inclut suffisamment d'espèces d'adventices et de cultures, de processus du cycle de vie et de techniques culturales pour simuler réellement l'impact des systèmes de culture sur la dynamique des adventices, sans parler des conséquences pour la production agricole ou la biodiversité. Inversement, il existe de nombreux modèles de dynamique des adventices dans la littérature (Chantre and González-Andújar, 2020), mais aucun d'entre eux n'inclut la prédation des graines d'adventices.

Par conséquent, l'objectif du présent article était (1) de modéliser l'impact du système de culture, des habitats semi-naturels en bordure du champ et du pédoclimat sur la prédation des graines d'adventices par les carabes afin de compléter le modèle FLORSYS (Colbach *et al.*, 2019; Colbach *et al.*, 2021), qui simule la dynamique des adventices, la biodiversité et le rendement des cultures à partir des systèmes de culture, du sol et des conditions météorologiques, (2) d'évaluer si l'inclusion de la prédation des graines est nécessaire pour prédire correctement la dynamique des adventices dans différents systèmes de culture, (3) de déterminer quelles composantes du sous-modèle de prédation des graines ont le plus d'influence. Le détail de ces travaux sont présentés par Perthame *et al.* (2023).

2. Modéliser la prédation des semences adventices par les carabes

2.1. Le modèle FLORSYS existant

FLORSYS (Colbach *et al.*, 2019; Colbach *et al.*, 2021) est un champ virtuel sur lequel des systèmes de culture peuvent être testés avec une large gamme de mesures virtuelles de variables d'état de la culture, des adventices et de l'environnement. Le modèle est actuellement paramétré pour 32 espèces d'adventices annuelles fréquentes et contrastées et 33 espèces de cultures.

2.1.1. Cycle de vie des adventices et des cultures

Les variables d'entrée de FLORSYS consistent en (1) une description du champ simulé, avec le climat journalier, la latitude et les caractéristiques du sol ; (2) toutes les cultures et opérations de gestion, avec les dates, les outils et les options des opérations (matières actives et doses de pesticides, profondeur de travail du sol, etc.) ; et (3) le stock semencier adventice présent dans le sol au début de la simulation. Ces variables influencent le cycle de vie annuel des adventices et des cultures, avec un pas de temps journalier (Figure 1.A). Les états des semences (viables, dormantes, germées, en croissance pré-levée) sont déterminés par la structure du sol, la température et le potentiel hydrique, en distinguant 30 horizons de sol de 1 cm d'épaisseur, de la surface du sol jusqu'à 30 cm de profondeur. Les processus post-levée (photosynthèse, respiration, croissance, réponse à l'ombre) sont déterminés par le rayonnement intercepté et la température de l'air. À la maturité des plantes, les semences adventices sont ajoutées au stock semencier ; celles des cultures sont récoltées pour calculer le rendement.

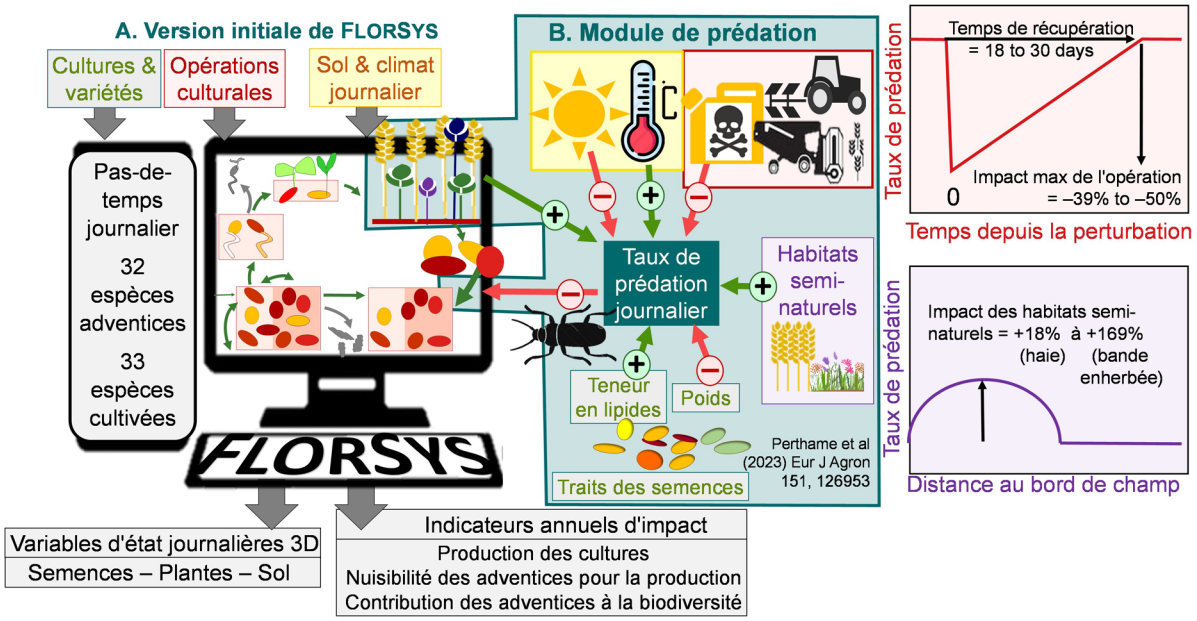


Figure 1 : Représentation schématique du modèle FlorSys (A) qui simule le cycle de vie des adventices et des cultures à partir du système de culture et du pédoclimat, pour en prédire des variables d'état détaillées permettant de faire un diagnostic de la performance des systèmes de culture évalués à l'aide d'indicateurs d'impact des adventices. Le nouveau module de prédation des semences adventices (B) calcule quotidiennement le taux de prédation à partir de l'ombre sous le couvert cultivé, du rayonnement incident, de la température de l'air, des opérations culturales, de la présence éventuelle d'habitats semis-naturels en bord de champ et des traits des semences adventices (⊕ = effet positif, ⊖ = effet négatif).

2.1.2. Effet des techniques culturales

Les processus du cycle de vie dépendent des dates, des options et des outils des techniques de gestion (travail du sol, semis, herbicides, désherbage mécanique, fauche, récolte, etc), en interaction avec les états des cultures, adventices et sol. Par exemple, une opération de désherbage mécanique va arracher et enfouir des plantules, et la mortalité de celles-ci augmente avec l'humidité du sol, la profondeur de travail, la vitesse du tracteur et l'agressivité de l'outil, et elle diminue avec la taille des plantes.

2.1.3. Indicateurs de l'impact des adventices sur la production végétale

FLORSYS simule le rendement des cultures ainsi qu'un ensemble d'indicateurs évaluant l'impact des adventices sur la production végétale et la biodiversité. Ici, nous avons analysé le rendement des cultures, l'infestation des champs par la biomasse d'adventices, la biodiversité végétale liée à la flore adventice et la contribution de cette flore à la fourniture de ressources alimentaires pour les oiseaux des champs et les abeilles domestiques.

2.1.4. Domaine de validité

FLORSYS a été évalué avec des données de terrain indépendantes sur la dynamique des adventices à court et à long terme à l'échelle nationale française, sur une large gamme de systèmes de grande culture. Cette évaluation a montré que les rendements des cultures, les densités adventices journalières et, en particulier, les densités moyennes sur plusieurs années étaient généralement bien prédites. Cependant, les densités de semences adventices à la surface du sol tendent à être surestimées en cas de non-travail du sol continu (Colbach *et al.*, 2006).

2.2. Le nouveau module de prédation des semences adventices

Le nouveau module de prédation des semences (Perthame *et al.*, 2023) calcule le taux de prédation journalier pour chaque espèce adventice à partir des traits des graines, des données météorologiques, des variables d'état du couvert et des opérations culturales (Figure 1.B). Dans FLORSYS, ce taux de prédation est appliqué aux semences adventices disséminées dans la journée à la surface du sol, réduisant ainsi le retour au stock semencier de la pluie de semences. Les équations et les paramètres ont été basés sur des travaux antérieurs de notre équipe et d'autre littérature.

2.2.1. Variation saisonnière du taux de prédation

Le taux de prédation des semences adventices dépend de deux variables environnementales : il augmente avec la température du jour (flèche ⊕ dans la Figure 1.B) mais diminue avec le rayonnement incident par les carabes (flèche ⊖). Un couvert dense (prédit par le cycle de vie de FLORSYS) favorise la prédation des semences en protégeant les carabes du rayonnement et leurs propres prédateurs. De plus, le taux de prédation est plus faible au milieu de l'été lorsque les carabes émergeant au printemps commencent à mourir alors que ceux se reproduisant en automne n'ont pas encore émergé.

2.2.2. Impact des opérations culturales

La plupart des opérations culturales perturbe les carabes et réduit ainsi le taux de prédation (Figure 1.B). C'est notamment le cas du travail du sol et du désherbage mécanique, des insecticides et des opérations de récolte (moissonneuse-batteuse, fauche etc.). Ces opérations réduisent le taux de prédation de 39 % (pour un travail du sol superficiel) à 50 % (labour) juste après l'opération. Il faut ensuite entre 18 et 30 jours pour que le taux de prédation revienne à son taux initial. S'y ajoute un effet indirect via le couvert en place : plus le couvert est détruit par l'opération, plus le taux de prédation va chuter parce que les carabes se sentent exposés. Cet effet durera tant que le couvert n'a pas suffisamment repoussé pour cacher de nouveaux les carabes. Le non-travail du sol permanent a ainsi un effet bénéfique, augmentant le taux de prédation de 60 % après 4 ans sans perturbation.

2.2.3. Les habitats semi-naturels comme refuge des carabes

L'effet bénéfique des bordures de champ (des habitats semi-naturels linéaires longeant les champs) sur la prédation de semences a été demontré par Petit *et al* (2023). Dans FLORSYS, cet effet bénéfique est visible jusqu'à 40 m du bord du champ. L'augmentation maximum va de 18 % au voisinage de haies, à 169 % au voisinage de bandes enherbées, avec des valeurs intermédiaires pour des bandes fleuries (Figure 1.B). Cette augmentation reflète le rôle des bordures en tant que refuge des carabes pour la reproduction et/ou en cas de perturbation dans le champ.

2.2.4. L'effet des caractéristiques des semences

Le taux de prédation dépend aussi des caractéristiques des semences. De manière simplifiée, les carabes préfèrent des semences riches en lipides avec des enveloppes fines aux semences pauvres en lipides à enveloppes épaisses, moins riches en énergie et plus difficiles à prédater. Mais avant tout, les carabes préfèrent des semences abondantes aux semences des espèces attractives, ce qui limite leur déplacement et donc leur dépense énergétique pour s'alimenter.

3. Inclure la prédation de semences adventices améliore la qualité de prédiction de FLORSYS

3.1. Le plan de simulation

Dans un premier temps, FLORSYS a été utilisé pour évaluer ce que l'inclusion de la prédation des semences adventices change en termes de prédiction de la dynamique des adventices et de son impact sur le rendement des cultures (Q1 dans la Figure 2). Pour cela, des simulations ont été réalisées

sur 13 ans, avec et sans le module de prédation des semences, en utilisant les données météorologiques et les opérations de gestion de 10 champs de la station expérimentale INRAE de Dijon-Epoisses. Chaque système de culture a été répété 10 fois pour tenir compte des effets stochastiques dans le modèle (par exemple, la localisation des plantes adventices dans les taches du champ virtuel).

Les variables d'état des adventices et des cultures simulées (densité des plantes, biomasse, banque de semences, rendement) ont été comparées aux mesures effectuées plusieurs fois par an dans les 10 champs, en calculant le biais (moyenne des différences entre valeurs simulées et observées), la capacité à correctement classer les systèmes de culture et espèces (coefficient de corrélation de Spearman entre observations et simulations) et l'efficacité de modélisation, c'est-à-dire la proportion de valeurs observées correctement prédites (1 – la somme des carrés des écarts entre simulations et observations / la somme des écarts entre observations et moyenne des observations). De plus, la capacité à prédire la dynamique des espèces adventices au fil du temps a été évaluée via la proportion des observations incluse dans l'intervalle de confiance simulée ou bien située au-dessus ou en-dessous de cet intervalle, correspondant à la proportion d'observations correctement prédite, sur- ou sous-estimée.

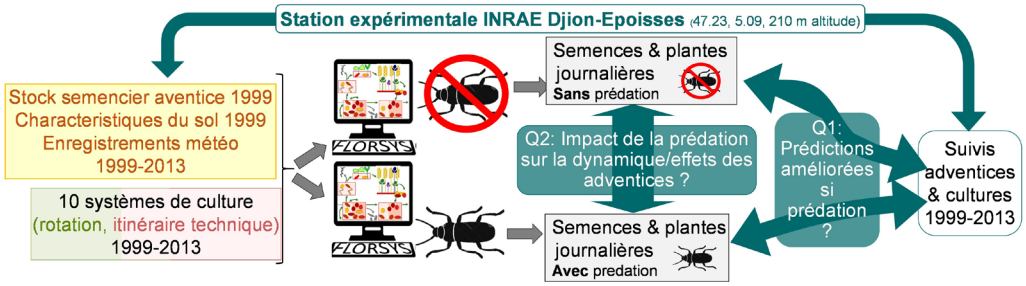


Figure 2 : Plan de simulation pour tester la nouvelle version de FlorSys incluant le module de prédation des semences adventices (Q1), puis pour l'utiliser pour évaluer l'impact de la prédation des semences adventices sur la dynamique de la flore adventice et les effets sur production des cultures et la biodiversité (Q2)

3.2. La prédation réduit la surestimation des variables adventices

La comparaison des variables décrivant les adventices et cultures simulées par FLORSYS avec les observations de terrain montre que l'inclusion de la prédation des semences d'adventices dans les simulations améliore la qualité des prévisions du modèle. Le biais est considérablement réduit, c'est-à-dire les densités, biomasses et stocks semenciers adventices sont peu ou pas surestimés lorsque la prédation des semences est prise en compte (Tableau 1.A). Les systèmes de culture et espèces adventices sont correctement classés en termes de variables adventices, avec des coefficients de corrélation de Spearman allant de 0.56 (pour le stock semencier) à 0.69 (pour la biomasse adventice). En contrepartie, le rendement est maintenant un peu surestimé mais les valeurs de rendement sont bien prédites (efficacité de modélisation de 0.84). La dynamique des espèces adventices était déjà bien prédite avec la version initiale, et la prise en compte de la prédation des semences n'améliore pas grand-chose, avec 80 % à 85 % des observations de biomasses et de densités de plantes adventices incluses dans l'intervalle de confiance simulé (Tableau 1.B).

Cette évaluation montre que la prise en compte de la prédation des semences adventices est nécessaire pour bien prédire la flore adventice et son impact sur les cultures. Ce processus de prédation joue donc un rôle non-négligeable pour la dynamique et les effets des adventices.

Tableau 1 : Évaluation de la capacité de prédiction de FlorSys évaluée en comparant des simulations à des observations d'un essai de 10 parcelles suivis sur 13 ans en Bourgogne (basé sur Perthame *et al*., 2023).

A. Capacité à classer les systèmes de culture et espèces (adventices ou cultivées)

Variable	Biais de prédiction[$]		Corrélation simulations vs observations (avec prédation)	
	Sans prédation	Avec prédation		
Moyenne sur la rotation				
Densité adventice (plantes m^{-2})	17 %	12 %	0.60	Corrélations de Spearman
Biomasse adventice (g m^{-2})	30 %	16 %	0.69	
À une date donnée				
Stock semencier adventice (semences m^{-2})	22 %	17 %	0.56	
Biomasse de la culture (g m^{-2})	-1 %	-1 %	0.68	
Rendement de la culture (t ha^{-1})	7 %	12 %	0.84[§]	ME

[$] Relativement à la gamme de variation ½ [max+min valeurs observées]

[§] observations pondérées par l'inverse des écart-types pour tenir compte de la variabilité intra-parcelle entre points de mesure

ME = efficacité de modélisation

Cellules colorées du rouge (0) au vert (1) en passant vers le jaune (0.5) pour les corrélations, du vert (0) au rouge (30 %) en passant par le jaune (15 %) pour le biais

B. Dynamique journalière des espèces

Variable adventice	Proportion d'observations					
	Correctement prédites		Surestimées		Sous-estimées	
	Sans prédation	Avec prédation	Sans prédation	Avec prédation	Sans prédation	Avec prédation
Densité adventice (plantes m^{-2})	0.80	0.81	0.13	0.12	0.06	0.07
Biomasse adventice (g m^{-2})	0.85	0.85	0.13	0.12	0.03	0.03

Cellules colorées du rouge (0) au vert (1) en passant vers le jaune (0.5) pour les observations correctement prédites, et vice-versa pour les autres.

4. Les facteurs influençant la prédation des graines d'adventices

4.1. Analyse de sensibilité aux composantes du module de prédation

Une analyse de sensibilité aux composantes du module de prédation a été réalisée en répétant les simulations précédentes, en désactivant successivement une des composantes individuelles du module. Cette analyse a montré que le rayonnement incident quotidien, l'interception de la lumière par le couvert végétal, la récolte, la variation saisonnière liée à la reproduction des carabes et la température quotidienne ont le plus d'influence sur les taux de prédation des semences.

4.2. Les espèces adventices les plus prédatées

Dans les simulations incluant le module de prédation, la prédation annuelle des semences adventices varie de zéro pour huit espèces adventices à 0,53 semences/semences par an pour *Alopecurus myosuroides* Huds. (ALOMY) (Figure 3). Les taux de prédation des espèces simulées n'étaient que partiellement corrélés à la préférence des carabes pour les différentes espèces adventices dans le modèle (coefficient de corrélation de Pearson = 0,51). En effet, certaines espèces adventices très appréciées des carabes (par exemple *Abuthilon theophrasti* Medik., ABUTH, la quatrième espèce la plus appréciée dans le modèle) présente un taux de prédation quasi nul en simulation, simplement parce qu'elles sont extrêmement rares dans les simulations. A l'inverse, une espèce peu appréciée comme *Galium aparine* L. (GALAP, troisième espèce la moins appréciée) figurait parmi les six espèces les plus prédatées de la simulation.

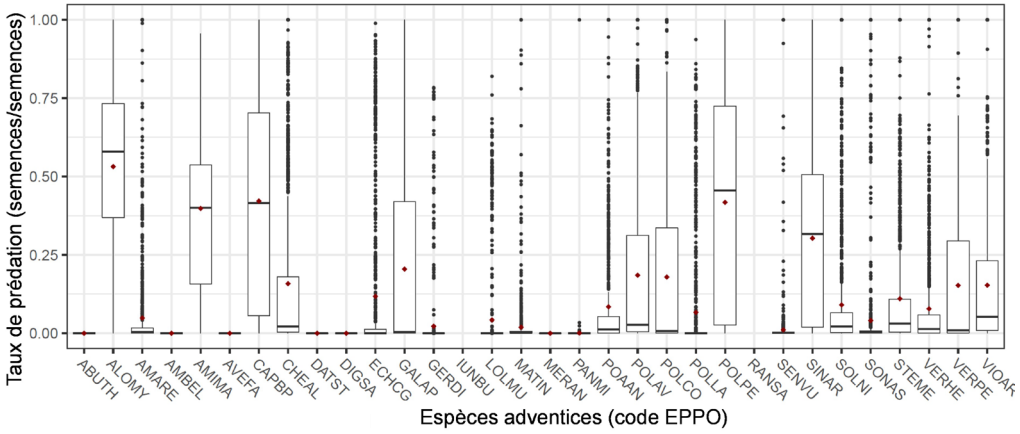


Figure 3 : Taux annuels de prédation des semences par espèce adventice, en moyenne sur 10 systèmes de culture, 13 années et 10 répétitions stochastiques, simulés avec FLORSYS. Les espèces d'adventices sont listées avec leur code OEPP (https://gd.eppo.int/) (tiré de Perthame *et al.*, 2023)

4.3. La prédation des semences peut contribuer à réguler les adventices

La deuxième étape des analyses consistait à comparer les rendements et indicateurs des impacts des adventices simulées FLORSYS incluant ou non le module de prédation des semences adventices (Q2 dans la Figure 2). En moyenne, sur les 10 systèmes de culture, 13 années et 10 répétitions, la prédation des semences n'a que peu d'effet sur la richesse de la flore adventice (de 59 % des espèces possibles à 57), même si cette diminution est statistiquement significative (p=0.05). Il a fallu plusieurs années pour que l'effet de la prédation devienne perceptible, même dans le système de culture le plus touché, et la différence entre les années et les cultures était plus importante (Figure 4.A). La prédation n'a pas eu d'effet significatif sur l'équitabilité de la flore adventice, même si pour certaines cultures et années, l'équitabilité peut être meilleure en présence de prédation (Figure 4.B). L'offre trophique des adventices pour les oiseaux et, surtout, les abeilles tend à être plus faible en présence de prédation des semences (–6 % et –23 % en moyenne, respectivement). Une fois de plus, l'impact de la prédation est très faible par rapport aux variations dues aux cultures et aux années (Figure 4.C et D).

L'effet de la prédation sur l'infestation des champs et le rendement des cultures est beaucoup plus important, avec une diminution d'environ 50 % de l'infestation des champs et une augmentation de 7 % du rendement en moyenne. Ces variations sont encore plus importantes dans les systèmes de culture les plus sensibles à la prédation (Figure 4.E et F), bien que l'effet des cultures et des années soit prépondérant.

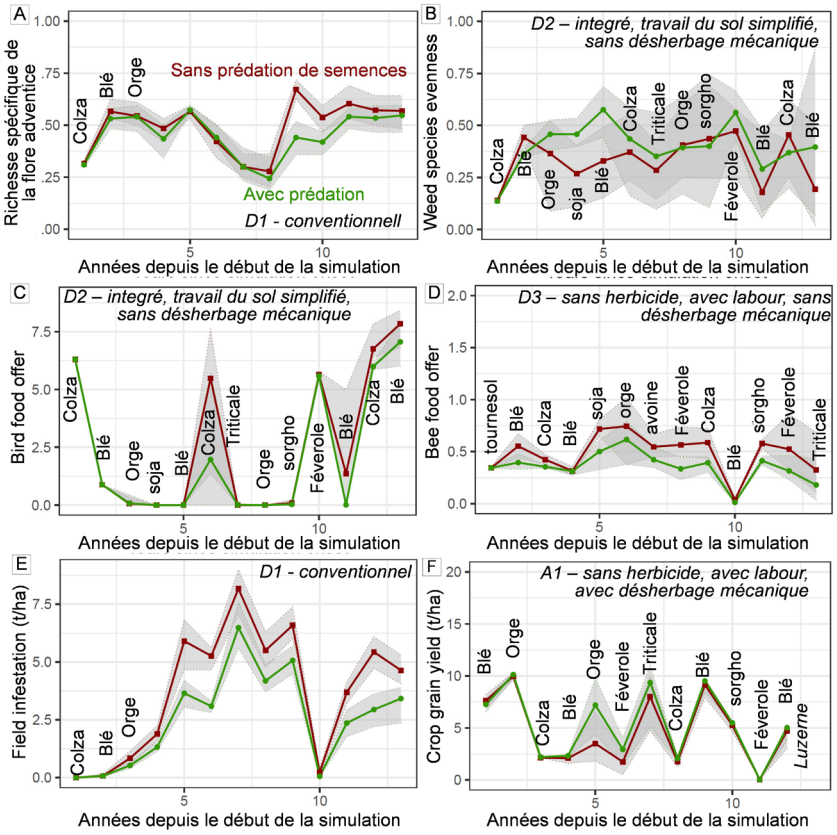


Figure 4 : Effet de la prédation des semences adventices sur le rendement des cultures et les indicateurs d'impact des adventices simulés avec FLORSYS. Pour chaque indicateur, le système de culture (parmi les 10 simulés) présentant la plus grande différence entre les simulations avec (points verts) et sans prédation (carrés rouges) a été représenté. Les intervalles de confiance à 90 % résultant des répétitions stochastiques sont en gris. Les noms des cultures indiquent la succession des cultures (les cultures de printemps et d'été sont en minuscules) (basé sur Perthame *et al.*, 2023).

4.4. La contribution des bandes enherbées

La mise en place de bandes enherbées autour des champs a permis d'augmenter les taux de prédation d'environ 20 % en simulation (Tableau 2). Cette augmentation s'est traduite par une légère amélioration de l'équitabilité de la flore adventice (+10 % en moyenne tous les systèmes de culture, années et répétitions) et du rendement des cultures (5 %).

Tableau 2 : Effet de la présence de bandes enherbées autour des champs sur le taux de prédation des semences adventices par les carabes, le rendement des cultures et l'impact des adventices sur la biodiversité et la production des cultures simulés avec FlorSys incluant le module de prédation des semences. Résultats de comparaisons de moyennes après analyse de variance (basé sur Perthame *et al.*, 2023).

Présence de bande enherbée	Taux de prédation annuel (%)		Biodiversité végétale [0,1]				Offre trophique pour				Salissement du champ (t/ha)		Rendement (kJ/ha)	
			Richesse spécifique §		Équitabilité de la flore		Oiseaux		Abeilles					
Non	50 %	b	0.57	a	0.28	b	2.09	a	0.14	a	0.86	a	127	a
Oui	61 %	a	0.57	a	0.31	a	1.99	a	0.13	a	0.59	a	134	b

Cellules colorées du rouge (0) au vert (valeur max possible) en passant par le jaune pour les taux de prédation et les indicateurs de biodiversité.

5. Conclusion et perspectives

Notre travail basé sur un modèle de simulation est l'une des rares études à démontrer l'effet réel de la prédation des semences adventices sur la dynamique des adventices et la production des cultures, avec l'exemple des carabes granivores. FLORSYS est également l'un des très rares exemples de modèles de simulation d'adventices qui ont été évalués avec des observations indépendantes de terrain. Les taux de prédation simulés sont cohérents avec les observations rapportées dans la littérature. Les simulations ont montré que la prédation des semences adventices peut effectivement contribuer à la gestion des adventices, en réduisant l'infestation des champs, et en améliorant les rendements des cultures. Pour déterminer quels systèmes de culture et quelles bordures de champ favorisent suffisamment la prédation des semences adventices pour contribuer de manière notable à la régulation biologique des adventices, il faut encore explorer une plus grande gamme de systèmes de culture.

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

Laurène PERTHAME : https://orcid.org/0000-0002-6421-8055

Sandrine PETIT : https://orcid.org/0000-0001-8781-8873

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X

Contributions des auteurs

LP : modélisation, simulation, rédaction. SP : expérimentation, encadrement, rédaction. NC : encadrement, modélisation, simulation, analyse de données, rédaction

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

Ce projet a été soutenu par l'INRAE, les projets Be-Creative (ANR-20-PCPA-0001), et COPRAA financé l'OFB dans le cadre de l'appel Ecophyto « Approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques : Combiner les produits préventifs et curatifs dans les filières, de l'agriculteur au consommateur » lancé par les ministères français en charge de l'écologie, de l'agriculture, de la santé et de la recherche.

Références bibliographiques

Chantre G. R., González-Andújar J. L., 2020. Decision Support Systems for Weed Management. Springer International Publishing, Cham

Colbach N., Busset H., Yamada O., Dürr C., Caneill J., 2006. ALOMYSYS: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate. II. Evaluation. European Journal of Agronomy 24, 113-128.

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. https://agronomie.asso.fr/aes-9-2-14

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. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006

Daouti E., Jonsson M., Vico G., Menegat A., 2022. Seed predation is key to preventing population growth of the weed Alopecurus myosuroides. Journal of Applied Ecology 59, 471-482. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14064

Holland J. M., Luff M. L., 2000. The effects of agricultural practices on Carabidae in temperate agroecosystems. Integrated Pest Management Reviews 5, 109--129.

Marshall E. J. P., Moonen A. C., 2002. Field margins in northern Europe: their functions and interactions with agriculture. Agriculture, Ecosystmens and Environement 89, 5-21.

Perthame L., Petit S., Colbach N., 2023. Modelling weed seed predation and its effects on crop production under contrasted farming systems. European Journal of Agronomy 151, 126953. https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126953

Petit S., Boursault A., Bohan D. A., 2014. Weed seed choice by carabid beetles (Coleoptera: Carabidae): Linking field measurements with laboratory diet assessments. European Journal Of Entomology 111, 615-620.

Petit S., Cordeau S., Chauvel B., Bohan D., Guillemin J.-P., Steinberg C., 2018. Biodiversity-based options for arable weed management. A review. Agronomy for Sustainable Development 38, 48. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0525-3

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. 10.3389/fagro.2023.1228395

Westerman P. R., Liebman M., Heggenstaller A. H., Forcella F., 2006. Integrating measurements of seed availability and removal to estimate weed seed losses due to predation. Weed Science 54, 566--574.

Pour citer cet article : Laurène Perthame, Sandrine Petit, Nathalie Colbach. La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.38-47. 10.17180/ciag-2025-vol101-art04

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

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

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

Rôle des couverts d'interculture et de leurs modes de destruction dans la régulation des adventices

Stéphane CORDEAU[1], Alicia ROUGE[1], Guillaume ADEUX[1], Hugues BUSSET[1], Céline COLOMBET[2], Rodolphe HUGARD[2], Emilien LAURENT[1], Juliette MARTIN[2], Annick MATEJICECK[1], Brice MOSA[2], Eric VIEREN[1], Delphine MOREAU[1], Jean-Philippe GUILLEMIN[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro Dijon, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

[2] INRAE, U2E, Unité Expérimentale du domaine d'Epoisses, 21110 Bretenière, France

Correspondance : stephane.cordeau@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art05

Résumé

L'étude visait à (i) identifier les pratiques de gestion des couverts pour réduire les adventices dans les cultures suivantes et (ii) quantifier les effets intentionnels ou non de méthodes de destruction des couverts/adventices/repousses. Les couverts d'interculture ont significativement réduit les adventices en interculture de 68 % à 94 % selon leur composition, mais ces effets sont moins visibles dans les cultures. La fertilisation des couverts augmente la biomasse des couverts sans avantage compétitif sur les adventices. L'irrigation des couverts au semis a été inefficace ou contreproductive, augmentant la biomasse adventice en interculture sans effet dans les cultures suivantes. Le travail du sol, le désherbage électrique et le bioherbicide se sont avérées efficaces pour détruire le couvert en place, mais le travail du sol stimule de nouvelles germinations. Le désherbage électrique, ne permet pas, comme les rouleaux, de faire un effet mulch avec le couvert et favorise aussi des levées d'adventices. Les rouleaux ont des efficacités de destruction faibles quand le couvert est peu développé ou trop ligneux. Les résultats sont donc très inféodés au couvert semé et aux conditions météorologiques.

Mots-clés : effet suppressif, compétition, mélange, glyphosate, travail du sol, rouleau

Abstract: Effect of cover crops and their management on weeds

The study aimed to (i) identify cover crop management practices to reduce weeds in subsequent crops and (ii) quantify the intentional or unintentional effects of vegetation destruction methods. Cover crops significantly reduced weeds in summer fallow period by 68% to 94% depending on their composition, but these effects were less visible in subsequent crops. Fertilising cover crops at sowing increased their biomass without any competitive advantage over weeds. Irrigating cover crops at sowing was ineffective or counterproductive, increasing weed biomass during the summer fallow period with no effect on subsequent crops. Tillage, electric weeding and bioherbicide have proved effective in terminating cover crops, but tillage stimulates new weed germination. Electric weeding terminated cover crop without living a dead mulch, leaving the ground open for new weeds to emerge. Rollers have a low destruction efficiency when the vegetation is underdeveloped or too woody. Results are therefore highly dependent the phenological stage at termination and the weather conditions.

Keywords: suppressive effect, competition, mixture, glyphosate, tillage, tillage

1. Introduction

1.1. Effet des couverts d'interculture sur la flore adventice

Dans la recherche de leviers alternatifs aux herbicides pour gérer les adventices en grandes cultures, les couverts d'interculture, plantes cultivées entre la récolte d'une culture de rente et le semis de la suivante, sont des pistes à explorer. De nombreuses études et revues 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 des couverts d'interculture sur les adventices sont plus variables et sont généralement observés que dans une culture de printemps ou d'été suivante en fonction de la biomasse produite par les couverts (Osipitan *et al*., 2018). Les effets des couverts d'interculture sur les adventices dépendent notamment du choix des espèces composant les couverts, des caractéristiques pédoclimatiques des parcelles ou encore du mode de destruction des couverts (Nichols *et al*., 2020). Une destruction des couverts par travail du sol et des désherbages en culture masquent potentiellement les effets des couverts sur les adventices (Adeux *et al*., 2021). D'autres modes de destruction tels que le roulage ou le gel ont été testés et montrent parfois une efficacité satisfaisante pour réduire les adventices en culture (Carrera *et al*., 2004; Wayman *et al*., 2014; Büchi *et al*., 2020).

Les céréales et crucifères, très compétitives pour les ressources, sont capables de produire de fortes quantités de biomasse et de réguler les adventices efficacement. En revanche, elles sont associées à des ratio Cabone/Azote (C/N) élevés qui peuvent réduire les rendements des cultures suivantes (Finney *et al*., 2016) via une immobilisation de l'azote minéral du sol (Wells *et al*., 2013). Introduire des légumineuses dans un mélange de couvert perm*et al*ors de réduire le ratio C/N du mélange et augmenter la disponibilité en azote pour la culture suivante, permettant parfois à la culture d'améliorer sa productivité (Snapp *et al*., 2005; Marcillo et Miguez, 2017; Hunter *et al*., 2019; Adeux *et al*., 2021). Par conséquent, associer des espèces légumineuses et non légumineuses dans un couvert permettrait de réprimer les adventices sans impacter le rendement de la culture suivante (Couëdel *et al*., 2019).

Cependant, les combinaisons de pratiques permettant d'atteindre cet objectif restent à déterminer. Enfin, de nombreuses études se sont concentrées sur les effets des couverts sur les adventices de la culture de printemps/été suivante (Campiglia *et al*., 2010; Almoussawi *et al*., 2020; Pittman *et al*., 2020). Or les effets des couverts sur les adventices à l'échelle du système de culture ne pourraient être révélés que dans une culture d'hiver suivante en raison des périodes de germination préférentielles de la plupart des adventices (Grundy, 2003).

1.2. Effets intentionnels et non intentionnels de méthodes de destruction des couverts

Les alternatives au glyphosate en semis-direct pour la destruction des couverts/adventices/repousses de cultures ne sont pas nombreuses comme l'indique un rapport INRAE (Reboud *et al*., 2017) et sont toutes sujettes à critique quant à leur impact sur le sol, la diversité biologique des sols (bactéries, champignons, vers de terre, autre mésofaune), leur niveau d'efficacité de destruction de la végétation en place, leur rentabilité économique… En effet, le semis-direct sous couvert permanent (SD), forme la plus complète de l'agriculture de conservation des sols (ACS) (Friedrich *et al*., 2012), est une combinaison de pratiques agricoles qui conduit les agriculteurs à ne plus perturber le sol (sauf la ligne de semis), à diversifier les rotations et à implanter des couverts pour couvrir le sol au maximum. Envisager le semis-direct sans glyphosate et plus largement sans pesticide de synthèse soulève donc un challenge important (Mirsky *et al*., 2013; Cordeau, 2022), aujourd'hui identifié comme impasse technique (Reboud *et al*., 2017). Sauf à avoir recours à des animaux pour le pâturage (Schomberg *et al*., 2014), les alternatives envisagées sont pour leur plupart un retour à une perturbation du sol très superficielle comme un scalpage/mulchage/fraisage (Baudron *et al*., 2019), sinon à un roulage pour détruire la végétation (e.g. rouleau de type faca, (Ashford et Reeves, 2003)) ou à un broyage de la

végétation (Creamer *et al*., 1995), parfois combiné avec une destruction par la flamme (Bavougian *et al*., 2019; Frasconi *et al*., 2019) dont l'évaluation sur un plan multicritère n'a jamais été vraiment réalisée. D'autres méthodes, plus récentes comme le désherbage électrique ou le désherbage avec des bioherbicides (Cordeau *et al*., 2016) tel que l'acide acétique ou l'acide pélargonique, ont des effets intentionnels (efficacité de destruction) et non intentionnels (sur le sol et sa biodiversité) encore méconnus.

1.3. Objectifs de l'étude

L'objectif de cet article est double :

- identifier les pratiques de gestion des couverts (composition, niveau de ressources et mode de destruction) permettant de réduire les adventices dans les cultures suivantes. Pour ne quantifier que les effets liés aux couverts d'interculture sur les adventices, les cultures ont été conduites en semis direct, sans désherbage, ni irrigation, ni fertilisation :
- tester différentes méthodes de destruction de la végétation (couvert, adventices, repousses de cultures) sans recours aux herbicides de synthèse afin (i) d'estimer leur efficacité (effet intentionnel) et (ii) de quantifier les effets non intentionnels (germination de nouvelles adventices, effet négatif sur la diversité microbienne, les vers de terre, la mésofaune du sol, etc..). Dans cet article il sera question d'efficacité de destruction, de sa variabilité spatio-temporelle, et des effets sur les communautés adventices après destruction.

2. Matériels et méthodes

2.1. Effets des couverts sur la flore adventice

Deux expérimentations, d'une durée de deux ans chacune, ont été mises en place sur deux parcelles et deux années différentes (une en 2016-2018 et l'autre en 2017-2019), sur le site expérimental de INRAE à Bretenière, à 15 km au sud-est de Dijon, en France.

Après un blé d'hiver, une succession de couvert d'interculture / orge de printemps / période d'interculture / lin d'hiver a été répliquée au cours de l'expérimentation 1 (2016-2018) et 2 (2017-2019). Quatre compositions de couvert (2leg- : 2 espèces sans légumineuses, 2leg+ : 2 espèces incluant une légumineuse, 8leg- : 8 espèces sans légumineuses et 8leg+ : 8 espèces incluant des légumineuses) incluant une large gamme d'espèces couramment utilisées par les agriculteurs français (avoine rude, seigle d'hiver, sorgho, millet, vesce commune, trèfle, féverole, crotalaire, moutarde brune, moutarde des champs, phacélie, niger, sarrasin, lin), et un témoin sol nu ont été testés. Deux niveaux d'irrigation (W- : 0 mm ou W+ : 40 mm) et de fertilisation azotée (N- : 0 kg N ha^{-1} ou N+ : 30 kg N ha^{-1} par l'application de 90 kg ha^{-1} de nitrate d'ammonium 33,5 %) ont été appliqués une seule fois, au semis des couverts, pour représenter des niveaux contrastés de disponibilité en ressources du sol au semis des couverts. Trois modes de destruction des couverts ont été mis en œuvre [destruction par gel, roulage ou herbicides (glyphosate 3 L ha^{-1} + acide 2,4 dichlorophénoxyacétique 0,3 L ha^{-1})]. La destruction des couverts a été programmée pour maximiser leur efficacité : les couverts ont été roulés tôt le matin le premier jour de gel de la saison ou pulvérisées avec des herbicides deux semaines avant le semis de l'orge de printemps suivante. Un total de 60 combinaisons de pratiques, répété deux fois a ainsi été mis en place. Quatre espèces d'adventices communément trouvées dans les parcelles de la région et capables de germer en été (au moment du semis des couverts) : Panic pied de coq - *Echinochloa crus-galli,* véronique de Perse - *Veronica persica,* géranium disséqué - *Geranium dissectum* et chénopode blanc - *Chenopodium album*, ont été semées à raison de 60 graines m^{-2} chacune dans toutes les parcelles au moment du semis des couverts afin d'homogénéiser la pression des adventices dans chaque expérimentation.

Une orge de printemps a été semée après destruction des couverts le 13 mars 2017 et le 21 mars 2018 et récoltée le 15 juillet 2017 et le 19 juillet 2018. Avant le semis du lin d'hiver, les adventices ont été éliminées à l'aide d'un herbicide (glyphosate 3 L ha^{-1}, le 26 juillet 2017 et le 29 septembre 2017) dans l'expérimentation 1 et à l'aide d'une bâche d'ensilage imperméable dans l'expérimentation 2. Le lin d'hiver a été semé le 22 septembre 2017 et le septembre 2018 et récolté le 13 juillet 2018 et le 18 août 2019. Les deux cultures suivantes ont été semées directement à l'aide d'un semoir direct JD 750A, et conduites sans fertilisation, irrigation ni désherbage en cours de culture jusqu'à la récolte.

La biomasse aérienne des adventices (par espèce) a été échantillonnée à la floraison des deux cultures dans chaque expérimentation. Chaque combinaison de pratiques (n=59) a été comparée à une référence (sol nu, non fertilisé, non irrigué et gelé), de façon à observer l'intérêt de mettre en place un couvert, d'augmenter le niveau de ressources ou de le détruire d'une certaine façon.

2.2. Effet intentionnels et non intentionnels des méthodes de destruction

L'expérimentation a été menée sur la ferme expérimentale de INRAE à Bretenière (47° 14' 11.2" N, 5° 05' 56.1" E), à 15 km au sud-est de Dijon, en France sur deux parcelles en 2019-2020 (P25) et 2020-2021 (P37). Après la récolte du précédent cultural en juillet, les couverts sont installés au semoir de semis-direct JD 750A fin juillet. Les micro-parcelles où les mesures seront faites sont ensuite délimitées par les modalités de destruction.

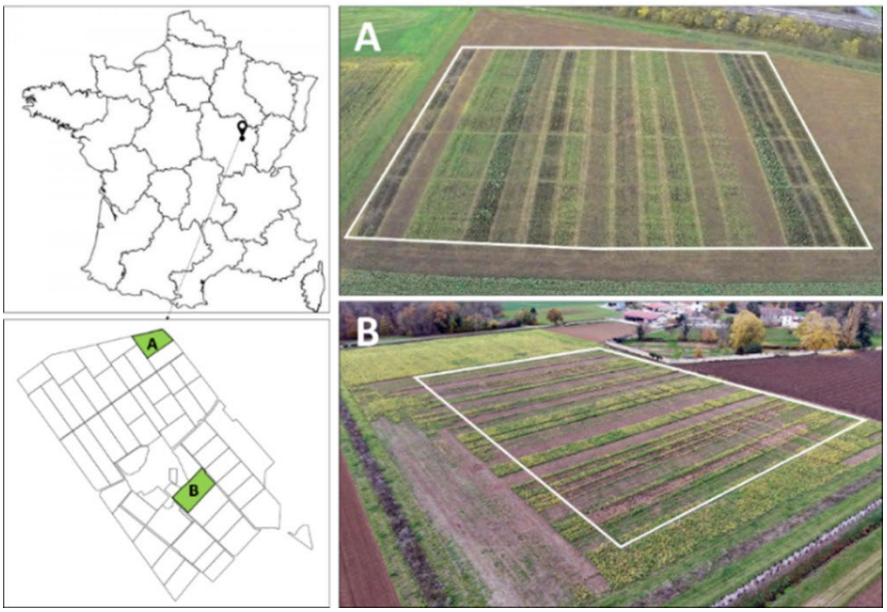


Figure 1 : Localisation du site d'essai (plateforme CA-SYS, domaine expérimental INRAE U2E) et des deux parcelles mobilisées pour les essais menés en 2019-2020 (A, P25) et 2020-2021 (B, P37). © Réalisation : Stéphane Cordeau, Photo : Rodolphe Hugard et Guillaume Poussou - INRAE – 2021

Dans des couverts plus ou moins développés suite à une fertilisation avec 30 kg N/ha (ammonitrate 33,5 %) peu de temps après le semis du couvert, des modalités de destruction sont testées mi-octobre de chaque année selon 9 modes de destruction (Figure 2). Une modalité témoin non détruite est maintenue où seul le gel pourra avoir une action sur le couvert.



Figure 2 : Présentation photographique des différents outils testés sur les essais. A. Témoin gel, B. Bioherbicide, C. Rouleau hacheur Sacho Geacut 600, D. Rouleau Güttler, E. Rouleau faca auto-construit, F. Ecorouleau Bonnel, G. Carrier-Väderstad avec cross cutter, H.Terrano Horsch + pattes d'oie, I. Glyph-O-Mulch Ecomulch, J. Dynadrive Bomford, K. Fraise Bio GL 3000 FALC, L. Kvick-Finn 2020, M-N-O. Zasso Electroherb. © Stéphane Cordeau - INRAE – 2021

La biomasse aérienne totale du couvert et des adventices (espèces non semées) a été prélevée la veille de la destruction des couverts à l'aide d'un quadrat de 1 m² par micro-parcelle. Cette biomasse a été séchée à l'étuve durant 48 h à 80 °C puis pesée. L'efficacité de destruction de la végétation en place (adventice, couvert, repousses de culture) a été caractérisée à T26, date qui permet d'évaluer de manière homogène les modalités, *i.e.* après que la végétation détruite soit desséchée et sans que de nouvelles germinations d'adventices n'aient eu le temps de reprendre étant donné les températures. L'efficacité de destruction est caractérisée par un pourcentage de couverture végétale verte évaluée avec l'application mobile CANOPEO ®. Afin de vérifier l'efficacité des modalités de destruction selon les espèces de couverts, adventices et repousses de cultures, des relevés de flore ont été réalisés à T0 avant destruction, T1 (efficacité court-terme de destruction 7 jours après) et T2 (efficacité long-terme de destruction 64 jours après, tenant compte des nouvelles germinations). Les relevés sont faits sur une zone de 16 m²/micro-parcelle localisée aléatoirement dans chaque micro-parcelle et sur laquelle toutes

les espèces sont nommées à l'espèce (si possible, sinon au genre), et dont la densité (plantes/m²) est estimée visuellement selon des classes (échelle Barralis) et le stade phénologique noté.

3. Résultats

3.1. Effet des couverts sur la flore adventice

La biomasse adventice dans l'orge de printemps a été affectée par l'interaction entre la composition des couverts, la fertilisation, l'irrigation et le mode de destruction des couverts dans chaque expérimentation. Dans l'expérimentation 1, la biomasse adventice a été similaire (dans 34 combinaisons) ou inférieure (dans 25 combinaisons) à celle observée dans la situation de référence (Figure 3). Les combinaisons où la biomasse adventice était plus faible que la référence, correspondent aux situations où les couverts ont été détruits par herbicides, à deux situations où les couverts ont été détruits par gel et trois situations où les couverts ont été détruits par roulage. Dans l'expérimentation 2, la biomasse adventice a été supérieure (dans 20 combinaisons), similaire (dans 30 combinaisons) ou inférieure (dans 9 combinaisons) à celle observée dans la situation de référence (Figure 3). Les biomasses adventices plus faibles que la référence ont été principalement observées dans les combinaisons de couverts et sol nu fertilisés et détruits par herbicides. Les biomasses adventices plus élevées que la référence ont été principalement observées dans les combinaisons de couverts non fertilisées et détruits par le gel ou roulage.

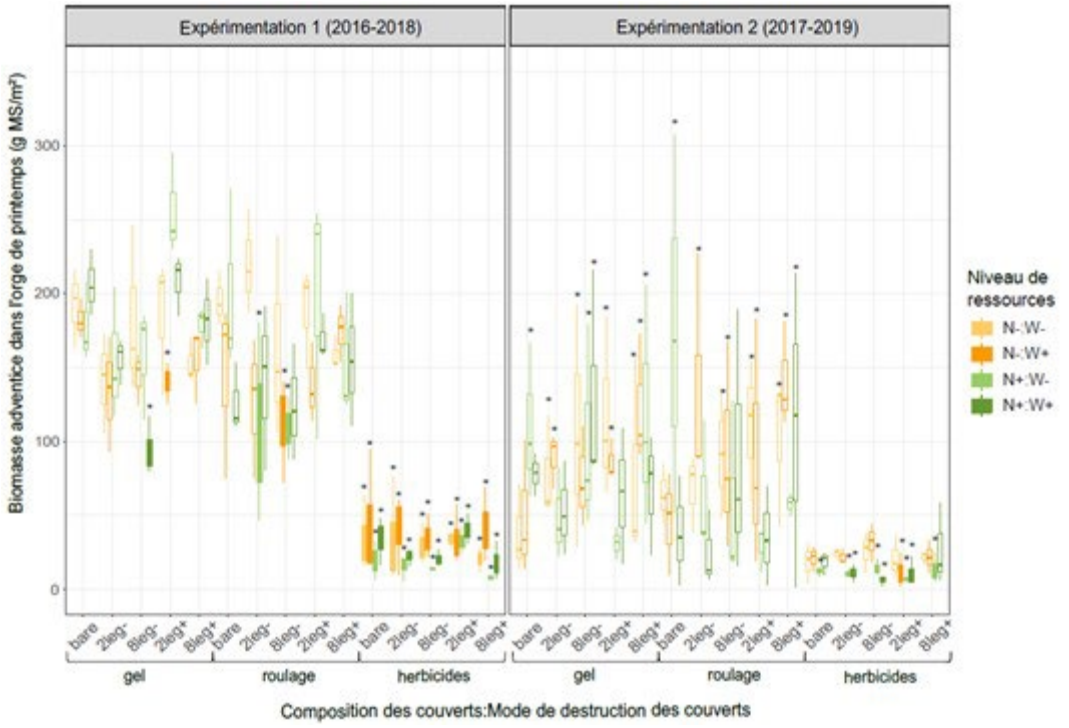


Figure 3 : Effet de la composition des couverts, du niveau de ressources en azote et en eau au semis des couverts et des modes de destruction des couverts sur la biomasse des adventices dans l'orge de printemps (g de matière sèche (MS) m^{-2}). N- : pas de fertilisation azotée, N+ : 30 kg N ha^{-1} au semis des couverts ; W- : pas d'irrigation, W+ : 40 mm au semis des couverts ; bare : sol nu ; 2leg- : 2 espèces sans légumineuses ; 8leg- : 8 espèces sans légumineuses ; 2leg+ : 2 espèces incluant une légumineuse ; 8leg+ : 8 espèces incluant des légumineuses. Chaque combinaison a été statistiquement comparée à la référence (sol nu, N-:W-, destruction par gel). Les combinaisons marquées d'un astérisque diffèrent de la référence (valeur $p < 0,05$). Les combinaisons remplies indiquent des valeurs inférieures à celles de la référence.

Dans l'ensemble, même si les expérimentations ont été conduites sans travail du sol, sans désherbage chimique et engrais en culture, des facteurs connus pour masquer les effets des couverts d'interculture dans la culture suivante (Adeux *et al.*, 2021), notre étude a montré que l'implantation de couverts d'interculture (par rapport au sol nu), même avec une gestion optimisée (irrigation, fertilisation et mode de destruction), avait un faible effet sur les adventices des cultures suivantes (Figure 4).

La biomasse des adventices dans les cultures suivantes a été principalement déterminée par le mode de destruction des couverts ; les herbicides étant généralement le seul moyen de réduire la biomasse d'adventices dans la culture par rapport à la référence. Dans l'orge de printemps (la première culture suivante), la destruction des couverts par herbicides a réduit la biomasse adventice dans toutes les combinaisons de couverts et de disponibilité en ressources du sol dans l'expérimentation 1, mais pas dans l'expérimentation 2. Dans l'expérimentation 2, la destruction des couverts par herbicides a réduit la biomasse adventice dans l'orge de printemps dans seulement la moitié des combinaisons.

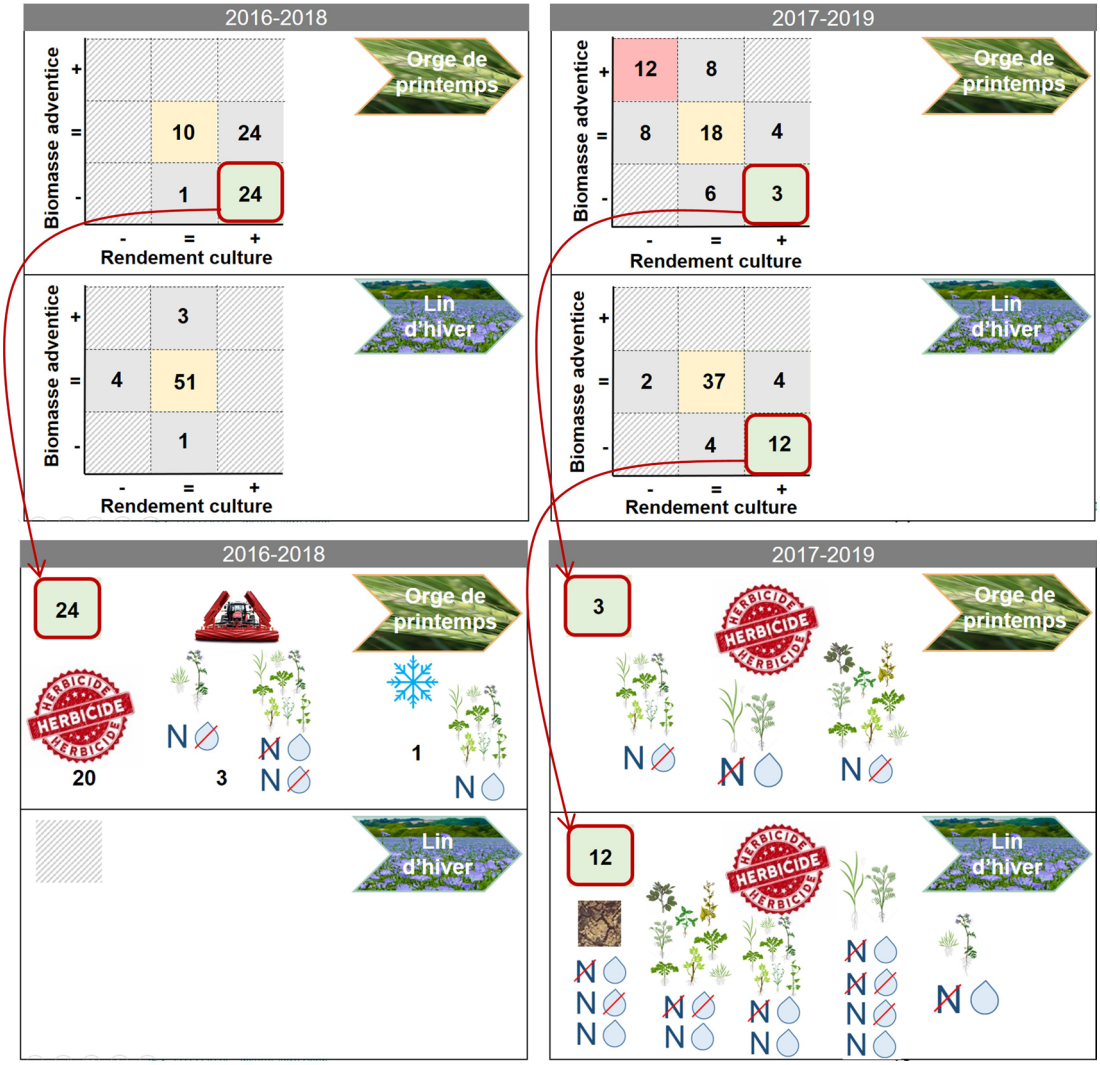


Figure 4 : Combinaisons de pratiques dans la gestion des couverts et de leur destruction qui permettent de réduire la biomasse adventice et d'améliorer le rendement des cultures suivantes d'orge de printemps et lin d'hiver).

3.2. Effet intentionnels et non intentionnels des méthodes de destruction

La biomasse des couverts varie de 1,26 à 12,4 t/ha toutes années et quadrats prélevés confondus. Elle diffère selon les années (plus faible en 2020 qu'en 2019). Les couverts ont produit 6,6 ± 2,2 t/ha de MS

en 2019 contre 3,0 ± 1,0 t/ha de MS en 2020. La biomasse du couvert n'est pas spatialement hétérogène.

L'efficacité de destruction des outils varie entre les années et les outils (Tableau 1). En 2019, les quantités de biomasse produites plus importantes ont facilité l'efficacité des outils, notamment les rouleaux qui écrasent bien la végétation développée et peu ligneuse. En revanche, en 2020, les faibles biomasses très ligneuses produites étaient difficiles à détruire pour la majeure partie des outils. De plus, le couvert plus estival en 2020 s'est rapidement lignifié et est entré en sénescence précocement par temps sec et froid, amenant le pourcentage de surface verte dans les témoins à 25 % à 30 %. C'est ce qui explique les faibles efficacités de certains rouleaux comme le rouleau Bonnel, testé uniquement en 2020, efficacité assez éloignée des efficacités observées dans d'autres réseaux d'essais sur cet outil. Cependant, dans ces conditions difficiles, un réglage plus agressif du rouleau poussé Bonnel a permis d'améliorer l'efficacité de 25 % à 30 %**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.

Tableau 1 : Efficacité de destruction de la végétation (couvert, adventice, repousses) évaluée 26j après intervention des outils sur 2 années d'essai (2019 et 2020) par la variation du pourcentage de surface végétale verte relativement au témoin non détruit de l'année et de la modalité de fertilisation en azote du couvert au semis. Efficacité moyenne et coefficient de variation (CV) à travers les répétitions spatiales dans un essai et répétitions temporelles (essai 2019 et 2020). Certaines modalités indiquées par * n'ont été testées qu'une année.

Type de destruction	Destruction	Moyenne	Ecart Type	CV
Bioherbicide	Bioherbicide	62.1	24.0	38.6
Electrocution	Zasso	82.7	6.6	8.1
Rouleau	Bonnel*	4.3	29.7	689.3
	BonnelAgr*	24.2	9.4	38.6
	Carrier*	53.6	12.0	22.4
	Rouleau faca*	35.6	9.4	26.4
	Rouleau Güttler*	26.2	15.9	60.6
	Sacho*	49.0	14.1	28.8
Travail du sol	DynaDrive	66.8	11.4	17.0
	DynaDriveX2*	85.6	2.6	3.1
	Fraise Falc	89.7	5.3	5.9
	GlyphOmulch-avecRotor*	96.7	1.5	1.5
	GlyphOmulch-sansRotor*	53.6	10.2	19.1
	KF2020*	94.1	2.3	2.4
	SachoTerrano*	94.4	2.0	2.1
	Terrano	70.5	22.6	32.1

Globalement, les ordres de grandeurs et classement entre outils restent conservés entre les deux années, avec les outils de travail du sol ayant des efficacités de destruction entre 75 à 99 % en moyenne. Le désherbage électrique fut aussi très efficace, de l'ordre de 83,8 ± 3,6 % en 2019 et 80,8 ± 9,3 % en 2020. La variabilité de l'efficacité est faible indiquant que d'une répétition à l'autre et d'une année à l'autre, le désherbage électrique produit des efficacités stables (Tableau 1).

Le désherbage avec le bioherbicide a eu des efficacités contrastées entre années, avec 40,6 ± 12,1 % en 2019 et 83,6 ± 7,9 % en 2020. Ces résultats peuvent s'expliquer par la très forte biomasse en 2019 (6,6 ± 2,2 t/ha de MS en 2019 contre 3,0 ± 1,0 t/ha de MS en 2020) qui a surement conduit à des difficultés pour mouiller l'ensemble de la végétation et un effet parapluie des espèces à feuilles planes (tournesol) ou hautes (phacélie, tournesol, etc.) limitant l'efficacité sur les individus sous couvert.

Les outils combinant deux mécanismes de destruction (GlyphOmulch avec rotor, KF2020), le double passage de certains outils (DynaDriveX2) ou la combinaison d'outils (Sacho+Terrano) ont montré des

efficacités de destruction augmentées. L'efficacité moyenne du KF2020 est de 94,1 ± 2,3 % et le GlyphOmulch avec rotor est de 96,7 ± 1,5 % comparé au 53,6 ± 10,2 % sans rotor. Alors que les rouleaux Sacho et Terrano seuls ont respectivement 49 ± 14,1 et 70,5 ± 22,6 % d'efficacité moyenne, la combinaison des deux permettant d'atteindre 94,4 ± 2 %. Enfin le double passage de DynaDrive permet d'augmenter l'efficacité de 66,8 ± 11,4 (simple passage) à 85,6 ± 2,6 %.

Sous l'effet des modalités de destruction, la densité adventice diminue entre T0 (avant destruction) et T1 (7 jours après destruction), mais remonte dans certaines modalités à T1 (64 jours après destruction). C'est le cas pour le désherbage électrique et les modalités de travail du sol (sauf les outils Terrano et DynaDrive). C'est particulièrement le cas pour les modalités qui perturbent beaucoup le sol comme la Fraise Falc. Ces remontées de densités adventices à T2 sont bien de nouvelles germinations au stade cotylédon (2019) ou plantule (2020) qui composent 80 % à 90 % du relevé de flore à T2. Dans un contexte très dominé par les graminées annuelles automnales comme c'était le cas en 2019, les outils de travail du sol stimulent les germinations d'autant plus que la perturbation est intense. Dans ce contexte, même si le désherbage électrique a montré une bonne efficacité de destruction (entre T0 et T1), les graminées reprennent en végétation pour faire des densités de près de 50 plantes/m² en 2019. Les rouleaux quant à eux, malgré des efficacités de destruction faibles, laissent le couvert écrasé au sol, qui provoque un effet barrière du mulch mort, limite les relevées d'adventices, qui diminuent constamment entre T0, T1 et T2. C'est aussi le cas du désherbage avec le bioherbicide qui ne perturbe pas le sol et met surement du temps à agir et dessécher les plantes en place. Une chute des densités dans le témoin non détruit entre T1 et T2 est quand même à remarquer.

4. Conclusion

Notre étude a montré que les adventices dans les cultures suivantes étaient affectées par de multiples interactions entre la composition des couverts, la disponibilité en ressources du sol et le mode de destruction des couverts dans chaque expérimentation. La régulation biologique des adventices par les couverts, observée pendant la période d'interculture, ne s'est pas répercutée dans les cultures suivantes en une plus faible pression adventice. Le mode de destruction des couverts a été le principal facteur de réduction de la biomasse adventice dans les cultures suivantes. Les couverts détruits par herbicides ont généralement permis de réduire la biomasse adventice dans les cultures suivantes. La mise en place d'un couvert et l'amélioration de sa productivité (biomasse) par une fertilisation azotée au semis du couvert n'a généralement pas permis de réduire la biomasse adventice. Cette étude suggère que les couverts d'interculture ne joueraient peut-être pas un rôle si essentiel dans la régulation biologique des adventices dans les systèmes sans labour et sans herbicide, notamment lorsque les couverts produisent de faibles quantités de biomasse. D'autres répétitions sur un plus large éventail de conditions pédoclimatiques permettraient de confirmer ou non ces conclusions.

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

Stéphane CORDEAU : https://orcid.org/0000-0003-1069-8388 ;

Alicia ROUGE : https://orcid.org/0000-0002-6921-4862 ;

Guillaume ADEUX : https://orcid.org/0000-0003-0903-391X ;

Delphine MOREAU : https://orcid.org/0000-0003-2640-9931.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Tous les outils mis à disposition gratuitement par les constructeurs ou concessionnaires. Les auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière qui pourrait être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel. Les auteurs tiennent à remercier les expérimentateurs de l'U2E Domaine INRAE d'Epoisses, les collègues techniciens de UMR Agroécologie, les scientifiques contactés pour les protocoles. Nous remercions Léa Grall, Alexandre Lachmann, Florence Strbik, Eric Vieren, Emeline Felten, Claude Sarrasin, Séverin Yvoz, Marion Schwartz, Auxence Baudron (UMR Agroécologie - INRAE Dijon) et Benjamin Pouilly, Pascal Farcy, Jeremy Gervais, Philippe Chamoy, Loïc Dumont, Valérie Dufayet, Laurent Falchetto (U2E Domaine d'Epoisses - INRAE Bretenière) pour leur assistance sur le terrain.

Déclaration de soutien financier

Le projet a été financé en majorité sur fond propre INRA/INRAE UMR Agroécologie, le département INRAE Agroecosystem, et via le projet Ecophyto COPRAA. Des remerciements sont adressés au Ministère français de l'Agriculture qui a financé la thèse de doctorat d'Alicia Rouge. Le projet a aussi été financé par INRAE, la région Bourgogne (projet FABER Couv'Herbi), les projets Casdar VANCOUVER, RAID et ENGAGED financés par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale 'Développement agricole et rural'), les projets ANR COSAC (ANR-14-CE18-0007) et ANR PPR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008), et le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention (no. 727321- IWM PRAISE).

Références bibliographiques

Adeux G., Cordeau S., Antichi D., Carlesi S., Mazzoncini M., Munier-Jolain N., Bàrberi P., 2021. Cover crops promote crop productivity but do not enhance weed management in tillage-based cropping systems. European Journal of Agronomy 123, 126221.

Almoussawi A., Lenoir J., Spicher F., Dupont F., Chabrerie O., Closset-Kopp D., Brasseur B., Kobaissi A., Dubois F., Decocq G., 2020. Direct seeding associated with a mixture of winter cover crops decreases weed abundance while increasing cash-crop yields. Soil and Tillage Research 200, 104622.

Ashford D.L., Reeves D.W., 2003. Use of a mechanical roller-crimper as an alternative kill method for cover crops. American Journal of Alternative Agriculture 18, 37-45.

Baudron A., Adeux G., Cordeau S., 2019. Et si une impasse de désherbage en Agriculture de Conservation vous poussait à retravailler le sol ? Quelle intervention choisiriez-vous ? Techniques Culturales Simplifiées 103, 7-11.

Bavougian C.M., Sarno E., Knezevic S., Shapiro C.A., 2019. Cover crop species and termination method effects on organic maize and soybean. Biological Agriculture & Horticulture 35, 1-20.

Büchi L., Wendling M., Amossé C., Jeangros B., Charles R., 2020. Cover crops to secure weed control strategies in a maize crop with reduced tillage. Field Crops Research 247, 107583.

Campiglia E., Mancinelli R., Radicetti E., Caporali F., 2010. Effect of cover crops and mulches on weed control and nitrogen fertilization in tomato (Lycopersicon esculentum Mill.). Crop Protection 29, 354-363.

Carrera L.M., Abdul-Baki A.A., Teasdale J.R., 2004. Cover crop management and weed suppression in no-tillage sweet corn production. HORTSCIENCE 39, 1262-1266.

Cordeau S., 2022. Conservation agriculture and agroecological weed management. Agronomy 12, 867.

Cordeau S., Triolet M., Wayman S., Steinberg C., Guillemin J.-P., 2016. Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. Crop Protection 87, 44-49.

Couëdel A., Kirkegaard J., Alletto L., Justes É., 2019. Chapter Two - Crucifer-legume cover crop mixtures for biocontrol: Toward a new multi-service paradigm. In: Sparks, D.L. (Ed.), Advances in Agronomy. Academic Press, pp. 55-139.

Creamer N.G., Plassman B., Benett M.A., Wood R.K., Stinner B.R., Cardina J., 1995. A method for mechanically killing cover crops to optimize weed suppression Am. J. Altern. Agric. 10, 157–162.

Finney D., White C.M., Kaye J.P., 2016. Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. Agronomy Journal 108, 39-52.

Frasconi C., Martelloni L., Antichi D., Raffaelli M., Fontanelli M., Peruzzi A., Benincasa P., Tosti G., 2019. Combining roller crimpers and flaming for the termination of cover crops in herbicide-free no-till cropping systems. Plos One 14, e0211573.

Friedrich T., Derpsch R., Kassam A., 2012. Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture. Field Actions Science Reports 6, 1-7.

Grundy A.C., 2003. Predicting weed emergence: a review of approaches and future challenges. Weed Research 43, 1-11.

Hunter M.C., Schipanski M.E., Burgess M.H., LaChance J.C., Bradley B.A., Barbercheck M.E., Kaye J.P., Mortensen D.A., 2019. Cover Crop Mixture Effects on Maize, Soybean, and Wheat Yield in Rotation. Agricultural & Environmental Letters 4, 180051.

Marcillo G.S., Miguez F.E., 2017. Corn yield response to winter cover crops: An updated meta-analysis. Journal of Soil and Water Conservation 72, 226-239.

Mirsky S.B., Ryan M.R., Teasdale J.R., Curran W.S., Reberg-Horton C.S., Spargo J.T., Wells M.S., Keene C.L., Moyer J.W., 2013. Overcoming weed management challenges in cover crop–based organic rotational no-till soybean production in the eastern United States. Weed Technology 27, 193-203.

Nichols V., Martinez-Feria R., Weisberger D., Carlson S., Basso B., Basche A., 2020. Cover crops and weed suppression in the U.S. Midwest: A meta-analysis and modeling study. Agricultural & Environmental Letters 5.

Osipitan O.A., Dille J.A., Assefa Y., Knezevic S.Z., 2018. Cover crop for early season weed suppression in crops: Systematic review and meta-analysis. Agronomy Journal 110, 2211-2221.

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.

Pittman K.B., Barney J.N., Flessner M.L., 2020. Cover crop residue components and their effect on summer annual weed suppression in corn and soybean. Weed Science 68, 301-310.

Reboud X., Blanck M., Aubertot J.-N., Jeuffroy M.-H., Munier-Jolain N., Thiollet-Scholtus M., Huyghe C., 2017. Usage *et al*ternatives au glyphosate dans l'agriculture française Rapport Inra à la saisine Ref TR507024. Institut National de la recherche agronomique.

Schomberg H., Fisher D., Reeves D., Endale D., Raper R., Jayaratne K., Gamble G., Jenkins M., 2014. Grazing winter rye cover crop in a cotton no-till system: Yield and economics. Agronomy Journal 106, 1041-1050.

Snapp S.S., Swinton S.M., Labarta R., Mutch D., Black J.R., Leep R., Nyiraneza J., O'Neil K., 2005. Evaluating Cover Crops for Benefits, Costs and Performance within Cropping System Niches. Agronomy Journal 97, 322-332.

Wayman S., Cogger C., Benedict C., Burke I., Collins D., Bary A., 2014. The influence of cover crop variety, termination timing and termination method on mulch, weed cover and soil nitrate in reduced-tillage organic systems. Renewable Agriculture and Food Systems 30, 450-460.

Wells M.S., Reberg-Horton S.C., Smith A.N., Grossman J.M., 2013. The Reduction of Plant-Available Nitrogen by Cover Crop Mulches and Subsequent Effects on Soybean Performance and Weed Interference. Agronomy Journal 105, 539-545.

Pour citer cet article : Stéphane Cordeau, Alicia Rouge, Guillaume Adeux, Hugues Busset, Céline Colombet, *et al*.. Rôle des couverts d'interculture et de leurs modes de destruction dans la régulation des adventices. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.48-59. 10.17180/ciag-2025-vol101-art05

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

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

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

Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : Exemple du pois associé au blé

Nathalie COLBACH[1], Judith BURSTIN[1], Delphine MOREAU[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art06

Résumé

Associer le pois (*Pisum sativum* L.) au blé (*Triticum aestivum* L.) peut réduire l'infestation et les dommages causés par les adventices. Nous avons mené des expériences virtuelles avec le modèle FLORSYS afin d'identifier, en fonction du dispositif d'association et de la flore adventice, (1) les paramètres-clé du pois (traits) qui déterminent le rendement et le contrôle des adventices dans les associations pois–blé, (2) les combinaisons optimales des valeurs des paramètres du pois et du blé, ainsi que les techniques culturales de l'association, pour maximiser ces objectifs. Les simulations ont inclus des variétés existantes (5 pois et 3 blé) et virtuelles (5 et 10). Les associations ont réduit la perte de rendement du pois due aux adventices (de 30 % pour la variété la moins tolérante aux adventices) et l'infestation du champ (14 %). Un rendement élevé en pois dans les associations infestées d'adventices nécessite une variété de pois à haut potentiel de rendement, une variété de blé suppressive des adventices, et des techniques culturales préventives des adventices. Les résultats ont été synthétisés dans des tableaux de conseils.

Mots-clés : association céréale–légumineuse, adventice, trait, perte de rendement, idéotype, régulation biologique

Abstract: Identifying crop ideotypes for weed management – case study of pea intercropped with wheat

Intercropping pea (*Pisum sativum* L.) with cereals is a promising lever to reduce weed infestation and damages. This study ran virtual experiments with the FLORSYS model to identify, depending on the intercropping design and weed flora, (1) the key pea parameters (traits) that drive crop production and weed control in pea intercropped with wheat (*Triticum aestivum* L.), (2) optimal combinations of pea and wheat parameter values, and intercrop management techniques, to maximise these goals. Simulations included existing (5 pea and 3 wheat) and virtual varieties (5 and 10). Intercropping reduced pea yield loss due to weeds (by 30% for the least weed-tolerant variety) and field infestation (14%). A high pea yield in weed-infested intercrops needs a pea variety with a high yield potential, a weed-suppressive wheat variety and weed-preventive management techniques. Results were summarized in advice tables.

Keywords: cereal–legume intercrop, weed; trait; yield loss; yield gap; ideotype; biological regulation

1. Introduction

Dans le contexte actuel de réduction des pesticides se pose la question de la gestion des adventices (« mauvaises herbes ») qui sont le bioagresseur le plus nuisible pour la production des systèmes de culture arables tempérés (Oerke 2006). La diversification des cultures est un levier crucial pour la régulation biologique des adventices (Weisberger *et al*. 2019), et associer des céréales comme le blé (*Triticum aestivum* L.) à des légumineuses permet notamment de protéger des espèces comme le pois (*Pisum sativum* L.) peu compétitrices face aux adventices (Verret *et al*. 2017; Gu *et al*. 2021). Choisir

des variétés de pois adaptées rendrait une telle association encore plus efficace, en termes de potentiel de rendement (c'est-à-dire, le rendement en l'absence de bioagresseurs et en présence de ressources du sol non-limitantes) et de gestion des adventices.

La suppression des adventices est la capacité d'une culture à réduire la biomasse des adventices et/ou la production de graines d'adventices (Worthington et Reberg-Horton 2013; Zerner *et al*. 2016). L'autre composante de la compétitivité des cultures vis-à-vis des adventices est la tolérance aux adventices, c'est-à-dire la capacité à produire un rendement élevé ou une faible perte de rendement en présence d'adventices (Lemerle *et al*. 2006; Zerner *et al*. 2016). Les caractéristiques qui rendent le pois compétitif par rapport aux adventices ont été étudiées dans le cas du pois en culture pure (Jacob *et al*. 2017; Colbach *et al*. 2022) mais pas en culture associée. Les interactions interspécifiques, que ce soit avec d'autres cultures ou les adventices, sont en effet généralement ignorées pendant la sélection variétale (Kammoun *et al*. 2021; Kiær *et al*. 2022).

La sélection au champ de variétés de pois compétitives vis-à-vis des adventices, pour la culture en association, serait coûteuse car elle demanderait de tester de nombreuses combinaisons de variétés dans différents pédoclimats, systèmes de culture et flores adventices. Il est également notoirement difficile d'estimer correctement la perte de rendement des cultures due aux adventices, car il est pratiquement impossible de garantir un témoin continuellement exempt d'adventices pour mesurer le rendement potentiel (Colbach *et al*. 2020), ou d'assurer une infestation homogène d'adventices. Même si les modèles sont une représentation imparfaite de la réalité, ils (en particulier ceux basés sur des processus mécanistes) facilitent l'identification des facteurs limitants, des traits de culture et des idéotypes pertinents, ainsi que la prise en compte des interactions entre le génotype, l'environnement et le système de culture (Jeuffroy *et al*. 2014). Les modèles facilitent également la discrimination des deux composantes de la compétitivité vis-à-vis des adventices, à savoir la tolérance et la suppression des adventices. Les idéotypes sont des plantes cultivées idéales théoriques, qui combinent les valeurs des traits pour optimiser la performance de la culture dans un environnement particulier, la gestion de la culture et l'utilisation finale (Martre *et al*. 2015).

L'objectif de cette étude était d'utiliser le modèle FLORSYS (Colbach *et al*. 2019; Colbach *et al*. 2021) (Colbach *et al*. 2024) pour identifier les traits du pois et du blé (correspondant aux paramètres du modèle) qui rendent leurs associations compétitrices face aux adventices, dans différents scénarios de gestion. FLORSYS est actuellement le modèle le plus complet pour évaluer l'impact des cultures, variétés et techniques culturales sur les adventices, et les conséquences pour la production des cultures et la biodiversité. L'étude s'est concentrée sur le pois, moins compétiteur que le blé (Corre-Hellou *et al*. 2011; Gu *et al*. 2021) et sur la ressource pour laquelle cultures et adventices concourent le plus dans les systèmes de culture fertilisés des régions tempérées, à savoir la lumière (Colbach *et al*. 2023). Les paramètres du modèle considérés ici sont des traits indépendants des conditions environnementales (Tardieu 2003). Ils ne varient qu'avec l'espèce et/ou la variété cultivée et caractérisent leurs propriétés intrinsèques. Par exemple, la hauteur de la plante par unité de biomasse au début de la floraison dans des conditions non stressées (i.e. ressources non limitées et absence de compétition par les plantes voisines) est une valeur de paramètre constante pour une espèce/variété donnée, contrairement à la hauteur de la plante au début de la floraison, qui dépend des conditions de croissance.

2. Tester des variétés réelles et virtuelles avec un modèle

Les simulations de cette étude (Colbach *et al*. in revision) ont été réalisées avec le modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS qui simule la compétition pour la lumière entre plantes (qu'elles soient adventices ou cultivées), la dynamique de la flore adventice sur le long terme et son impact sur la production agricole en fonction des systèmes de culture et du pédoclimat (Colbach *et al*. 2019; Colbach *et al*. 2021; Colbach *et al*. 2024). Ce modèle permet ainsi de tester de nombreux et divers systèmes de culture à long terme et avec différentes flores adventices, conditions météorologiques et types de sol.

Au début de l'étude, 7 variétés de pois (dont 5 d'hiver) et 3 variétés de blé d'hiver étaient paramétrées dans FLORSYS, à partir d'expérimentations au champ et en conditions contrôlées. Pour étendre la diversité des variétés étudiées, 5 variétés virtuelles de pois d'hiver et 10 de blé ont été créées en faisant varier les valeurs des paramètres mesurés sur les variétés existantes, tout en respectant les corrélations entre paramètres pour éviter des aberrations biologiques (voir la méthode dans Colbach *et al*. 2022).

3600 systèmes de culture incluant des associations combinant une des 10 variétés de pois d'hiver et une des 13 variétés de blé ont été simulés sur 12 ans, partant d'un fort salissement initial par les adventices. Ces systèmes sont contrastés en termes d'usage d'herbicide, travail du sol, rotations, et flore adventice. Chaque système de culture est répété 5 fois avec différents enregistrements météorologiques de Dijon. Les dispositifs des associations sont substitutifs, additifs ou « incomplet » : un dispositif substitutif sème x % de la densité de semis en pure de la première espèce et (100 – x) % de la densité en pure de la deuxième espèce. Dans un dispositif additif, la somme des densités relativement aux cultures en pur dépasse 100 % et dans un dispositif incomplet, la somme est moins de 100 %.

La même étude de simulation a été réalisée en remplaçant les associations pois-blé par du pois en pur (Colbach *et al*. 2022), ce qui permet d'évaluer les bénéfices et inconvénients du passage du pois pur à une association. Les densités de semis du pois en pur variaient autant que dans les associations. La comparaison des performances des associations à celles des cultures en pur pouvait ainsi discriminer l'effet de l'association de celui de la réduction de la densité de semis (Lebreton *et al*. 2024).

3. Compromis entre production de pois et production de blé

En l'absence d'adventices, les variétés de pois produisant un fort rendement de pois sont aussi celles qui produisent un faible rendement de blé, et vice-versa (**Figure 8**). Ce compromis entre rendement du pois et rendement du blé est obtenu aussi bien pour les variétés réelles que les variétés virtuelles. En moyenne, pour chaque t/ha de rendement additionnel de blé, le pois perd 0.5 t/ha.

Certaines variétés se détachent de cette relation. La variété Isard produit à la fois le meilleur rendement de pois, et permet un rendement de blé moyen. Par rapport à Isard, le rendement de pois est divisé par deux pour la variété China, malgré un rendement de blé plus faible.

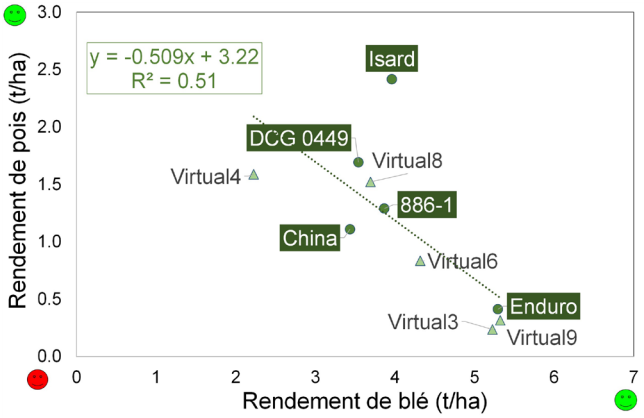


Figure 1 : Compromis entre rendement de pois et rendement de blé dans les associations pois–blé en l'absence d'adventices, en fonction des variétés de pois existantes et virtuelles. Moyennes de 3 600 systèmes de culture x 5 répétitions météo simulés avec FlorSys sur 12 ans (basé sur Colbach *et al*. in revision)

4. La contribution de l'association pois-blé pour gérer les adventices

4.1. Le blé est plus compétitif que les adventices

En l'absence d'adventices et en moyenne sur toutes les densités de semis, associer le blé avec du pois fait chuter le rendement du blé de 41 % en moyenne sur toutes les variétés, comparé au blé en pur, alors que les densités de blé en association étaient en moyenne les mêmes qu'en pur dans les

simulations. La perte de rendement du pois due à l'association avec le blé est bien plus élevée, avec 69 % en moyenne (Figure 2.A). Cette chute est plus importante que la perte de rendement du pois due aux adventices dans les cultures en pur (50 % en moyenne, Figure 2.C). Puisque les adventices sont souvent bien plus abondantes en pois en pur que le blé ne l'est dans l'association, ceci indique que le blé est plus compétitif que les adventices. Ceci explique pourquoi associer le pois avec du blé réduit la perte de rendement du pois due aux adventices jusqu'à 30 % comparé au pois en pur pour les variétés les moins tolérantes aux adventices comme Enduro (Figure 2.C), et le salissement du champ par les adventices jusqu'à 14 % pour les variétés les moins suppressives comme 886-1 (Figure 2.D).

4.2. Les rendements de pois en association et en pur sont fortement corrélés

Le comportement des variétés de pois en association est bien corrélé à celui en culture en pur, surtout pour le rendement en présence d'adventices (R^2 élevé pour la régression linéaire de la Figure 9.B). Certaines variétés se détachent des régressions linéaires, indiquant un bénéfice ou un coût plus important que la moyenne. La variété Virtual4 souffre par exemple moins de la présence du blé que la moyenne des variétés, tandis qu'Enduro est plus affectée (Figure 9.A).

4.3. La tolérance et la suppression des adventices ne vont pas de paire

Une tolérance élevée aux adventices n'est pas toujours accompagnée d'une forte suppression des adventices (c'est-à-dire, d'une faible infestation des champs). Par exemple, la 2ème variété de pois la plus tolérante aux adventices en culture pure et en association, 886-1 (Figure 2.C), est la moins suppressive en pois pur et l'avant-dernière en association (Figure 2.D). Inversement, la 2ème variété la plus suppressive, China, figure parmi les variétés les moins tolérantes aux adventices (Figure 2.C). En bref, les variétés de pois ont réagi différemment au blé dans les associations et aux adventices en pois pur.

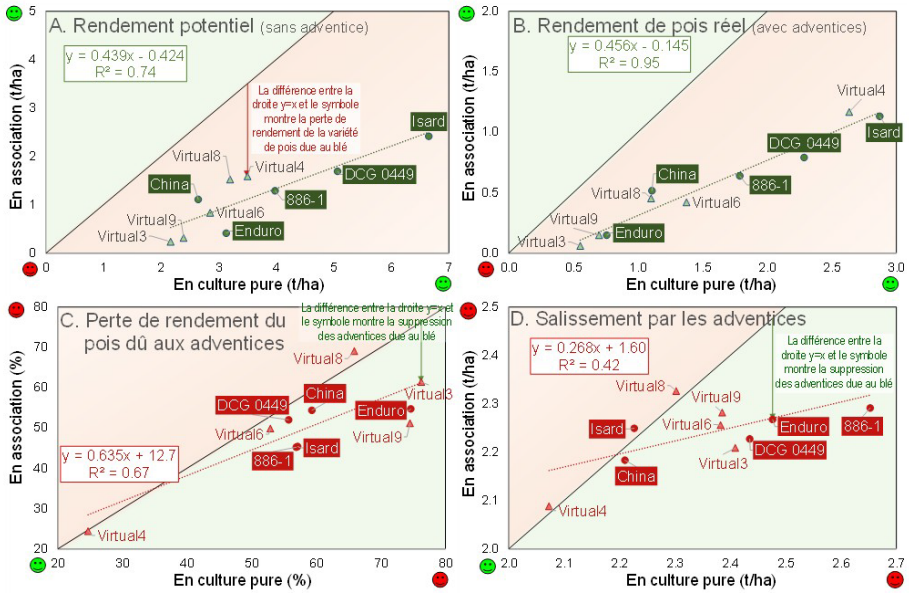


Figure 2 : Effet de l'association pois–blé sur le rendement potentiel (A) et réel (B) du pois, sa perte de rendement due aux adventices (C) et le salissement du champ par de la biomasse adventice (D), en fonction des variétés de pois existantes et virtuelles. Moyennes des associations pois–blé (ou pois en pur) de 3 600 systèmes de culture x 5 répétitions météo simulés avec FlorSys sur 12 ans (ligne noire continue : y=x ; lignes pointillées : régressions linéaires ajustées aux points ; zones vertes : l'association est meilleure que la culture en pure, et vice-versa pour les zones en rouge) (tiré de Colbach *et al.* in revision).

4.4. Les variétés les plus suppressives sont des variétés réelles

Dans les simulations sans adventices, les variétés ayant le rendement le plus élevé sont des variétés réelles, Isard et DCG 0449, en association et en pois pur, tandis que les variétés les moins productives sont des variétés virtuelles (Figure 2.A). En revanche, les variétés réelles testées dans cette étude ne sont pas les meilleures en termes de tolérance aux adventices ou de suppression des adventices (Figure 2.C et D). Les 3 variétés les moins suppressives sont toutes des variétés réelles (Figure 2.D).

5. Les idéotypes les plus performants

5.1. Utiliser de la fouille de données pour identifier les idéotypes

Les performances des associations ont ensuite été analysées à l'aide d'arbres de classification et régression (classification and regression trees, CART) (Breiman *et al*. 1984). Ces arbres (voir l'exemple de la **Figure 3**) prédisent une variable de réponse continue à partir d'un ensemble de prédicteurs discrets ou continus. La méthode consiste à subdiviser successivement le lot de données en deux sous-ensembles en fonction d'une valeur seuil du prédicteur afin de maximiser la différence entre les sous-ensembles. Les branches de l'arbre sont des combinaisons de valeurs du prédicteur qui conduisent aux prédictions contenues dans les feuilles.

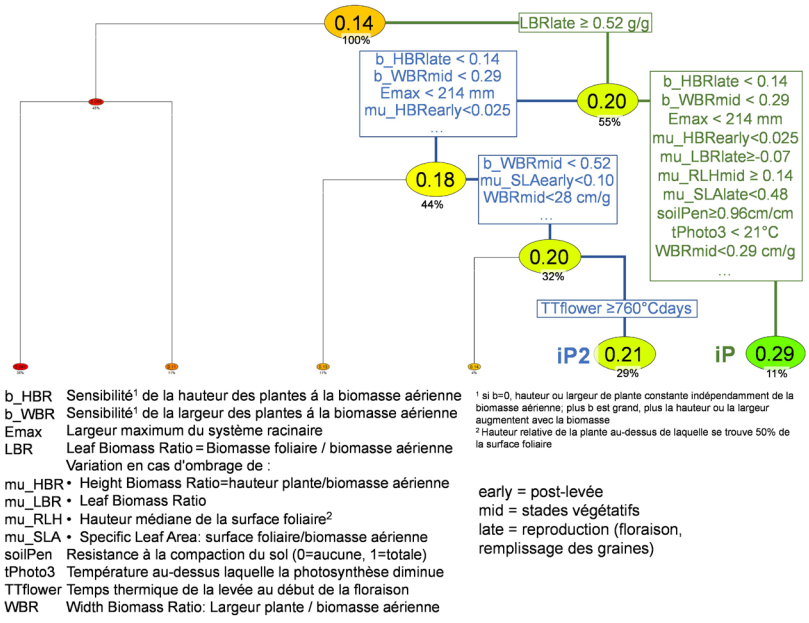


Figure 3 : Arbre de classification et de régression (CART) analysant le rendement potentiel du pois (variable de réponse) associé au blé de simulations sans adventices en fonction des paramètres du pois. Les branches surlignées montrent les deux meilleurs idéotypes, iP (décrit au Tableau 1) et iP2. Les encadrés montrent des exemples de prédicteurs et de seuils de séparation des branches pour les deux branches surlignées. Les feuilles (en bas de l'arbre) et les nœuds indiquent des valeurs d'indicateur normalisées avec 0=rendement le plus faible et 1=rendement le plus élevé de l'ensemble des données simulées. Les pourcentages situés sous les nœuds indiquent la proportion d'individus appartenant à ce nœud. Le nœud racine au sommet de l'arbre à 100 % puisque l'ensemble de données n'a pas encore été divisé (tiré de Colbach *et al*. in révision).

Ici, les idéotypes correspondent à la meilleure branche d'arbres construits avec différentes variables de réponse (rendement réel ou potentiel, perte de rendement due adventices, infestation du champ), différents prédicteurs (paramètres des variétés de pois seuls, ou aussi ceux du blé) et appliqués à toutes les associations ou aux seules associations additives, substitutives ou incomplètes. Les paramètres les plus influents (utilisés en premier dans les arbres et expliquant au moins 1 % de la

variabilité sur l'ensemble des arbres) ont été retenus pour construire des tableaux synthétiques, comparant les idéotypes aux variétés de pois existants.

Tableau 1 : Combinaisons optimales de paramètres variétaux de pois pour maximiser le rendement de pois associé au blé, en l'absence (idéotype iP) ou présence d'adventices (iR), ainsi que la tolérance aux adventices (iT). Les règles en vert améliorent le rendement ou la tolérance comparé à certaines variétés de pois existantes (en gras, la valeur de paramètre est différente de 90% de la gamme de valeurs existantes), celles en rouge montrent des compromis (i.e., des valeurs de paramètres réduisant potentiellement la performance mais corrélés à des caractéristiques bénéfiques ou n'ayant pas d'effet dans les systèmes testés), celles en blanc montrent des règles respectées par les variétés actuelles (basé sur Colbach *et al*. in revision)

	Combinaisons de caractéristiques des idéotypes de pois				Idéotypes comparés aux variétés existantes		
					Rendement potentiel (iP)	Rendement réel (iR)	Tolérance aux adventices (iT)
[1]	Dormance des semences						Plus dormant
[2]	Démarrage de la germination						Plus tôt
[3]	Vitesse de croissance racinaire pré-levée (tolérance à la sécheresse)					Plus lente	
[4]	Mortalité pré-levée due à la profondeur des semences						Plus faible
[5]	Mortalité pré-levée due à la compaction du sol						Plus forte
[6]	Vitesse de croissance post-levée (taux de croissance relatif)					Plus rapide	
[7]	Variabilité inter-plante de la surface foliaire à la levée					Similaire	
[8]	Hauteur maximale des plantes					Plus courte	**Plus courte**
[9]	Homogénéité de la hauteur des plantes			reproduction	Plus homogène		
[10]	Homogénéité de la largeur des plantes			végétatif	Plus homogène		
[11]	Largeur des plantes par unité de biomasse aérienne			végétatif	Plus étroite		
[12]	(Plant Width Biomass Ratio)			reproduction		Similaire	
[13]	% biomasse aérienne allouée aux feuilles (Leaf			levée		Similaire	**Plus feuillu**
[14]	Biomass Ratio)			reproduction	**Plus feuillu**	Similaire	
[15]	Position de la surface foliaire le long de la plante			levée		Plus basse	
[16]				végétatif		Plus basse	
[17]	Réponse à l'ombrage	Hauteur	de plante par unité de biomasse	levée	Plus courte	Plus courte	
[18]		Largeur	aérienne	reproduction		Plus large	
[19]		% biomasse aérienne allouée aux feuilles		végétatif	Plus feuillu		
[20]		(Leaf Biomass Ratio)		reproduction	Plus feuillu	Plus feuillu	
[21]		Surface foliaire par unité de biomasse		levée		Plus petite	Plus petite
[22]		foliaire (Specific Leaf Area)		reproduction	Plus petite		**Plus grande**
[23]		Position de la surface foliaire le long de la		végétatif	**Plus haute**	Plus haute	
[24]		plante		reproduction		Similaire	
[25]	Largeur maximale du système racinaire				Plus étroite		Plus large
[26]	Position de la biomasse racinaire en fonction de la profondeur				Plus superficielle	Plus superficielle	
[27]	Croissance racinaire en sol compacté				Meilleure	Meilleure	
[28]	Tolérance au gel			reproduction			Plus tolérant
[29]	Photosynthèse en conditions chaudes				**Plus faible**	Plus faible	
[30]	Variétés de pois répondant à ces règles				Isard	Isard Virtual4	Virtual4

5.2. L'idéotype de pois passe-partout pour produire en l'absence d'adventices

Le **Tableau 1** décrit des idéotypes de pois généralistes, c'est-à-dire les combinaisons de valeurs de paramètres variétaux de pois qui maximisent la performance du pois associé au blé, en moyenne sur toutes les situations simulées, sans tenir compte de la variété de blé associée ou du dispositif d'associatif. L'idéotype iP (P pour potentiel) vise à maximiser le rendement potentiel de pois (en l'absence d'adventices). Sa caractéristique dominante (la première règle de subdivision dans la **Figure 3**) est l'allocation d'une plus forte proportion de biomasse aux feuilles pendant la reproduction (ligne [14] dans le **Tableau 1**), comparées aux 7 variétés de pois existantes dans FLORSYS. Les autres caractéristiques bénéfiques sont une hauteur [9] et largeur de plante [10] plus homogènes que dans les

variétés existantes, une plus grande proportion de biomasse allouée aux feuilles [19][20] et une remontée de la surface foliaire vers le haut des plantes en cas d'ombrage [23]. Le système racinaire de cet idéotype est plus étroit [25] (laissant plus biomasse aux compartiments aériens et la compétition pour la lumière) et superficiel [26] (laissant moins d'eau pour la germination et levée du blé associé).

Ces caractéristiques bénéfiques viennent avec un coût, c'est-à-dire elles peuvent être corrélées à des caractéristiques potentiellement néfastes mais qui n'ont pas d'effet dans les systèmes de culture testés ou dont l'effet néfaste est négligeable face aux effets bénéfiques. C'est par exemple le cas de la photosynthèse plus réduite de l'idéotype à des températures chaudes [29]. Au final, une seule des 12 variétés de pois répond à ces règles contraignant les valeurs de paramètre, la variété Isard [30].

5.3. Des idéotypes différents pour le rendement et la tolérance aux adventices

Lorsque des adventices sont ajoutées aux simulations, l'idéotype de pois le plus performant iR (R pour réel) n'est pas tout à fait le même (**Tableau 2**) que le précédent iP maximisant le potentiel. La principale différence entre les deux idéotypes se situe immédiatement après la levée. En présence d'adventices, le pois doit avoir une croissance plus rapide que la plupart des variétés existantes [6], allouer une proportion de biomasse aux feuilles similaire à celle des variétés existantes [13], et répartir sa surface foliaire de manière plus homogène sur la hauteur de la plante [15]. Par ailleurs, les plantes non ombragées n'ont pas besoin d'être extrêmement hautes [8] ou extrêmement larges [12], sauf que les plantes reproductrices doivent allouer une proportion de biomasse aux feuilles similaire à celle des variétés existantes [14]. En termes de réponse à l'ombrage, les deux idéotypes sont assez similaires, sauf que les plantes iR deviennent plus larges par unité de biomasse que les variétés existantes [18], échappant ainsi à l'ombre latéralement. La photosynthèse de iR est aussi moins limitée en conditions chaudes [29].

Les caractéristiques de iR ont produit un potentiel de rendement similaire mais avec un meilleur rendement réel de pois que iP (**Tableau 2**). En effet, les règles variétales pour réduire les adventices sont différentes de celles qui déterminent le potentiel de rendement. Ceci devient évident en examinant l'idéotype iT (T pour tolérance aux adventices) qui minimise la perte de rendement du pois due aux adventices (**Tableau 1**). Cet idéotype n'a pas une seule caractéristique en commun avec iP (qui maximise le potentiel), et certaines des règles de iT contredisent les règles de iP. Par exemple, en cas d'ombrage, les feuilles de iT sont plus fines et plus grandes pendant la reproduction [22] (interceptant plus de lumière et ombrant plus les adventices). Cette adaptation n'est pas encore nécessaire après la levée [21], lorsque l'ombrage est rare.

Tableau 2 : Performance des idéotypes de pois sélectionné pour maximiser le rendement de pois (tous sauf iT) ou la tolérance aux adventices (iT) en association avec le blé. Les idéotypes de pois ont été identifiés à l'aide d'arbres de classification et régression (CART). Les performances sont les valeurs moyennes sur les associations dont les variétés de pois (toutes les lignes) et de blé (4 dernières lignes) répondent aux règles des idéotypes de pois et de blé, respectivement (basé sur Colbach *et al*. in revision).

Idéotype de pois	Idéotype sélectionné pour			Rendement					Infestation du champ (t/ha)
	Adventices	Variété de blé	Dispositif d'association	Pois (t/ha)		Blé (t/ha)		Association (kJ/ha)	
				Réel	Potentiel	Réel	Potentiel		
iP	non§	Toutes$	Tous&	1.1	2.4	1.7	4.0	85	2.2
iT	oui	Toutes	Tous	1.2	1.6	1.0	2.2	101	2.1
iR	oui	Toutes	Tous	1.4	2.4	1.6	3.5	101	2.3
iR*	oui	b1	Tous	4.2	5.5	0.6	0.6	196	1.1

	oui	b2	Tous	2.8	3.5	1.8	2.9	158	1.9
iA*	oui	bA	Additif	4.9	5.7	1.3	1.3	235	0.5
iS*	oui	bS	Substitutif	2.9	3.0	0.6	0.9	181	0.9

§ Arbres réalisés sur les données issues des simulations sans (non) ou avec adventices (oui).

$ Arbres réalisés avec les paramètres variétaux de pois uniquement (toutes) ou incluant aussi ceux du blé (les autres)

& Arbres réalisés sur tous les dispositifs d'association, ou seulement les dispositifs additifs ou substitutifs

Mais les principaux avantages de la iT sont sa germination précoce [2] et la faible perte pré-levée [4], sauf dans un sol compacté [5]. Ce dernier point n'est pas un problème car les cultures sont généralement semées dans des lits de semences non compactés. La vitesse de germination [2] a un prix, avec une dormance plus importante [1]. En d'autres termes, la précocité l'emporte sur la densité finale. Ces règles ont permis de réduire l'infestation des champs et la différence entre rendements réels et potentiels comparées aux deux autres idéotypes (iT vs iP et iR dans **Tableau 2**). Cependant, la tolérance aux adventices et la capacité à les supprimer ont un prix : le rendement potentiel de iT est bien plus faible, résultant au final dans un rendement réel plus faible que pour iR (maximisant le rendement réel), malgré sa meilleure tolérance aux adventices et une meilleure suppression des adventices (infestation plus faible).

Parmi les variétés de pois testées, deux correspondaient aux règles de iR pour le rendement maximum, Isard et Virtual4 (**Tableau 1**). Virtual4 respecte aussi les règles de iT pour la tolérance aux adventices, C'est d'ailleurs la variété avec la plus faible perte de rendement due aux adventices dans la **Figure 2**.C. Comme Isard correspond à la fois aux règles iP (maximisant le potentiel) et iR, cela signifie que différentes caractéristiques de la variété étaient pertinentes, en fonction de l'environnement, c'est-à-dire la présence de blé uniquement (dans iP) ou à la fois de blé et d'adventices (iR).

5.4. Choisir une variété de blé adaptée améliore la performance du pois

La performance du pois associé au blé est meilleure si la variété de blé est adaptée, c'est-à-dire si les arbres de régression et de classification analysent le rendement de pois en fonction des paramètres variétaux de pois et de blé. Les rendements de pois potentiel et réel sont alors multipliés par plus de 2 et 3, respectivement, et l'infestation du champ divisée par 2 pour l'idéotype de pois iR* (R pour rendement réel, et * pour adaptation au blé) associé à l'idéotype de blé b1 (**Tableau 2**). En revanche, les rendements de blé réel et potentiel sont divisés approximativement par 5 et 3, respectivement. Associer le même idéotype de pois iR* avec un autre idéotype de blé peut tout changer, comme le montre l'association avec le blé b2 : les rendements de blé sont réduits d'un tiers comparés à l'association avec b1, ceux de blé multipliés par 3–4 et l'infestation du champ par presque 2. L'idéotype de pois iR* est en fait l'exact opposé de l'idéotype iR (maximisant le rendement réel toutes variétés de blé confondues), montrant au passage que ce ne sont pas tellement des caractéristiques bénéfiques individuelles qui font qu'une variété est performante, mais la combinaison de plusieurs caractéristiques qui diffèrent en fonction de la situation.

5.5. Adapter la variété de pois au dispositif d'association

Selon le dispositif d'association, le meilleur idéotype n'est pas le même. L'idéotype de pois iA* choisi pour les dispositifs additifs et adapté au blé associé (**Tableau 3**) a toutes les caractéristiques de l'idéotype généraliste iP maximisant le rendement potentiel, avec en plus des exigences sur la germination-levée et l'implantation. Ces deux phases doivent être plus rapides et plus homogènes que pour la plupart des variétés de pois réelles utilisées ici, et sont indispensables pour que le pois occupe le terrain avant les adventices. Pour une meilleure performance, iA* doit être associé avec l'idéotype de blé bA, qui a une bonne et rapide germination-levée pour compléter l'occupation du terrain. Mais

contrairement au pois iA*, le blé bA est petit, avec des feuilles vers le bas de la plante, et une forte allocation de biomasse aux racines. Cette dernière caractéristique réduit la capacité de compétition pour la lumière du blé (en en laissant plus au pois) et réduit l'eau disponible pour la germination-levée des adventices. Cette combinaison se traduit par le meilleur rendement de pois (et de l'interculture) et la meilleure suppression des adventices de toutes les situations analysées, au coût d'un des pires rendements de blé (**Tableau 2**).

L'idéotype de pois pour les dispositifs substitutifs iS* partage plusieurs caractéristiques avec l'idéotype iA* des dispositifs additifs, notamment les plantes larges, homogènes et feuillues (**Tableau 3**). De plus, iS* est grand, mais avec une germination-levée et implantation plus lente. Pour être efficace, iS* doit être associée avec un blé (bS) également plus grand et dont la germination est plus rapide pour compenser l'occupation plus lente du terrain par le pois face aux adventices. Bien que l'infestation par les adventices soit plutôt bien contrôlée par la combinaison iS*–bS, les rendements de pois et de blé sont bien plus faibles que pour la combinaison iA*–bA (**Tableau 2**).

Tableau 3 : Caractéristiques majeures des combinaisons de paramètres variétaux de pois et de blé pour maximiser le rendement de pois réel (en présence d'adventices) dans une association avec le blé en fonction du dispositif d'association. Les cellules vertes et rouge montrent des caractéristiques variétales bénéfiques pour l'espèce. Pour le pois, seules les caractéristiques bénéfiques au pois sont montrées, en gras celles qui le distingue le plus des variétés existantes (basé sur Colbach *et al*. in revision)

Combinaisons de caractéristiques des idéotypes		Idéotypes comparés aux variétés existantes			
		Additif		Substitutif	
		Pois iA*	Blé bA	Pois iS*	Blé bS
[1]	Germination, levée,	Meilleure et plus rapide	Meilleure et plus rapide	Meilleure	Plus rapide
[2]	Implantation	Plus rapide et plus homogène		Plus homogène	
[3]	Plantes	Plus larges et plus homogènes	Plus petites et plus larges	Plus grandes, plus larges et plus homogènes	Plus grandes
[4]	Feuilles	**Plus feuillu, vers le haut**	Vers le bas	**Plus feuillu**	
[5]	Réponse à l'ombrage	Plus larges et plus feuillues		Plus grandes	
[6]	Système racinaire	Superficiel	Important		
[7]	Exigences thermiques		Tolérante au gel	Bonne photosynthèse en cas de chaleur	
[8]	Variétés répondant à ces règles	Isard	Virtual 5 6	DCG0449	Virtual 3 5 7

6. Le rôle de la gestion des intercultures

6.1. La performance dépend de la densité de semis

La réduction des rendements en dispositif substitutif est due aussi la plus faible densité de semis que dans les dispositifs additifs. En effet, les simulations montrent que les meilleurs rendements de pois (en présence d'adventices) sont obtenus avec des densités de semis de pois et de blé de 64 % de la densité habituelle en pur. Ceci correspond à un dispositif additif de 130 %. Au-delà, les rendements de pois diminuent au profit des rendements de blé, plus compétitif.

6.2. Le rôle clé des dates de réoltes et de la précocité des variétés

La fouille de données a aussi permis d'identifier les techniques culturales les plus influentes (**Tableau 4**). La technique plus influente (VIP le plus élevé dans le **Tableau 4**) est la date de récolte, qui est en fait un proxy pour la précocité des variétés. La récolte tardive ne peut augmenter le rendement uniquement si elle est associée à des variétés tardives. Ceci pointe vers le rôle clé de la date de floraison qui dépend du temps thermique depuis la levée pour les variétés hr (alors la floraison des

variétés Hr dépend de la longueur du jour). Cependant, une récolte tardive laisse aussi plus de temps aux adventices de croître et de se reproduire, et est donc néfaste pour le contrôle des adventices.

6.3. Un tableau de conseil pour raisonner et comprendre l'effet des techniques culturales

Le **Tableau 4** synthétise les effets des techniques culturales, distinguant les performances du pois et du blé, mais aussi rendement des cultures et contrôle des adventices. La dernière colonne explique les cases de ces effets. Ce tableau pourra accompagner les agriculteurs et autres acteurs lors de la conception de stratégies de gestion des associations. Par exemple, augmenter le délai entre dernier travail du sol et semis de l'association réduit les rendements réels, la tolérance aux adventices et la suppression des adventices car les adventices ont plus de temps pour lever après ce dernier travail du sol qui a nettoyé le champ des adventices levées en interculture.

Tableau 4 : Les principales techniques de gestion des associations pois–blé qui influencent le rendement, la tolérance aux adventices et la suppression des adventices. Les techniques les plus influentes ont été sélectionnées sur la base du prédicteur d'importance variable relative (VIP) sommé sur tous les arbres de classification et de régression. Une probabilité ≥ 0,90 en vert (respectivement en rouge) signifie qu'une augmentation (respectivement une diminution) de la valeur des techniques entraîne une augmentation de la valeur de la variable de réponse. Les cellules vides indiquent des techniques à effet non significatif ou instable ou un VIP cumulé < 0,01 (tiré de Colbach *et al*. in revision)

Technique de gestion de l'association	**Unité**	Rendement potentiel		Rendement réel ou tolérance		Suppression des adventices	**Total VIP**	**Causes de l'effet** (identifiées à l'aide de l'analyse de variables d'état décrivant les adventices, les cultures et le sol)
		Pois	**Blé**	**Pois**	**Blé**			
Travail du sol								
Travail du sol superficiel	opérations par an			+			0.02	Réduit le stock semencier en déclenchant des germinations adventices pendant l'interculture ("faux semis"), détruit les adventices avant le semis
Travail du sol après 1er nov	opérations par an				+		0.03	Plus de destruction d'adventices et semis tardif (voir date de semis)
Temps du dernier travail du sol au semis	jour			–	–	–	0.23	Laisse plus de temps aux adventices pour réinfester le champ après que le dernier travail du sol ait nettoyé le champ
Broyage	opérations par an			+	+		0.04	Détruit les adventices pendant l'interculture
Semis								
Date de semis					+		0.07	Laisse plus de temps pour du faux semis, réduit le temps de croissance des adventices en culture
Proportion der rangs de pois dans l'association	rangs / rangs		–				0.02	Les plantes de pois occupent plus de place dans le champ et laissent moins de place au blé
Largeur d'interrang	cm		–	–	–		0.15	Plus de compétition entre plantes cultivées dans un rang donné, plus de lumière perdue par la culture sur l'interrang
Espèces semées en rang séparé	oui (1) ou non (0)	+	–				0.03	Le pois souffre plus de la compétition interspécifique mais le blé souffre plus de la compétition intraspécifique
Densité de semis totale (vs cultures en pur)	grains ·m²/ grains·m²	+	+				0.03	Plus de plantes de pois et blé dans le champ qui interceptent plus de lumière et laissent moins de place et de ressources aux adventices
Densité de semis du pois	vs pois en pur grains ·m²/ grains ·m²	+	+			+	0.05	Plus de plantes et surface foliaire de pois pour produire de la biomasse de pois et ombrer les adventices (mais pas le blé)
Densité de semis du blé	vs blé en pur grains ·m²/ grains ·m²	–	+	+			0.07	Plus de plantes et surface foliaire de blé pour produire de la biomasse de pois et ombrer les adventices et le pois associé
Autres								

Herbicides à plusieurs modes d'entrée	traitements par an			+	+		0.01	Détruit les adventices (et plus efficacement que les herbicides qui n'entrent que via les feuilles ou les racines ou le méristème)
Herbicides Anti-monocot	traitements par an				+		0.01	Moins d'adventices monocot survivent et concourent avec la culture
Herbicides Anti-dicot	traitements par an				+		0.01	Moins d'adventices dicot survivent et concourent avec la culture
Surface désherbée mécaniquement	m² / m²					+	0.02	Détruit plus d'adventices
Date de récolte		+	+	+	+	–	0.76	Laisse plus de temps pour la production de biomasse cultivée MAIS aussi plus de temps pour la croissance et reproduction des adventices

7. Discussion

7.1. Une des rares études à analyser l'effet des variétés de pois associé au blé sur les adventices

Notre étude est une des très rares études analysant les variétés de pois en termes de compétitivité face aux adventices dans les associations. Bien que les associations soient de plus en plus étudiées, les études se concentrent essentiellement sur l'utilisation de l'azote par les associations influant des légumineuses (Hauggaard-Nielsen *et al*. 2009 ; Bedoussac et Justes 2010a) et/ou la performance économique et les impacts environnementaux (Pelzer *et al*. 2012). Les rares études qui analysent les variétés tentent de maximiser le rendement potentiel, que ce soit en expérimentation (Annicchiarico *et al*. 2021; Kammoun *et al*. 2021) ou avec des modèles (Barillot *et al*. 2014). Ces derniers utilisent des modèles structure–fonction qui décrivent les plantes à l'échelle de l'organe au dépend de l'effet des techniques culturales et de la dynamique de levée (Gaudio *et al*. 2019).

7.2. Des résultats cohérents avec les observations de terrain

Les principales conclusions de notre étude sur le contrôle des adventices rejoignent les rares résultats obtenus sur le terrain. Par exemple, la réduction du rendement de pois due à l'association est en moyenne de 69% dans nos simulations (52 %-89 % en fonction des variétés), proche des valeurs rapportées dans la littérature : de 50 % (Bedoussac et Justes 2010b; Kammoun *et al*. 2021) à 78 %-84 % (Annicchiarico *et al*. 2021). La plus forte compétitivité du blé comparé au pois est aussi connue (Corre-Hellou *et al*. 2011; Annicchiarico *et al*. 2021; Gu *et al*. 2021). D'autres études ont également observé une corrélation négative entre rendements de pois et de blé en association, ou une corrélation positive entre rendements de pois en association et en pur (Annicchiarico *et al*. 2021; Kammoun *et al*. 2021). Les études encore plus rares s'intéressant à la suppression des adventices en association pois–blé tirent des conclusions similaires aux nôtres, par exemple que les variétés à forte biomasse de feuilles sont plus suppressives et que l'ombrage (ou une forte interception de la lumière) est crucial (Poggio 2005; Gronle *et al*. 2015).

7.3. Et les ressources du sol ?

Cette étude de simulation s'est concentrée sur la lumière, qui est la ressource pour laquelle cultures et adventices concourent le plus dans les systèmes de grande culture tempérés (Colbach *et al*. 2023). Cette simplification est acceptable dans la mesure où la sur-production des associations est essentiellement attribuée à une utilisation plus efficace de la lumière (Bedoussac et Justes 2010a). Cependant, les associations céréales–légumineuses visent souvent à réduire la fertilisation azotée. La compétition pour l'eau deviendra probablement bien plus importante avec le changement climatique

(Laurent *et al*. 2023). Et bien la contribution de l'allélopathie pour la gestion des adventices reste à démonter (Mahé *et al*. 2022; Moreau *et al*. 2024), il est possible que des variétés de blé allélopathiques puissent impacter une légumineuse associée. Ce sont autant de questions que nous avons commencé à traiter dans des nouvelles études de simulation.

8. Conclusion

Cette étude a révélé que la gestion de l'association (ainsi que la rotation et la gestion des autres cultures) est primordiale pour la tolérance aux adventices et la suppression des adventices tandis que le choix de la variété de pois prime pour le potentiel de rendement. Les paramètres variétaux du pois et leurs combinaisons les plus influents pour la production de pois et la régulation biologique des adventices dans les associations pois–blé ont été identifiés. Ces paramètres inhérents aux variétés et indépendants de l'environnement sont des pistes pour les sélectionneurs et agriculteurs pour sélectionner et choisir des variétés de pois plus performantes et adaptées au type de systèmes de culture et à l'objectif de production. Cependant, il faut maintenant lier ces paramètres compliqués á des variables faciles à mesurer en routine sur le terrain pour rendre nos résultats applicables.

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

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X ;

Judith BURSTIN : https://orcid.org/0000-0002-4125-3499 ;

Delphine MOREAU : https://orcid.org/0000-0003-2640-9931.

Contributions des auteurs

NC : conceptualisation, simulations, analyses de données, rédaction. DM et JB : conseils, rédaction.

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

Ce projet a été financé par INRAE, les projets français ANR PPR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008, www6.inrae.fr/specifics/), ANR PPR MoBiDiv (ANR-20-PCA-0006, www6.inrae.fr/mobidiv/), COPRAA (www6.inrae.fr/projet-copraa/) 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, et les projets européens Horizon 2020 Research and innovation programme ReMIX (N 727217) et Horizon Europe IntercropVALUES project (N°101081973).

Références bibliographiques

Annicchiarico P., Nazzicari N., Notario T., *et al*. (2021). Pea Breeding for Intercropping With Cereals: Variation for Competitive Ability and Associated Traits, and Assessment of Phenotypic and Genomic Selection Strategies. *Frontiers in Plant Science, 12*.

Barillot R., Escobar-Gutiérrez A.J., Fournier C., *et al*. (2014). Assessing the effects of architectural variations on light partitioning within virtual wheat-pea mixtures. *Annals of botany, 114 4*, 725-737.

Bedoussac L., & Justes E. (2010a). Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat–winter pea intercrop. *Plant and Soil, 330*, 37-54.

Bedoussac L., & Justes E. (2010b). The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil, 330*, 19-35.

Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., & Stone C.J. (éd.) *Classification and regression trees.* 1984, 254 p.

Colbach N., Adeux G., Cordeau S., & Moreau D. (2023). Weed-induced yield loss through resource competition cannot be sidelined. *Trends in Plant Science*.

Colbach N., Burstin J., & Moreau D. (in revision). Which pea traits for agroecological weed management in pea-wheat intercrops. A simulation study. *Field Crops Research*.

Colbach N., Colas F., Cordeau S., *et al*. (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., *et al*. (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., Felten E., Gée C., *et al*. (2022). Tracking ideal varieties and cropping techniques for agroecological weed management: a simulation-based study on pea. *Frontiers in Plant Science, 13*, 809056 (809023 p).

Colbach N., Flament M., Maillot T., *et al*. (2024). La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides. *Innovations agronomiques*.

Colbach N., Petit S., Chauvel B., *et al*. (2020). Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : analyse critique des méthodes et synthèse des acquis. *Innovations agronomiques, 81*, 1-17.

Corre-Hellou G., Dibet A., Hauggaard-Nielsen H., *et al*. (2011). The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crops Research, 122*, 264-272.

Gaudio N., Escobar-Gutierrez A.J., Casadebaig P., *et al*. (2019). Modeling mixed annual crops: current knowledge and future research avenues. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 39*, 20.

Gronle A., Heß J., & Böhm H. (2015). Effect of intercropping normal-leafed or semi-leafless winter peas and triticale after shallow and deep ploughing on agronomic performance, grain quality and succeeding winter wheat yield. *Field Crops Research, 180*, 80-89.

Gu C., Bastiaans L., Anten N.P.R., *et al*. (2021). Annual intercropping suppresses weeds: A meta-analysis *Agriculture, Ecosystems and Environment, 322*, 107658.

Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., *et al*. (2009). Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N2-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research, 113*, 64-71.

Jacob C.E., Johnson E.N., Dyck M.F., & Willenborg C.J. (2017). Evaluating the competitive ability of semileafless field pea cultivars. *Weed Science, 64*, 137-145.

Jeuffroy M.-H., Casadebaig P., Debaeke P., *et al*. (2014). Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 34*, 121-137.

Kammoun B., Journet E.-P., Justes E., & Bedoussac L. (2021). Cultivar Grain Yield in Durum Wheat-Grain Legume Intercrops Could Be Estimated From Sole Crop Yields and Interspecific Interaction Index. *Frontiers in Plant Science, 12*.

Kiær L.P., Weedon O.D., Bedoussac L., *et al*. (2022). Supply Chain Perspectives on Breeding for Legume–Cereal Intercrops. *Frontiers in Plant Science, 13*.

Laurent L., Ullmann A., & Castel T. (2023). How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France? The case study of winter bread wheat area. *Total Environment Research Themes, 8*, 100079.

Lebreton P., Bedoussac L., Bonnet C., *et al*. (2024). Optimiser les traits et proportions d'espèces ainsi que les motifs de semis pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations bispécifiques de légumineuses et de céréales. *Innovations agronomiques*.

Lemerle D., Smith A., Verbeek B., *et al*. (2006). Incremental crop tolerance to weeds: A measure for selecting competitive ability in Australian wheats. *EUPHYTICA, 149*, 85-95.

Mahé I., Chauvel B., Colbach N., *et al*. (2022). Deciphering field-based evidences for crop allelopathy in weed regulation. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 42*, 50.

Martre P., Quilot-Turion B., Luquet D., *et al*. (éd.) *Model-assisted phenotyping and ideotype design.* 2015, 349-373 p.

Moreau D., Mahé I., Chauvel B., *et al*. (2024). Le rôle de l'allélopathie dans la régulation des adventices : entre rêve et réalité. *Innovations agronomiques*.

Oerke E.-C. (2006). Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science, 144*, 31-43

Pelzer E., Bazot M., Makowski D., *et al*. (2012). Pea–wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy, 40*, 39-53.

Poggio S.L. (2005). Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agriculture Ecosystems & Environment, 109*, 48-58.

Tardieu F. (2003). Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Plant Science, 8*, 9-14.

Verret V., Gardarin A., Pelzer E., *et al*. (2017). Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Research, 204*, 158-168.

Weisberger D., Nichols V., & Liebman M. (2019). Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLOS ONE, 14*, e0219847.

Worthington M., & Reberg-Horton C. (2013). Breeding Cereal Crops for Enhanced Weed Suppression: Optimizing Allelopathy and Competitive Ability. *Journal of Chemical Ecology, 39*, 213-231.

Zerner M.C., Rebetzke G.J., & Gill G.S. (2016). Genotypic stability of weed competitive ability for bread wheat (*Triticum aestivum*) genotypes in multiple environments. *Crop and Pasture Science, 67*, 695-702.

Pour citer cet article : Nathalie Colbach, Judith Burstin, Delphine Moreau. Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : Exemple du pois associé au blé. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.60-73. 10.17180/ciag-2025-vol101-art06

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

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

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

Motifs de semis, traits et proportions d'espèces pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations légumineuse-céréale

Pierre LEBRETON[1], Aurélie BAQUET[1], Laurent BEDOUSSAC[2], Catherine BONNET[3, 4], Etienne-Pascal JOURNET[3], Éric JUSTES[3,5], Nathalie COLBACH[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

[2] AGIR, Univ Toulouse, ENSFEA, INRAE, Castanet-Tolosan, France

[3] AGIR, Univ Toulouse, INRAE, Castanet-Tolosan, France

[4] adresse actuelle : DYNAFOR, Univ Toulouse, INRAE, Castanet-Tolosan, France

[5] adresse actuelle : CIRAD, Département Persyst, Montpellier, France

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art07

Résumé

L'objectif de cette étude était d'évaluer par simulation avec le modèle FLORSYS, paramétré et évalué préalablement, les effets, en l'absence de stress azoté ou hydrique, d'associations bispécifiques légumineuse–céréale sur la dynamique des adventices et la production des cultures. Sept proportions d'espèces, neuf motifs spatiaux de semis et quatre mélanges (triticale–féverole, blé–féverole, blé–pois, orge–pois) ont été comparés aux cultures pures. 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 et minimisent les pertes 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.

Mots-clés : Association, adventice, modèle, perte de rendement, motifs de semis, densité de semis, agroécologie

Abstract: Optimizing species traits and proportions and sowing patterns for agroecological weed management in legume-cereal intercrops

The aim of this study was to evaluate by simulation with the previously parameterized and evaluated FLORSYS model, the effects of bispecific legume-cereal intercrops on weed dynamics and crop production, in the absence of nitrogen or water stress. 7 species proportions, 9 spatial sowing patterns and 4 species mixtures (triticale–faba bean, wheat–faba bean, wheat–pea, barley–pea) were compared to their corresponding pure crop controls. Simulations showed that (1) barley–pea and triticale–faba bean mixtures provide the best weed control, (2) sowing patterns alternating one cereal row with one legume row and species proportions with two-thirds cereals maximize yields and minimize yield losses due to weeds, (3) weed biomass in intercrops is greater than or equal to that in pure cereals and less than that in pure legumes, and (4) intercropping is mostly beneficial for legumes thanks to the weed suppression by the more competitive cereals.

Keywords: Intercrop, weed, model, yield loss, sowing pattern, sowing density, agroecology

1. Introduction

Pour des raisons environnementales et sanitaires, l'utilisation des herbicides, qui sont des solutions techniques très efficaces, faciles à utiliser et peu chères en comparaison de leur efficacité, doit être réduite. Pour cela, nous avons besoin de nouvelles stratégies de gestion des adventices combinant différentes techniques culturales à l'efficacité partielle. Parmi ces techniques, la diversification des cultures et, notamment, les associations d'espèces, apparaît comme une piste intéressante grâce à de nombreux avantages en termes de rendement (Kiær *et al.*, 2009; Bedoussac *et al.*, 2015; Raseduzzaman & Jensen, 2017), d'efficacité d'utilisation des ressources (Pelzer *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2020) et de contrôle des adventices (Verret *et al.*, 2017; Gu *et al.*, 2021).

L'objectif de notre étude était d'analyser l'effet des associations bispécifiques légumineuse–céréale (intégrant différentes proportions et motifs de semis) sur la dynamique des adventices et la production par rapport aux cultures pures respectives. Afin de pallier les limitations des expérimentations au champ, entre autres pour l'évaluation des pertes de rendement liées aux adventices sur le long terme (Colbach *et al.*, 2020), le modèle FLORSYS (Colbach *et al.*, 2019; Colbach *et al.*, 2021) a été utilisé. C'est actuellement le modèle le plus complet pour évaluer l'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité. Il a été paramétré et évalué préalablement avec des travaux entrepris depuis deux décennies. À partir de deux jeux de données issus d'essais de systèmes de culture, nous avons cherché à identifier les combinaisons d'espèces ainsi que les proportions de semis et les motifs permettant d'obtenir, relativement aux cultures en pur, les meilleures performances en termes de productivité et de gestion des adventices.

2. Matériel et méthodes

2.1. Le plan de simulation

Cette étude a simulé deux plans expérimentaux (voir les détails dans Lebreton *et al.*, 2024). Le plan d'expérience « proportions d'espèces » a testé sept possibilités pour les associations orge (*Hordeum vulgare* L.)–pois (*Pisum sativum* L.) et blé tendre (*Triticum aestivum* L.)–féverole (*Vicia faba* L.) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Cette dernière est semée en rangs alternés avec respectivement trois rangs de blé pour un rang de féverole, alors que dans la première association, les deux espèces sont mélangées sur le rang.

Tableau 1 : Les proportions de densités de semis des légumineuses (L) et céréales (C) testées dans les associations du dispositif « proportions d'espèces » simulé avec FLORSYS. Les densités de semis des cultures en pur étaient 36, 90, 210 et 360 semences/m² pour la féverole, le pois, l'orge et le blé, respectivement.

Dispositif d'association	Densité de semis relative			Label
	Total	Céréale	Légumineuses	
Additif	133%	100%	33%	100C33L
	150%	100%	50%	100C50L
	150%	50%	100%	50C100L
	133%	33%	100%	33C100L
Substitutif	100%	33%	67%	33C67L
	100%	50%	50%	50C50L
	100%	67%	33%	67C33L

Le plan d'expérience « motifs de semis » a comparé huit motifs pour les associations triticale (*Triticosecale*)–féverole, blé–féverole et blé–pois, comparant différentes proportions de rangs de céréales et légumineuses (**Figure 1**). Dans ce plan d'expérience, la densité de semis de chaque espèce en association est égale à 50% de celle en culture pure si bien que la densité de chaque espèce sur le rang varie en fonction du motif de semis (plus le nombre de rang d'une culture augmente, plus sa densité sur le rang diminue). Dans les deux plans d'expérience, l'inter-rang reste le même quels que soient les proportions de semis et les motifs testés (15 cm entre les rangs).

Pour les deux plans d'expérience, les associations ont été comparées aux cultures pures correspondantes (témoins). Les associations et les témoins ont été insérés dans des rotations de quatre ans (plan « proportions d'espèces ») ou six ans (plan « motifs de semis »). Les systèmes de culture résultants ont été simulés sur 30 ans et répétés avec 10 scénarios climatiques de Toulouse (sud-ouest de la France). Chaque scénario a été simulé, soit sans adventice pour estimer le rendement potentiel, soit avec une flore adventice à haute densité typique de la région. Le plan « proportions d'espèces » a été conduit selon le cahier des charges de l'agriculture biologique et le plan « motifs de semis » en conventionnel, avec une utilisation réduite d'herbicides. En effet, les deux plans étaient inspirés d'essais réalisés sur le terrain, et ces modes de conduite ont été gardés pour ne pas mettre en cause la cohérence générale des rotations et techniques culturales des systèmes testés.

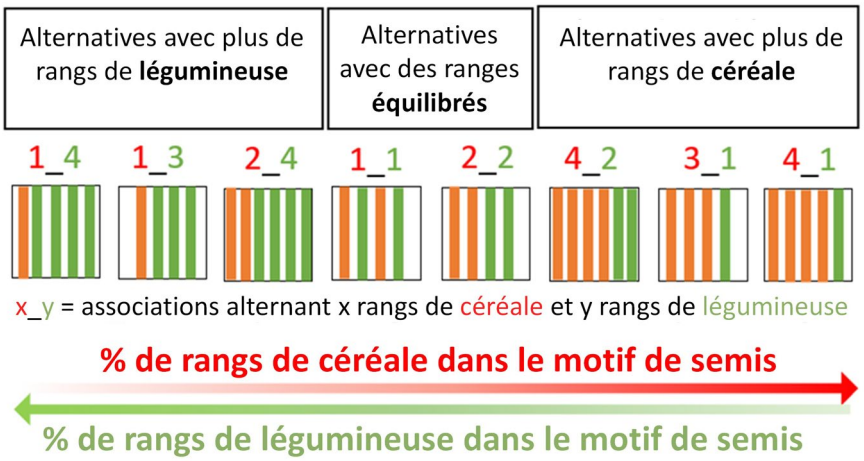


Figure 1 : Les motifs de semis testé pour les associations légumineuse–céréale dans les simulations avec FLORSYS, avec les ranges de légumineuse en vert et celles de céréale en orange. Les densités de semis et interrangs sont les mêmes dans tous les dispositifs. Les densités sur le rang d'une espèce diminuent donc lorsque la proportion de rangs augmente dans le mélange.

2.2. Le modèle FLORSYS

FLORSYS (Colbach *et al.*, 2019; Colbach *et al.*, 2021; Perthame *et al.*, 2024) est un champ virtuel sur lequel des systèmes de culture peuvent être testés avec une large gamme de variables d'état de la culture, des adventices et de l'environnement. Le modèle est actuellement paramétré pour 32 espèces d'adventices annuelles fréquentes et contrastées et 33 espèces cultivées. Les variables d'entrée de FLORSYS consistent en (1) une description du champ simulé, avec le climat journalier, la latitude et les caractéristiques du sol ; (2) toutes les cultures et opérations de gestion, avec les dates et les outils utilisés ; et (3) le stock semencier d'adventices dans le sol au début de la simulation. Ces variables influencent le cycle de vie annuel des adventices et des cultures (semences viables, dormantes, germées, en croissance pré-levée, plantes à différents stades, biomasse, etc.) et les processus impliqués (photosynthèse, respiration, croissance, réponse à l'ombre), avec un pas de temps journalier. Les processus du cycle de vie des adventices et cultures dépendent des dates, des options et des outils de gestion utilisés, en interaction avec les états des cultures, des adventices et du sol.

3. Résultats

3.1. Les associations contrôlent mieux les adventices

L'infestation du champ par la biomasse adventice des cultures pures (barres non hachurées dans la Figure 2) peut être utilisée pour classer les espèces en fonction de leur compétitivité face aux adventices. Triticale et orge sont les cultures les plus compétitrices (avec l'infestation adventice la plus faible), suivies du blé. La féverole et le pois sont les espèces les moins compétitrices, ce qui est bien connu par les praticiens. En d'autres termes, les céréales sont plus compétitrices que les légumineuses vis-à-vis des adventices.

La biomasse adventice est plus élevée ou similaire dans les associations que dans les céréales pures correspondantes, alors que les associations sont moins infestées que les légumineuses pures. L'association semble donc « protéger » les légumineuses grâce à la compétition exercée par la céréale associée sur les adventices. L'association triticale–féverole est celle qui a réduit le plus l'infestation comparée à la légumineuse (réduction de 15% contre seulement 8% pour les autres associations).

Les conclusions sont les mêmes en faisant l'analyse des pertes de rendement dues aux adventices (résultats non montrés). Les pertes des céréales dues aux adventices sont les mêmes ou un peu plus élevées en association qu'en céréale pure, alors que les pertes des légumineuses sont nettement plus faibles en association qu'en légumineuse pure.

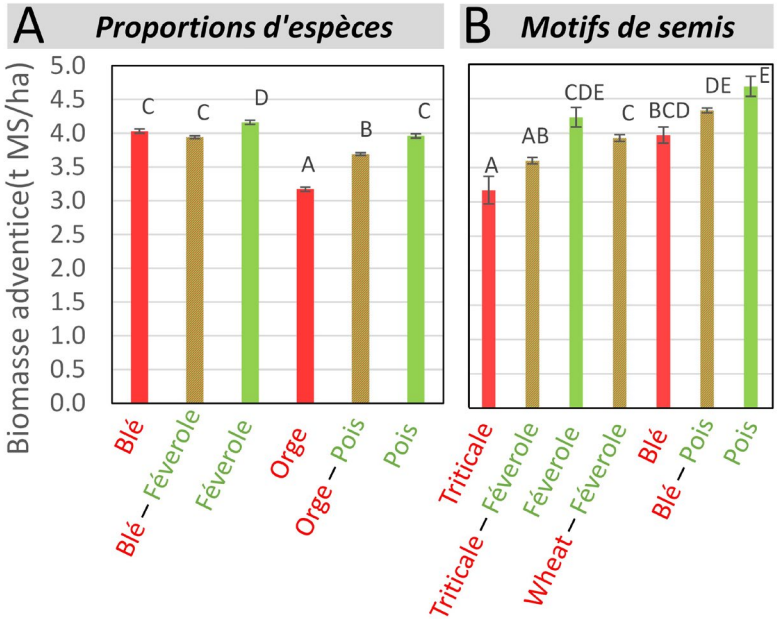


Figure 2 : Biomasse des adventices dans les associations (hachurées) et dans les cultures pures correspondantes, avec les légumineuses en vert et les céréales en rouge, pour les plans « proportions d'espèces » (A) et « motifs de semis » (B). Pour un graphique donné, les barres ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes à p=0,05 (tests de Tukey après analyse de la variance) (tiré de Lebreton *et al.*, 2024).

3.2. Effet des proportions de céréales et légumineuses dans l'association

En l'absence d'adventice, le rendement des céréales (barres rouges dans la Figure 3.A et B) augmente avec la proportion de plantes de céréales dans l'association, alors que le rendement des légumineuses diminue (barres vertes). L'effet inverse est observé pour l'augmentation de la proportion de plantes de légumineuses. Cependant, les rendements de céréales n'augmentent plus de manière significative au-delà de 67% de plantes de céréales dans l'association et le résultat est similaire pour les légumineuses.

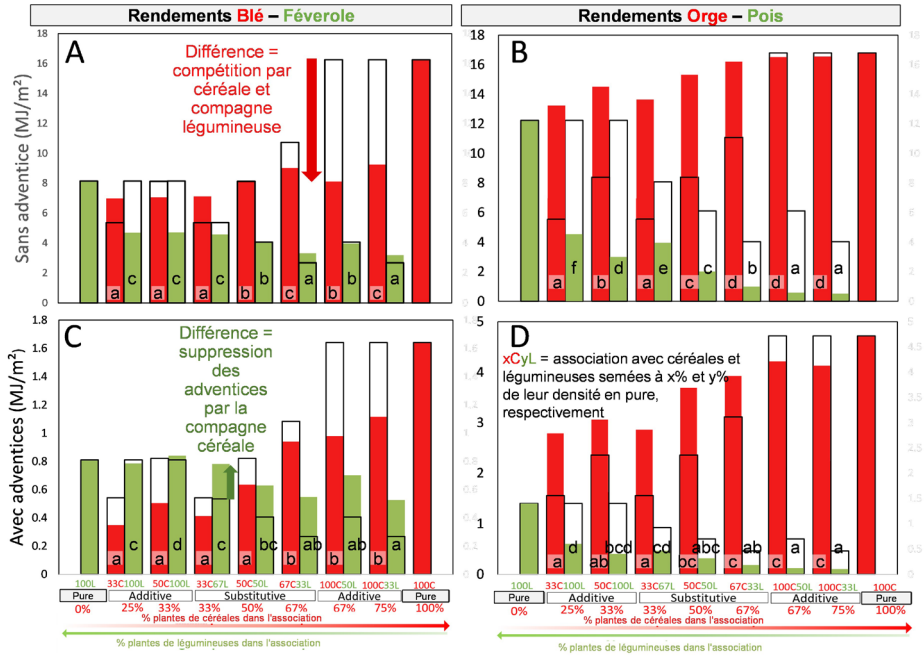


Figure 3 : Effet des proportions d'espèces dans les associations céréales – légumineuses, en présence (A et B) et en l'absence (C et D) d'adventices, sur les rendements des céréales (barres rouges) et des légumineuses (barres vertes). Les barres vides montrent les rendements attendus tenant compte des 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) (tiré de Lebreton *et al.*, 2024).

Dans l'association blé–féverole, les rendements de la céréale dans les associations à forte proportion de céréales sont plus faibles que ceux attendus tenant compte de la densité de semis et du rendement de la céréale pure (barres rouges plus petites que les barres noires vides, Figure 3.A) alors que les rendements de la légumineuse sont ceux attendus en théorie. Ces derniers sont estimés en multipliant le rendement de l'espèce en pur par sa densité relative en association. Les conclusions sont les mêmes pour les associations à forte proportion de légumineuses, à savoir que les rendements sont plus faibles qu'attendus pour la légumineuse et plus élevés qu'attendus pour la céréale. Pour l'association substitutive 50%–50%, les rendements correspondent à ceux attendus en théorie. Comme le blé–féverole est semé selon un motif 3 rangs–1 rang (indépendamment des densités de semis), les fortes densités de céréale ou de légumineuse augmentent tout d'abord la compétition intraspécifique avant de nuire à l'espèce compagne.

La situation est différente pour l'association orge–pois (Figure 3.B) : les rendements de la légumineuse sont toujours bien plus faibles que ceux attendus en fonction des densités de semis relatives alors que c'est le contraire pour la céréale. Il s'agit d'un cas de très forte compétition interspécifique de la céréale dominate sur la légumineuse peu compétitrice, favorisée par le mélange sur le rang des deux espèces. L'ajout des adventices dans les simulations n'y change rien : les rendements de la légumineuse restent plus faibles que ceux attendus pour les différentes densités de semis (Figure 3.D).

Ce n'est pas le cas pour l'association blé–féverole en présence d'adventices (Figure 3.C). Les rendements de la céréale y sont toujours plus faibles que ceux attendus pour les différentes densités de céréales alors que ceux de la légumineuse sont similaires ou plus élevés que ceux attendus en fonction des densités de légumineuses, notamment pour les fortes densités de semis de la céréale. La légumineuse bénéficie ici de la suppression des adventices par la céréale compagne, très compétitrice. L'association substitutive 50%–50% est au final un bon compromis, avec les deuxièmes meilleurs rendements de céréale et de légumineuse, un rendement de céréale proche de celui attendu au regard de sa densité de semis et un rendement de légumineuse bien plus élevé que celui attendu.

3.3. Effets des motifs de l'association : favoriser la compétition envers les adventices aux dépens de celle envers la culture compagne

3.3.1. Préférez des motifs équilibrés

Dans l'association blé–féverole, en l'absence d'adventices, le rendement de la céréale augmente avec la proportion de rangs de céréale tout comme celui de la légumineuse avec la proportion de rangs de légumineuse (**Figure 4**.B). Le motif 3_1 est le même que celui utilisé pour cette association dans le plan « proportions d'espèces ». La conclusion des deux plans expérimentaux est similaire pour ce motif, à savoir des rendements de légumineuse et de céréale proches de ceux attendus au regard des densités de semis dans l'association. En revanche, le rendement de la légumineuse augmente bien plus dans les associations avec une plus forte proportion de rangs de légumineuse. En effet, comme les densités de semis à l'hectare restent inchangées, les densités de légumineuse sur le rang diminuent et la légumineuse souffre alors bien moins de la compétition intra et interspécifique, étant à la fois plus éloignée des autres plantes de légumineuses et des plantes de céréales.

La situation est différente en présence d'adventices où les rendements sont bien plus faibles que ceux attendus au regard des densités de semis, à la fois pour la céréale et la légumineuse dans les associations à forte proportion de rangs de légumineuse (1_4, 1_3, 2_4, **Figure 4**.E). Dans ce cas, la concentration des plantes de céréales sur un petit nombre de rangs amplifie la compétition intra-céréales au lieu de favoriser la compétition vis-à-vis des adventices comme pour les associations à proportions de rangs équitables (1_1, 2_2). *A contrario*, dans les associations dominées par les rangs de céréales (3_2, 3_1, 4_1), le bénéfice de la suppression des adventices par les céréales ne permet pas d'annuler la perte de rendement due à la compétition intra-légumineuse (puisque les plantes de légumineuses sont serrées sur peu de rangs) conduisant à des rendements de légumineuse plus faibles. Globalement, la féverole bénéfice quand même de l'association, alors que le blé est perdant, indiquant une compétition asymétrique.

3.3.2. Attention aux céréales trop compétitrices

La compétition dans l'association triticale–féverole (**Figure 4**.A et D) est également asymétrique, sauf que la céréale est toujours gagnante, à l'exception du motif avec un seul rang de céréale et en présence d'adventices (1_4 dans la **Figure 4**.D). La forte concentration des plantes de triticale sur peu de rangs exacerbe la compétition intra-céréale au dépend de la compétition sur les adventices. De nouveau, les motifs équilibrés (1_1 et 2_2) donnent les meilleurs rendements de céréale et de légumineuse. Le rendement de féverole reste cependant très faible du fait du fort pouvoir de compétition du triticale.

L'association blé–pois favorise moins la céréale alors que le blé est bien plus compétiteur que le pois (cf. § 3.1). En l'absence d'adventice, le blé est toujours gagnant, avec des rendements élevés et supérieurs à ceux attendus au regard de sa densité de semis dans l'association (**Figure 4**.C), mais c'est le cas aussi dans l'association avec la féverole (**Figure 4**.B). Le rendement de pois est toujours plus faible que celui attendu au regard de sa densité de semis (**Figure 4**.C), ne profitant pas autant, comme pour la féverole, des motifs dominés par les rangs de légumineuse (**Figure 4**.B). Par contre, en présence d'adventices, à la fois le blé et le pois sont gagnants dans les motifs équilibrés (1_1 et 2_2, **Figure 4**.F).

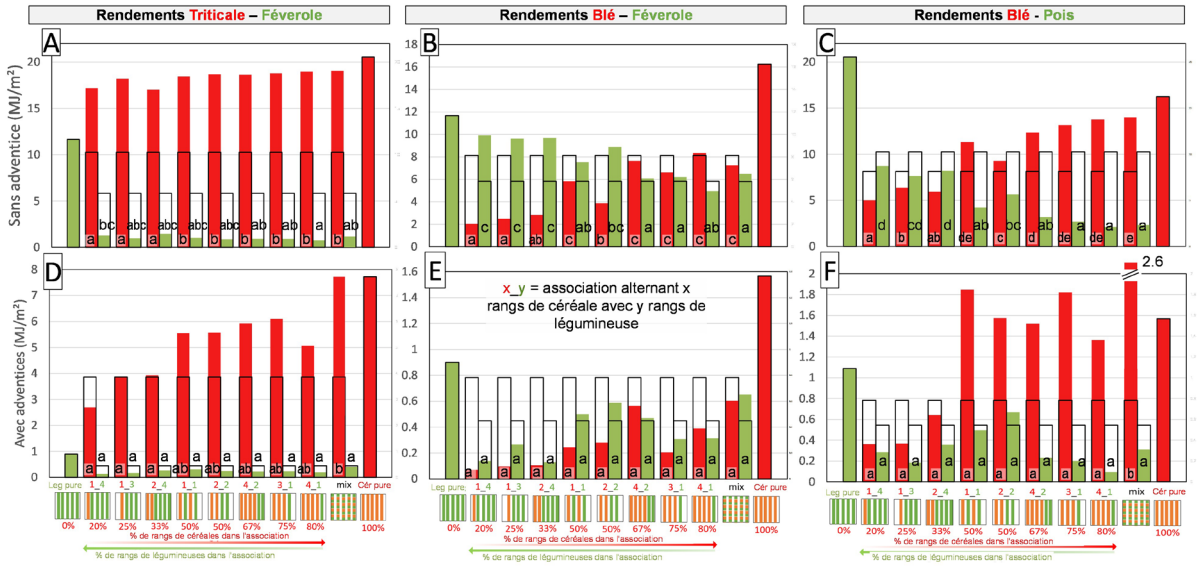


Figure 4 : Effet des motifs de semis des associations céréales–légumineuses (mélange substitutif 50%–50 %) en présence (A-C) et en l'absence (D-F) d'adventices, sur les rendements des céréales (barres rouges) et des légumineuses (barres vertes). Les barres vides montrent les rendements attendus au regard des densités de semis et sont estimés en multipliant les rendements de la culture pure par sa densité de semis relative dans l'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 (tiré de Lebreton *et al.*, 2024).

3.3.3. Éviter les mélanges sur le rang pour les légumineuses peu compétitrices

Si une des cultures du mélange est bien plus compétitrice que l'autre, son rendement dans un mélange sur le rang (motif mix dans la **Figure 4**) est alors plus élevé qu'en rangs séparés, et vice-versa pour la culture la moins compétitrice. Ainsi, le rendement du blé associé au pois est plus élevé en mélange sur le rang que dans tous les semis en rangs séparés (**Figure 4**.C et F), surtout en présence d'adventices. En revanche, les rendements du pois sont les plus faibles dans les mélanges sur le rang, surtout comparés aux motifs en rangs séparés alternant un rang de céréale avec un rang de légumineuse (1_1). Il s'agit là du motif en rangs séparés distribuant les plantes de chaque espèce le plus uniformément dans la parcelle, tout comme le mélange sur le rang. Les mélanges sur le rang maximisent la compétition entre céréale et légumineuse, alors que les associations en rangs séparés favorisent plutôt la compétition des cultures contre les adventices et limitent la compétition entre cultures.

Les tendances sont similaires pour l'association triticale–féverole, avec des rendements de triticale similaires ou plus élevés en mélange sur le rang qu'en rangs séparés (**Figure 4**.A et D). En revanche, les rendements de la féverole, plus compétitrice que le pois, sont moins affectés par le mélange sur le rang que pour le pois. Enfin, dans la dernière association qui mélange la céréale la moins compétitrice (le blé) avec la légumineuse la plus compétitrice (la féverole), les performances des deux cultures sont similaires en mélange sur le rang qu'en rangs séparés (**Figure 4**.B et E).

4. Discussion

4.1. Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité pour comprendre et explorer

Nous avons utilisé le modèle de simulation FLORSYS pour explorer une large gamme de proportions d'espèces et de motifs de semis d'associations céréale–légumineuse et ce, sur plusieurs décennies et

avec différentes séries climatiques, ce qui est impossible sur le terrain. Grâce au plan expérimental virtuel proposé, les simulations ont permis de mieux comprendre les interactions au sein du triptyque céréale–légumineuse–adventice et de distinguer et quantifier les effets liés aux espèces, aux associations (simulations avec cultures associées versus cultures pures toutes choses égales par ailleurs) et aux adventices (simulations avec adventices versus sans adventice toutes choses égales par ailleurs).

Pour autant, il est essentiel de garder à l'esprit que les modèles ne sont qu'une représentation simplifiée de la réalité dont les résultats dépendent de leur qualité de prédiction. Raison pour laquelle, nous avons évalué par le passé le modèle FLORSYS à l'aide d'observations indépendantes de terrain, provenant de différentes régions, sur plusieurs années (Colbach *et al.*, 2016; Pointurier *et al.*, 2021; Perthame *et al.*, 2024) et sur la base de parcelles suffisamment documentées. Cela a permis de distinguer les erreurs dues au modèle de celles liées aux données de terrain qui sont utilisées en entrées du modèle comme, par exemple, un stock semencier adventice initial inconnu ou des dates d'opérations culturales non renseignées.

Cette évaluation a montré que FLORSYS a une capacité de prédiction satisfaisante pour simuler des dynamiques d'adventices et pour comparer des systèmes de culture (ou des espèces) entre eux. Pour autant, les pertes de rendement dues aux adventices montrées ici peuvent paraître excessives. En effet, les simulations ont volontairement débuté avec une forte infestation en adventices pour mieux discriminer par la suite les scenarios testés. De même, contrairement à ce qu'auraient fait des agriculteurs, les pratiques culturales n'ont pas été adaptées au cours de la simulation, que ce soit en fonction de la flore adventice ou des conditions climatiques. En effet, l'objectif était d'évaluer l'effet des pratiques sur les adventices et non l'effet des adventices ou des conditions climatiques sur l'évolution des pratiques. Enfin, toutes les simulations ont été réalisées dans un contexte où l'azote et l'eau ne sont pas limitants après la levée des plantes, si bien que les résultats exposés traduisent uniquement la compétition entre plantes pour la lumière. Bien que ces conditions ne soient pas totalement comparables à des situations réelles, elles se rapprochent des contextes rencontrés dans nombre de systèmes de grande culture conduits en climat tempéré avec l'apport de fertilisants minéraux.

4.2. Des résultats cohérents avec les observations de terrain

Les principales conclusions de notre étude sur le contrôle des adventices rejoignent celles obtenues par différentes méta-analyses (Gu *et al.*, 2021) et revues de la littérature basées sur des données de terrain (Bedoussac *et al.*, 2015). Les simulations permettent d'extrapoler ces observations de terrain, notamment en testant les associations avec différents scénarios climatiques et sur une échelle pluri-annuelle, et de tester une plus grande diversité d'associations, notamment en termes de proportions et de motifs de semis. Les simulations, avec leurs sorties détaillées journalières, permettent aussi de décortiquer plus facilement les interactions culture–culture–adventices responsables des conclusions majeures du terrain et de nos simulations, à savoir : (1) un effet prépondérant du choix des espèces de l'association, (2) un effet faible des motifs de semis, (3) un effet limité des proportions de semis des espèces, (4) un meilleur contrôle des adventices en mélanges additifs, (5) un pouvoir concurrentiel plus fort des céréales que des légumineuses et, (6) un salissement des associations par les adventices proche de celui des céréales pures mais nettement moindre que celui des légumineuses pures. Les associations sont donc un excellent moyen de contrôler les adventices pour les légumineuses, notamment en agriculture biologique ou en situation de fort stock semencier adventice dans le sol.

4.3. Implications pour la gestion au champ

Notre étude ouvre des perspectives opérationnelles dans le choix des proportions de semis des espèces et de motifs de semis selon les objectifs visés et les compromis retenus entre (1) le rendement d'une des deux espèces du mélange (voir exemple du **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), (2) le

rendement total de l'association ou (3) la biomasse d'adventices et les pertes de rendement qui en découlent. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre par exemple les règles permettant de maximiser le rendement de la légumineuse dans les rotations et pédoclimats testés. Des tableaux similaires pourraient être construits pour maximiser la suppression des adventices, le rendement total de l'association ou seulement le rendement de céréale. Cependant, dans la mesure où les simulations actuelles considèrent que l'azote est non-limitant dans la parcelle, le meilleur moyen pour maximiser le rendement de la céréale est de semer uniquement de la céréale.

Tableau 2 : Quelques règles pour optimiser un mélange céréale–légumineuse pour améliorer le rendement de la légumineuse en cas d'infestation par les adventices avec un sol et le climat de la région toulousaine.

Choix	Féverole	Pois	Pourquoi
Céréale associée	Blé		Orge et triticale sont trop compétitrices face à la légumineuse
Densité de légumineuse	≥ 50% de la densité en pur		Pour assurer le potentiel de rendement de la légumineuse
Densité de céréale	~50% de la densité en pur		Si < 50%, pas assez de suppression des adventices ; si > 50% trop de compétition pour la légumineuse
Rangs	Sans importance (rangs séparés si peu ou pas d'adventices)	Rangs séparés	Favoriser la compétition de la céréale face aux adventices (et non à la légumineuse)
Proportion de rangs de légumineuse	1 rang de légumineuse sur 2, ou 2 sur 4		Densité sur le rang identique à la densité en pur, potentiel de rendement de la légumineuse similaire à des proportions de rangs plus élevées et meilleure suppression des adventices par une répartition uniforme des céréales

Nous avons également analysé quelles caractéristiques (traits) et quelles combinaisons de traits des cultures donnaient le meilleur résultat en termes de rendement et de suppression des adventices (Lebreton *et al.*, 2024). Nous avons montré que le rendement d'une espèce dans l'association augmente avec sa surface foliaire spécifique (surface foliaire divisée par la biomasse foliaire) et sa différence de hauteur par rapport à la culture associée (Lebreton *et al.*, 2024). Ceci est cohérent avec des études de terrain sur les associations céréale–légumineuse en milieu tropical (MacLaren *et al.*, 2023). Nous avons aussi montré qu'une réponse à l'ombrage plus importante que pour la culture associée amplifie la complémentarité interspécifique et améliore encore plus le rendement. D'autres traits sont primordiaux en l'absolu, notamment une faible température de base pour germer et lever rapidement et devancer la levée et l'implantation des adventices.

5. Conclusion et perspectives

Ce travail à base de simulations a extrapolé des essais de terrain (en les répétant avec différents scénarios climatiques) et sur une échelle pluri-annuelle, de tester une plus grande diversité d'associations (en termes de proportions et de motifs de semis) et de décortiquer finement les interactions intra- et inter-espèces dans les mélanges céréale–légumineuse–adventices. Cette approche originale a permis de (1) confirmer l'intérêt des cultures associées, tout particulièrement pour les légumineuses, pour réduire le salissement par les adventices et, par conséquent, les pertes de rendement dues à ces dernières et (2) identifier des règles en termes d'espèces, proportions et des motifs de semis pour concevoir des mélanges céréale–légumineuse selon les objectifs visés. Il y a certes un compromis entre rendements de légumineuse et de céréale, mais quitte à avoir de la compétition interspécifique, autant avoir des graines de blé produites plutôt que des adventices dans son champ de légumineuses.

Par la suite, ce travail sera étendu à d'autres associations (espèces, variétés) et d'autres modes de gestion pour intégrer plus finement les pratiques des agriculteurs mais aussi prendre en compte des contextes où l'eau et l'azote sont limitants. Ces travaux pourront ainsi servir à la conception de

systèmes de culture innovants en intégrant, entre autres, la résilience des systèmes conçus face aux changements climatiques et ce, dans une approche agroécologique de la gestion des adventices.

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

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X ;

Eric JUSTES : https://orcid.org/0000-0001-7390-7058.

Contributions des auteurs

Simulations : PL, données de terrain : CB, analyses statistiques : PL, conceptualisation, méthodologie : NC, LB, EJ, financement : NC, EJ, rédaction : tous.

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

Ce projet a été soutenu par l'INRAE, les projets français ANR PPR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008, www6.inrae.fr/specifics/), ANR PPR MoBiDiv (ANR-20-PCA-0006, www6.inrae.fr/mobidiv/) et COPRAA financé l'Office Français de la Biodiversité ainsi que les programmes de recherche et d'innovation Horizon 2020 Remix (N 727217) et Horizon Europe IntercropVALUES (N°101081973) de l'Union Européenne.

Références bibliographiques

Bedoussac L., Journet E. P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E., Prieur L., Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. Agronomy for Sustainable Development 35, 911-935, 10.1007/s13593-014-0277-7.

Colbach N., Bertrand M., Busset H., Colas F., Dugué F., Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N. M., Noilhan C., Strbik F., Gardarin A., 2016. Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. Environmental Modelling & Software 86, 184-203, http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.020.

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, https://agronomie.asso.fr/aes-9-2-14.

Colbach N., Petit S., Chauvel B., Deytieux V., Lechenet M., Munier-Jolain N. M., Cordeau S., 2020. Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : analyse critique des méthodes et synthèse des acquis. *Innovations agronomiques* 81, 1-17, https://doi.org/10.15454/bpst-th82.

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, https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006.

Gu C., Bastiaans L., Anten N. P. R., Makowski D., van der Werf W., 2021. Annual intercropping suppresses weeds: A meta-analysis Agriculture, Ecosystems and Environment 322, 107658, https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107658.

Kiær L. P., Skovgaard I. M., Østergård H., 2009. Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials. Field Crops Research 114, 361-373, 10.1016/j.fcr.2009.09.006.

Lebreton P., Bedoussac L., Bonnet C., Journet E.-P., Justes E., Colbach N., 2024. Optimal species proportions, traits and sowing patterns for agroecological weed management in legume-cereal intercrops. European Journal of Agronomy 159, 127266in press, https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127266.

MacLaren C., Waswa W., Aliyu K. T., Claessens L., Mead A., Schöb C., Vanlauwe B., Storkey J., 2023. Predicting intercrop competition, facilitation, and productivity from simple functional traits. Field Crops Research 297, 108926, https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108926.

Pelzer E., Hombert N., Jeuffroy M. H., Makowski D., 2014. Meta-analysis of the effect of nitrogen fertilization on annual cereal-legume intercrop production. Agronomy Journal 106, 1775-1786, 10.2134/agronj13.0590.

Perthame L., Petit S., Colbach N., 2024. La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture. *Innovations agronomiques*

Pointurier O., Moreau D., Pagès, L., Caneill, J., Colbach, N., 2021. Individual-based 3D modelling of root systems in heterogeneous plant canopies at the multiannual scale. Case study with a weed dynamics model. Ecological Modelling 440, 109376, https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109376.

Raseduzzaman, M., Jensen, E. S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production ? A meta-analysis. European Journal of Agronomy 91, 25-33, 10.1016/j.eja.2017.09.009.

Verret, V., Gardarin, A., Pelzer E., Médiène S., Makowski D., Valantin-Morison M., 2017. Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. Field Crops Research 204, 158-168, https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.010.

Xu Z., Li C. J., Zhang C. C., Yu Y., van der Werf W., Zhang, F. S., 2020. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis. Field Crops Research 246, 10.1016/j.fcr.2019.107661.

Pour citer cet article : Pierre Lebreton, Aurélie Baquet, Laurent Bedoussac, Catherine Bonnet, Etienne-Pascal Journet, *et al*.. Motifs de semis, traits et proportions d'espèces pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations légumineuse-céréale. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.74-84. 10.17180/ciag-2025-vol101-art07

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

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

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

Effet de l'écimage des adventices sur leurs nuisibilités

Stéphane CORDEAU[1], Bastien BOQUET[2], Philippe CHAMOY[3], Annick MATEJICEK[1], Brice MOSA[3], Bertrand OMON[4], Violaine DEYTIEUX[3]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro Dijon, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

[2] Agrotransfert Ressources et Territoires, Estrées Mons, France

[3] INRAE, U2E, Unité Expérimentale du domaine d'Epoisses, F-21110 Bretenière, France

[4] Chambre d'Agriculture de l'Eure, CS 80882, 27008 Évreux, France

Correspondance : stephane.cordeau@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art08

Résumé

L'écimage est une technique curative qui consiste à couper les parties aériennes hautes des adventices après floraison et avant grenaison, limitant ainsi le retour au stock semencier de graines viables et limiter la gêne ou les impuretés à la récolte. L'efficacité de l'écimage, son effet sur la compétition entre culture et adventice ainsi que son incidence sur le stock des semences sont peu documentés. Pourtant ces informations sont essentielles, notamment dans la gestion des adventices. 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. En 2022, des essais sur 9 parcelles de blé ont comptabilisé 80 770 graines de vulpins, dont 12 242 ont été testées pour leur viabilité. En moyenne, 40 % des graines sont écimées, ce taux augmentant de 35 % à 55 % entre le 20/05 et le 15/06. Un écimage parfait pourrait atteindre 60 %, voire 70 %. La viabilité des graines écimées est de 11,2 % en moyenne, augmentant avec la date d'écimage, mais non influencée par la hauteur de l'épi. Un écimage agressif affectant le feuillage impacte peu le rendement du blé.

Mots-clés : stock semencier, viabilité, grenaison, vulpin des champs, ray-grass, alternatives aux herbicides

Abstract: Effect of weed trimmer on multiple weed harmfulnesses

Weed trimmer is a weeding tool targeting towering weeds which consists of cutting off the upper aerial parts of weeds located above crop canopy after weed flowering and before weed seed set, thus limiting the return of viable weed seeds to the soil seedbank and improving harvest quality. The efficacy of weed trimmer, its effect on crop:weed competition at late stage, and its impact on the seedbank are poorly documented. Weed trimmer is effective when it prevents a majority of viable weed seeds from entering the seed bank, but its efficacy depends on the date and height of application. In 2022, field experiments were setup on 9 wheat plots recorded 80,770 *Alopecurus myosuroides* weed seeds, including 12,242 were tested for viability. On average, 40% of seeds are clipped by a weed trimmer, a rate increasing from 35% to 55% between a May 20 and June 15 implementation. From 60% to 70% of weed seeds are clipped if the weed trimmer is capable of clipping all weed seeds above the crop canopy. The viability of clipped seeds averaged 11.2 %, increasing with the implementation date, but not influenced by the position of the seeds along the ear. Aggressive weed trimmer affecting crop foliage clipped more weed seeds and has no impact on wheat yield.

Keywords: soil seedbank, viability, seed shedding, *Alopecurus myosuroides*, *Lolium* sp., alternatives to herbicide

1. Introduction

La gestion des adventices est nécessaire de manière à préserver le potentiel de production d'une parcelle agricole. Sans gestion, les adventices sont responsables d'une diversité de formes de nuisibilité selon les espèces et leur abondance dans la parcelle (Cordeau *et al*., 2018; Colbach *et al*., 2020). La nuisibilité des adventices se définit comme la gêne que ces plantes occasionnent à la culture dans laquelle elle se développe, et aux activités agricoles. On distingue dans la littérature scientifique française (Caussanel, 1989) trois grands types de nuisibilité : (i) la nuisibilité primaire directe, quand les plantes adventices concurrencent pour la croissance la culture par compétition ou qu'elles réduisent son développement par allélopathie ; (ii) la nuisibilité primaire indirecte, quand les plantes adventices diminuent l'état sanitaire (la plante adventice étant réservoir ou hôte de divers parasites), en augmentant le coût des travaux culturaux ou en diminuant la qualité des récoltes (présence de morceaux de plantes ou de semences dans les semences récoltées), etc… ; (iii) la nuisibilité secondaire qu'elle soit au niveau de la parcelle ou du territoire, quand les plantes adventices grainent et réalimentent le stock semencier du sol. Dans la littérature anglophone on parle de nuisibilité directe (celle de l'année) et indirecte (celle générée pour les années suivantes) (Cordeau *et al*., 2018).

Afin de limiter les nuisibilités causées par les adventices, une gestion est nécessaire. La diversité et l'efficacité des substances actives herbicides développées depuis le milieu du XX^{e} siècle ont favorisé la simplification de la gestion des adventices, aujourd'hui principalement axée sur la lutte chimique. Cependant, le recours systématique aux herbicides dans des systèmes de culture simplifiés a entraîné une pollution de l'environnement, une perte de biodiversité, des problèmes de santé humaine et la sélection de résistances (Stoate *et al*., 2009). Le nombre de substances actives herbicides homologuées n'a fait que baisser au cours des décennies passées (Gasquez *et al*., 2013; Chauvel *et al*., 2022), et l'homologation de nombreuses substances actives pourrait ne pas être renouvelée au niveau européen au cours de la prochaine décennie. Il est donc nécessaire de diversifier les leviers de gestion mobilisés, potentiellement en redéfinissant les objectifs du désherbage, les seuils d'acceptation et surtout les périodes d'intervention, les stades des adventices et la palette des outils mobilisables.

La gestion intégrée des adventices a pour objectif de gérer les communautés adventices afin de limiter leurs nuisibilités en mettant en œuvre une diversité de levier de gestion de manière à limiter la dépendance à l'une d'entre elles (Swanton et Weise, 1991; Munier-Jolain *et al*., 2008). Elle propose ainsi de diversifier les périodes d'intervention, que ce soit à l'échelle du système de culture en diversifiant la rotation par des cultures ou des couverts, ou à l'échelle de la campagne culturale en mettant en œuvre des méthodes préventives (déstockage, faux semis, décalage de la date de semis) et curatives (désherbage mécanique ou mixte, écimage). Elle repose sur des combinaisons de techniques visant (i) à réduire le potentiel d'infestation, (ii) à esquiver les périodes de levée préférentielles des espèces présentes, (iii) à détruire les plantules levées au cours du cycle cultural, notamment par le désherbage mécanique, (iv) à limiter la croissance des adventices, d'une part pour réduire la compétition vis-à-vis de la culture et donc les pertes de rendement (nuisibilité primaire directe), d'autre part pour restreindre la production semencière et le réalimentation du stock (nuisibilité secondaire).

Chacune de ces techniques prises individuellement a plus ou moins fait l'objet d'une quantification de son efficacité au champ à travers une diversité de situation de production (Kurstjens et Kropff, 2001; Mischler *et al*., 2007; Munier-Jolain, 2018). En revanche, la littérature sur les effets des techniques mises en œuvre en fin de cycle cultural telles que l'écimage est très rare car ces techniques bien que connues sont encore aujourd'hui assez peu généralisées, et à ce jour restreintes à l'agriculture biologique. Néanmoins, les échecs de désherbage en système conventionnel dus aux résistances aux herbicides, ainsi que la nécessité d'intervenir avec la palette d'outils la plus large possible dans les systèmes à faible usage d'herbicide ou sans herbicides, questionnent à nouveau l'intérêt et le rôle de l'écimage dans la gestion des adventices et de leur nuisibilité sur l'ensemble des systèmes de culture et du contexte de production.

L'écimage est une technique curative qui consiste à couper les parties aériennes hautes des adventices après leur floraison et avant leur grenaison (Figure 1). Son efficacité, son effet sur la compétition culture/adventice de fin de cycle, ainsi que son incidence en termes de limitation du retour au sol des semences viables sont peu connus. Pourtant ces informations sont essentielles, notamment dans la gestion des espèces adventices annuelles (80 % des espèces adventices de la flore des champs cultivés en France, (Jauzein, 1995)) dont la production de graines en fin de cycle est le seul moyen de maintenir ou d'augmenter leur population dans la parcelle, et de se disperser dans le paysage naturellement ou via les outils agricoles.

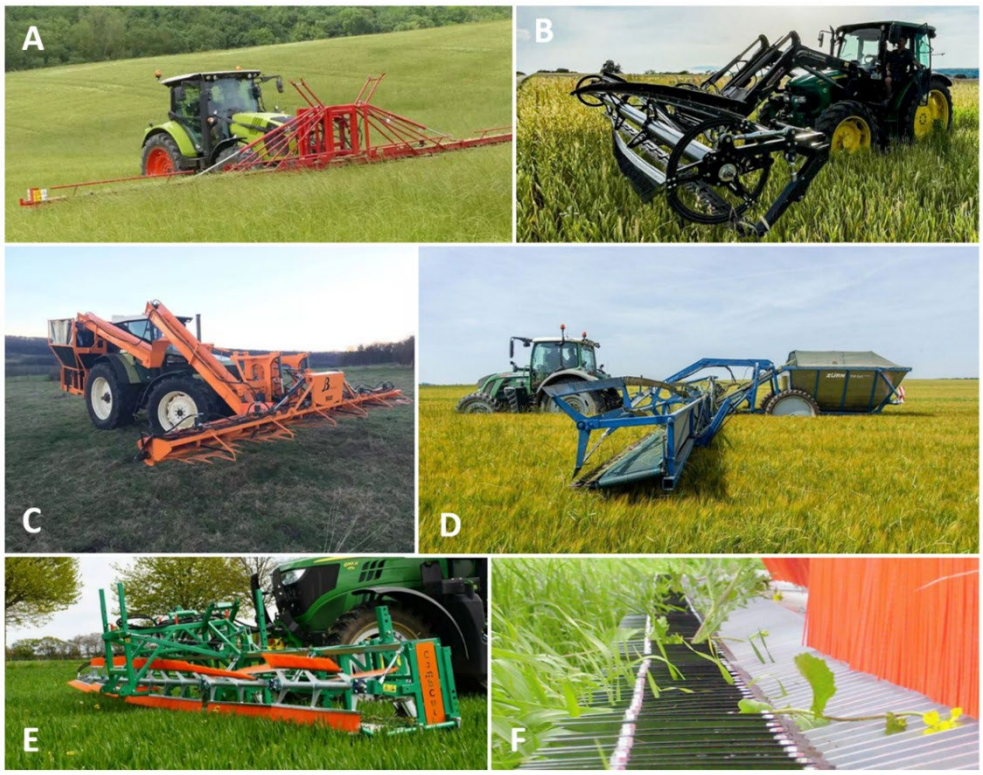


Figure 1 : Ecimeuse par couteaux rotatif sur relevage avant (A, Micheletti, crédit : Meneguzzo, www.meneguzzo.eu) ou à rabatteur et section sur le chargeur frontal (B, Zürn, Crédit : Risag, www.zurnuk.co.uk) ; Export des parties coupées par l'écimeuse portée frontale (C, Bionalan, crédit : Bionalan) ou trainées (D, Zürn, crédit : Willy Deschamps, www.tema-agriculture-terroirs.fr) ; Ecimage sélectif sous la hauteur de la végétation (E et F, CombCut, www.lyckegardgroup.se).

L'objectif de cette étude est de quantifier l'effet de l'écimage sur le vulpin des champs, une adventice annuelle qui graine avant récolte dans les céréales d'hiver en France. Précisément, cette étude vise à quantifier les effets (i) de la hauteur d'écimage : Quelle est la proportion des graines produites qui sont écimées et écimables ? Quelle est leur viabilité ? Est-ce qu'un écimage agressif dans le couvert de la culture visant à écimer plus de graines sans toucher l'épi de la culture a un effet sur le rendement ? (ii) de la date d'écimage : Ecimer tardivement permet-il d'écimer plus ? Sont-elles plus viables ? Ecimer précocement permet-il d'écimer des graines non viables ? Y a-t-il de nouvelles épiaisons post-écimage ?

On émet l'hypothèse que l'écimage est efficace car il évite à une majeure partie des graines adventices d'alimenter le stock semencier. Mais cette efficacité dépend de l'espèce et du stade phénologique des individus. De plus, on émet l'hypothèse que les graines qui sont écimées ne sont pas viables, mais que la part des graines viables augmente avec la date de l'écimage. On émet enfin l'hypothèse que l'écimage joue un rôle principalement sur la limitation de l'alimentation du stock, sans effet majeur sur la compétition adventice/culture de fin de cycle.

2. Matériels et méthodes

L'étude a été menée sur le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) sur un total de 19 parcelles de blé tendre d'hiver en 2021, 2022 et 2023 dans 3 régions de France, Normandie, Picardie et Côte d'Or.

Pour chaque parcelle, 3 répétitions ont été suivies à 3 dates (D1 autour du 20 mai, D2 autour du 1er juin, D3 autour du 15 juin, la récolte se faisant avant le 15 juillet en général). Dans chaque répétition, et pour chaque date, deux placettes de 100 cm² (10 cm x 10 cm) étaient identifiées : l'une écimée avec prélèvement des graines adventices selon 4 horizons (décrits après), l'autre écimée à la hauteur que le ferait un agriculteur (i.e. 5 cm au-dessus de la culture), afin de venir refaire des suivis à une date ultérieure de la reprise en végétation des adventices. Sur chaque placette, les nombres de pied et d'épi d'adventice sont comptés. La hauteur maximum de la culture ($Hcult_{max}$), la hauteur maximum de l'adventice ($Hadv_{max}$), et la hauteur minimum de la base du 1er épi adventice ($Hadv_{min}$) sont aussi mesurées.

Sur la hauteur 4 horizons se distinguent :

- H1 : toutes les graines présentes au-dessus de la hauteur d'écimage « agriculteur » (= au-dessus de 5 cm au-dessus de la culture). H1 sont les graines facilement écimables par un agriculteur ;
- H2 : toutes les graines présentes entre la hauteur max de la culture et 5 cm au-dessus de la culture. H1+ H2 sont les graines écimables sans toucher la culture si l'écimage était optimal ;
- H3 : toutes les graines présentes entre la hauteur de l'épi et la hauteur max de la culture (i.e. avant épiaison). H3 sont les graines supplémentaires qui seraient écimées avec un écimage agressif de la partie végétative de la culture sans toucher sa partie reproductive ;
- H4 : toutes les graines en dessous de la hauteur de l'épi de la culture (= du sol à la hauteur de l'épi). H4 sont les graines non écimables à moins d'endommager la partie reproductive de la culture. H1+H2+H3+H4 sont la production grainière adventice totale.

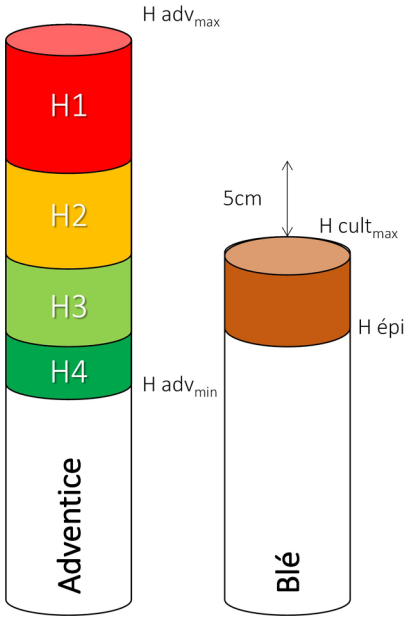


Figure 2 : Différents horizons de hauteur où sont présentes les graines d'adventices selon la hauteur de cette dernière et de la culture.

Les graines prélevées sur chaque horizon de chaque placette (donc à une date, d'une répétition, d'une parcelle, d'une année) sont comptées au compteur à graines. Un total de 50 graines max/échantillon est mis en germination en chambre climatisée (20-25°C 16h jour) après traitement pour lever des dormances au KNO_3 et GA3. Les comptages de graines germées se réalisent durant un mois.

3. Résultats

La pression biotique moyenne des parcelles suivies est assez élevée avec une moyenne de 133 vulpins/m² (soit 836 épis/m²). Chaque pied de vulpin produit en moyenne 420 graines/pied et 97 graines/épi, soit une production grainière moyenne de 93100 graines/m².

3.1. Répartition des graines par horizons plus ou moins écimables

Les résultats montrent qu'en moyenne 40 % des graines sont écimées (H1) et 58 % des graines sont écimables (H1+H2) si on était capable de faire passer l'écimeuse au ras de la canopée de la culture sans toucher son feuillage. Cette proportion augmente avec la date d'écimage (Figure 3).

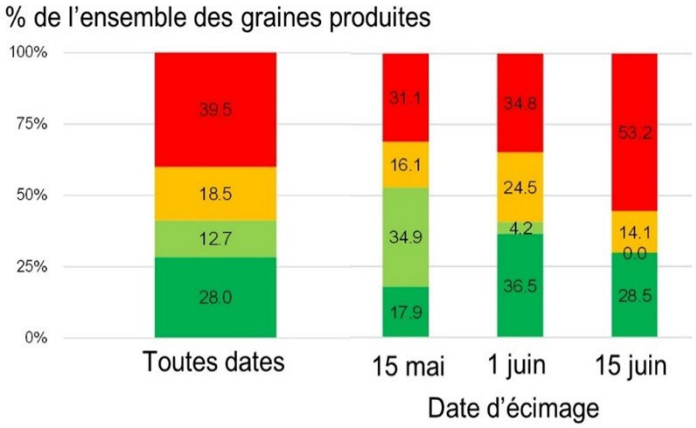


Figure 3 : Répartition de la quantité totale de graines produites par des vulpins des champs selon les 4 horizons H1 (rouge), H2 (orange), H3 (vert clair) et H4 (vert foncé) répartis sur la hauteur relativement à la hauteur min et max des épis de l'adventice et de la hauteur max de la culture (voir Figure 2).

3.2. Viabilité des graines produites

La viabilité des graines de vulpins des champs est faible et inférieure à 40 %. Elle augmente avec la date d'écimage, les graines écimées tardivement et de plus en plus proche de la date de récolte étant plus viables. En revanche, la viabilité ne varie pas sur la hauteur de l'épi (entre les horizons), ce qui indique que les graines écimées (H1) et non écimables (H4) présentent la même viabilité.

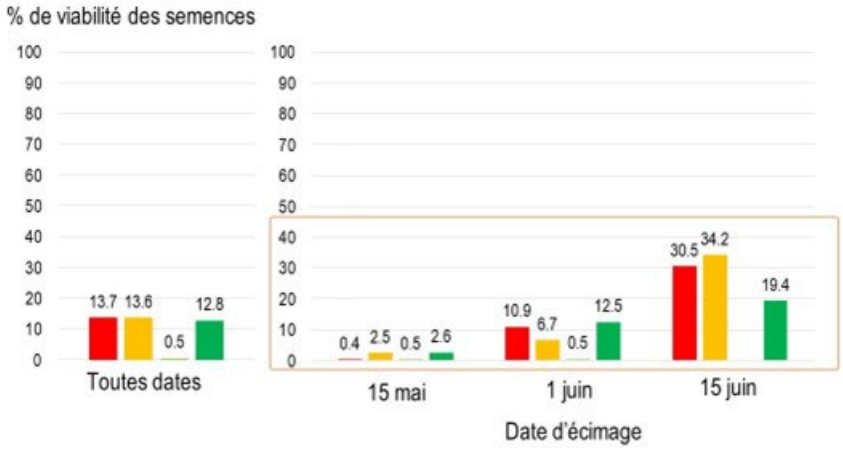


Figure 4 : Pourcentage de viabilité (taux de germination des graines après traitement au KNO3 et à la GA3) des graines produites par des vulpins des champs selon la date de prélèvement et les 4 horizons H1 (rouge), H2 (orange), H3 (vert clair) et H4 (vert foncé) répartis sur la hauteur relativement à la hauteur min et max des épis de l'adventice et de la hauteur max de la culture (voir Figure 2).

Ainsi, on peut avec le nombre de graines prélevées et le taux de viabilité quantifier le nombre de graines viables qui retournent au stock semencier du sol si on n'exporte pas les parties écimées. Autour de 250, 1900 et 10600 graines viables/m² en moyenne retournent au stock, respectivement à la date 1 (15 mai), date 2 (1er juin) et date 3 (15 juin). Ces résultats démontrent que peu de graines viables

retournent au sol à la date 1 et 2, mais qu'un export des graines écimées est nécessaire à la date 3 afin de limiter la nuisibilité secondaire souhaitée par l'action d'écimage.

3.3. Reprise en végétation, nouvelle épiaison ou mortalité post-écimage

Le nombre d'épi de vulpin présent avant écimage varie entre 8 et 10 épis/plante (Figure 5). Entre 4 et 7 épis nouveaux/plante sont observés 1 mois après l'écimage. Cette quantité est légèrement plus importante quand l'écimage est précoce (D1) que tardif (D2 et D3). En revanche, en comptant le nombre de pied de vulpins avant écimage et 1 mois après écimage, on observe de la mortalité, d'autant plus importante que l'écimage est tardif.

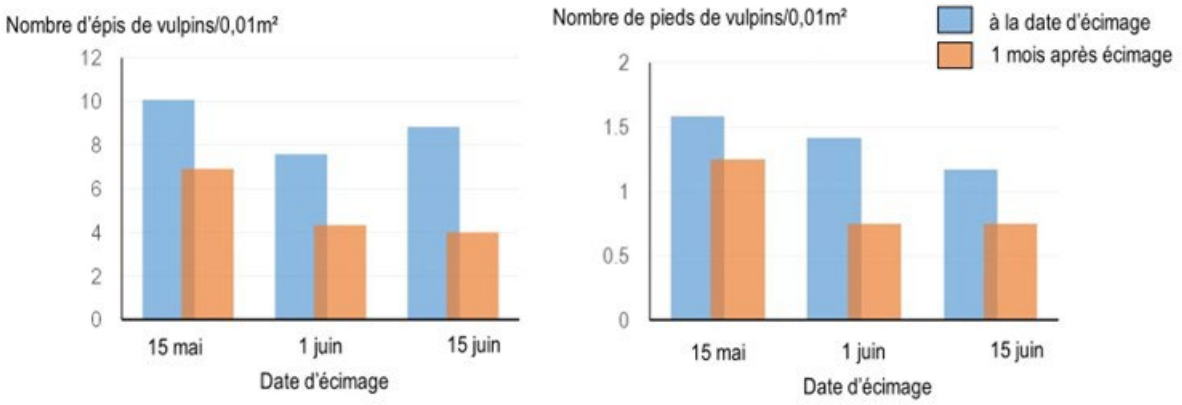


Figure 5 : Nombre d'épis et de pieds de vulpin moyen par placette (0.01m²) avant écimage (bleu) et 1 mois après la date d'écimage (orange).

3.4. Hauteurs relatives des épis adventices et de la culture

Les dates de hauteurs des épis de cultures et adventices augmentent avec la date d'écimage, ce qui est normale car traduisant la croissance des plantes. Ces résultats démontrent néanmoins que tous les vulpins sont écimés à D1 (15 mai) car la hauteur minimale des vulpins est plus élevée que la hauteur de l'épi de culture. Cependant, ce n'est plus le cas à D2 (1er juin) et D3 (15 juin), où seule une partie des épis est écimée. De plus, quand on regarde les hauteurs un mois après écimage, on observe qu'il est impossible de faire deux écimages, car la hauteur max des épis d'adventices est dans le couvert cultivé et sous la hauteur de l'épi de culture, et ce pour les trois dates.

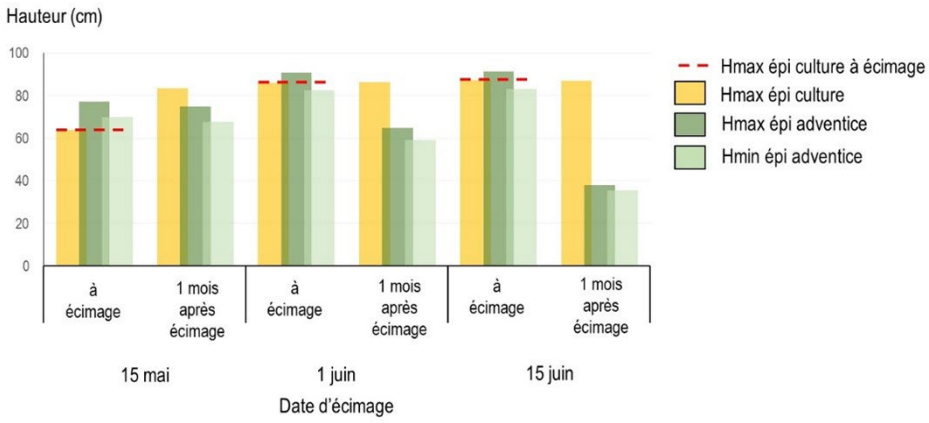


Figure 6 : Hauteurs (cm) minimale et maximale des épis de vulpins et de culture, à la date d'écimage et un mois après.

3.5. Effet d'un écimage agressif sur le rendement

Un écimage agressif permettant d'écimer l'horizon H3 situé au-dessus de l'épi mais dans le couvert de la culture permettrait d'écimer 13 % de graines en plus (Figure 3). En revanche, il écime les dernières feuilles de la culture connue pour être importante pour le rendement et certaines composantes. Un écimage à la première date (15 mai) de l'horizon H3 ne montre pas d'effet sur le rendement ni sur les composantes de rendement en moyenne dans l'essai (Tableau 1).

Tableau 1 : Effet de l'écimage agressif du feuillage de blé sans toucher l'épis de la culture sur le rendement et ses composantes de rendement.

Écimage agressif	Nb d'épis/m²	Nb grain/épi	PMG (g)	Rdt (q/ha) à 0 %H
Non	389.3	109.6	34.5	36.6
Oui	385.2	108.5	34.4	36.0

4. Conclusions

Notre étude a montré que sur des parcelles dont la pression biotique est élevée (130 vulpins/m²), 93000 graines en moyenne sont produites par m², dont 40 % des graines sont écimées (présentes au moins 5 cm au-dessus de la culture). Et 58 % des graines sont écimables si on était capables d'écimer au ras de la canopée de la culture. On estime que 12 % supplémentaire peuvent être écimée par un écimage agressif qui touche le feuillage, sans toucher l'épi de la culture, et ce sans effets sur le rendement et les composantes du rendement. Les écimages tardifs permettent d'écimer plus de graines (53 % au 15 juin) et multiplié par le taux de viabilité qui augmente avec la date, conduit à avoir près de 10000 graines/m² viables en capacité de retourner au stock si elles ne sont pas exportées à l'écimage. Tous les épis de vulpins sont écimés au 15 mai ce qui n'est plus le cas au-delà, mais de nouveaux épis sont produit (près 75 % de la quantité d'épi présent avant écimage), tous se trouvant un mois après dans la canopée de la culture et donc non écimables par un second passage. L'écimage s'avère donc une pratique qui écime un nombre conséquent de graines qui ne sont pas matures si la pratique est précoce en saison, mais qui nécessite un export des graines si elle est mise en œuvre tardivement.

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

Stéphane CORDEAU : https://orcid.org/0000-0003-1069-8388

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les expérimentateurs de l'U2E Domaine INRAE d'Epoisses, les collègues techniciens de UMR Agroécologie, les scientifiques contactés pour les protocoles.

Déclaration de soutien financier

Le projet a été financé par le projet Ecophyto/OFB COPRAA (Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices) et COSTRAA (Conception d'Outils et de STRAtégies de gestion systémique des Adventices). La plateforme CA-SYS sur lesquelles a eu lieu les essais bénéficie de soutien financier des projets ANR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008) et ANR BeCreative (ANR-20-PCPA-0001-04) dans le cadre du programme prioritaire de recherche Cultiver et protéger Autrement (PPR CPA), du projet Européen ADOPT-IPM (HE - 101060430).

Références bibliographiques

Caussanel J.P., 1989. Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. Agronomie 9, 219-240.

Chauvel B., Gauvrit C., Guillemin J.-P., 2022. From sea salt to glyphosate salt: a history of herbicide use in France. Advances in Weed Science 40.

Colbach N., Petit S., Chauvel B., Deytieux V., Lechenet M., Cordeau S., Munier-Jolain N., M, 2020. Relationships between herbicide use intensity, weeds and yield: critical analysis of current methods and results

Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : analyse critique des méthodes et synthèse des acquis. *Innovations agronomiques* 81, 1-17.

Cordeau S., Chauvel B., Guillemin J.-P., 2018. Nuisibilité des plantes adventices : compétition pour les ressources, quantification des pertes de rendement et de qualité des récoltes. In: Chauvel, B., Darmency, H., Munier-Jolain, N., Rodriguez, A., (coord.) (Eds.), Gestion durable de la flore adventice des cultures. Éditions Quæ, Versailles (France), pp. 77-97.

Gasquez J., Guillemin J.-P., Gauvrit C., Chauvel B., 2013. Réduction du nombre de molécules herbicides: conséquences par culture. Problématique particulière de la gestion de la flore adventice. 22e Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, pp. 577-588.

Jauzein P., 1995. Flore des champs cultivés. SOPRA-INRA Ed. 898 pages.

Kurstjens D.A.G., Kropff M.J., 2001. The impact of uprooting and soil-covering on the effectiveness of weed harrowing. Weed Research 41, 211-228.

Mischler P., Lheureux S., Sené O., Dumoulin F., Menu P., 2007. Des parcelles plus propres avec moins d'herbicides grâce à des systèmes de culture intégrés fondés sur l'agronomie. Guide Pratique. Disponible sur: http://www.agro-transfert-rt.org/index.php/fr/component/docman/doc_download/52-des-parcellesplus-propres-avec-moins-dherbicides-guide-12p.

Munier-Jolain N., 2018. Leviers de la protection intégrée en grandes cultures : principes, modes d'action, efficacité. Gestion durable de la flore adventice des cultures. Éditions Quæ, Versailles (France).

Munier-Jolain N., Deytieux V., Guillemin J.-P., Granger S., Gaba S., 2008. Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. *Innovations agronomiques* 3, 75-88.

Stoate C., Baldi A., Beja P., Boatman N., Herzon I., Van Doorn A., De Snoo G., Rakosy L., Ramwell C., 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe–a review. Journal of Environmental Management 91, 22-46.

Swanton C.J., Weise S.F., 1991. Integrated weed management: the rationale and approach. Weed Technology 5, 657-663.

Pour citer cet article : Stéphane Cordeau, Bastien Boquet, Philippe Chamoy, Annick Matejicek, Brice Mosa, *et al*.. Effet de l'écimage des adventices sur leurs nuisibilités. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.85-93. 10.17180/ciag-2025-vol101-art08

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

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

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

Gérer les adventices sans travail du sol ni herbicides n'est pas possible dans les systèmes de grande culture

Nathalie COLBACH[1], Stéphane CORDEAU[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art09

Résumé

L'objectif de cette étude était d'analyser les liens entre réduction de travail du sol, réduction d'usage d'herbicides et risques malherbologiques, grâce à des enquêtes et des simulations avec le modèle FLORSYS. Dans des systèmes de culture définis grâce à des enquêtes chez des agriculteurs (N=395), l'usage d'herbicide augmente quand l'intensité de travail du sol baisse. Les simulations ont montré que supprimer le travail du sol sans autre changement de pratiques double la perte de rendement due aux adventices. Nous avons identifié (1) les 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 techniques culturales pour réduire à la fois le travail du sol, l'utilisation des herbicides et les pertes de rendement. Aucun système sans travail du sol et sans herbicides ne permet de limiter la perte de rendement. Ces travaux de simulation confirment que deux piliers de l'agriculture de conservation des sols (rotations diversifiées, couverture du sol) doivent être respectés pour gérer les adventices dans des systèmes réduisant à la fois le travail du sol et les herbicides.

Mots-clés : Agriculture de conservation des sols, adventice, perte de rendement, biodiversité, simulation

Abstract: Are no-till herbicide-free cropping systems possible? A simulation study

The aim of this study was to investigate the links between reduced tillage, reduced herbicide use and weeds with surveys and simulations with the FLORSYS model. In the 395 cropping systems identified during farm surveys the herbicide treatment frequency index increased when the frequency of tillage decreased. The simulations showed that eliminating tillage without any other change in management practices doubled the yield loss due to weeds. We identified (1) which weed traits increased when tillage was deleted, (2) which cropping systems were robust to tillage deletion, and (3) which management techniques were associated with a reduction in tillage, in herbicides, and in yield loss. No no-till herbicide-free system was able to reduce yield loss. This simulation study confirms that two pillars of Conservation Agriculture (diversified rotations, permanent soil cover) must be respected to manage weeds in systems that reduced both tillage and herbicides.

Keywords: Conservation agriculture, weed, yield loss, biodiversity, simulations

1. Introduction

L'agriculture de conservation des sols (ACS) repose sur trois piliers fondamentaux : une perturbation minimale du sol (seule la perturbation nécessaire à l'introduction des semences des cultures dans le sol est tolérée), une couverture quasi-permanente du sol par des résidus de culture et des plantes de services et une succession diversifiée des cultures dans l'espace et dans le temps (https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/, Reicosky 2015). Initiée par des agriculteurs pour réduire les coûts de production (Hobbs *et al*. 2008) et la dégradation du sol (Sun *et al*. 2015), l'ACS peut

s'accompagner d'une baisse de productivité (Pittelkow *et al*. 2015), d'une plus grande diversité d'adventices (Chauvel *et al*. 2018), d'une plus grande utilisation d'herbicide (Derrouch *et al*. 2020b; Adeux *et al*. 2024) sans quoi l'augmentation des densités adventices génèrerait des pertes de rendements inéluctables (Colbach *et al*. 2020). Or, le contexte de législation nationale et européenne incite à une réduction drastique des pesticides (Kudsk et Mathiassen 2020) et la perspective potentielle de l'interdiction du glyphosate positionne l'ACS telle que définie par la FAO dans une impasse technique (Reboud *et al*. 2017). Le risque d'impasse est d'ailleurs déjà constaté sur le terrain dans les systèmes sans travail du sol qui ne mettent pas en œuvre les deux pilliers essentiels que sont la couverture permanente du sol et la diversification des cultures.

L'objectif de notre étude est d'identifier les déterminants techniques et biologiques permettant d'atteindre le triple objectif de limiter les pertes de rendement dues aux adventices dans des systèmes à forte réduction de travail du sol et d'usage d'herbicide. Pour tenir compte des effets long-terme et limiter les risques de confondre les effets de l'abandon du travail du sol ou des herbicides avec des pratiques compensatoires prises par les agriculteurs (Colbach *et al*. 2020), nous avons fait le choix de combiner des enquêtes en exploitation agricole (pour travailler sur des systèmes agricoles réels) avec des simulations à l'aide d'un modèle mécaniste de dynamique des adventices. Le modèle de simulation utilisé est FLORSYS (Colbach *et al*. 2019; Colbach *et al*. 2021; Colbach *et al*. 2025) qui est à ce jour le plus complet en termes d'effets des techniques de gestion et des adventices (voir Chantre et González-Andújar 2020 pour d'autres exemples de modèles). Nous avons ainsi déterminé (1) les espèces et traits d'adventices qui prédominent quand le travail du sol est supprimé, (2) les systèmes de culture les plus robustes à la suppression du travail du sol en termes d'infestation d'adventices et de perte de rendement qui en résulte, (3) les techniques culturales qui permettent de combiner efficacement une réduction du travail du sol, de l'usage d'herbicides et le niveau de la perte de rendement.

2. Matériels et méthodes

2.1. Les systèmes de culture à évaluer

La première étape a consisté à collecter des données sur des systèmes de culture de diverses régions et situations de production, à partir d'enquêtes en exploitation agricole, de statistiques agricoles, d'expertise régionale etc. (Figure 1). Les 395 systèmes collectés provenaient de 14 territoires de 10 régions en France (et une en Espagne). Ils incluaient à la fois des systèmes conventionnels et biologiques, avec une intensité de travail du sol variant du non-travail du sol permanent au labour annuel. La diversité des cultures allait de la monoculture (généralement de maïs) à des rotations très diversifiées, comprenant des cultures associées et des couverts d'intercultures. Les rotations étaient principalement à base de céréales et colza, avec d'autres oléagineuses, des légumineuses, et des prairies temporaires suivant les régions.

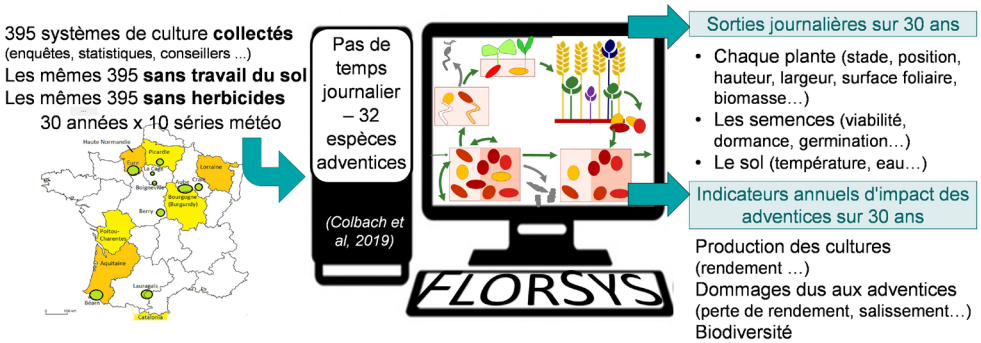


Figure 1 : Expérimenter les pratiques des agriculteurs avec le modèle de simulation mécaniste FlorSys (Colbach et Cordeau 2023)

2.2. Le modèle « parcelle virtuelle » FLORSYS

Les systèmes de culture ont ensuite été simulés à l'aide du modèle FLORSYS qui représente une parcelle expérimentale virtuelle, avec la dynamique journalière des adventices (32 espèces annuelles) et leur impact sur la production des cultures (33 espèces) en fonction des systèmes de culture et du pédoclimat, sur plusieurs années ou décennies (Colbach *et al*. 2019; Colbach *et al*. 2021; Colbach *et al*. 2025). Pour chaque campagne culturale, FLORSYS calcule aussi des indicateurs de production (rendement), de nuisibilité des adventices (perte de rendement, salissement du champ …) et de biodiversité (offre trophique pour pollinisateurs…).

2.3. Le plan de simulation

Trois séries de simulations ont été effectuées : (Série 1) les 395 systèmes de culture avec les pratiques telles qu'enregistrées lors des enquêtes, puis ces mêmes systèmes initiaux auxquels on a retiré toutes les opérations de travail du sol (Série 2) ou tous les herbicides (Série 3) mais, dans les deux cas, sans faire d'autre changement dans les pratiques. Ce dispositif a permis d'estimer les effets du travail du sol et des herbicides sur les adventices sans les effets confondants des modifications des pratiques culturales qui accompagnent normalement ces changements. Ces trois séries de simulation ont été faites avec ou sans adventices dans le stock semencier, permettant ainsi de calculer le rendement potentiel (sans adventice) et le rendement actuel (avec adventices), la différence permettant de calculer la perte de rendement due aux adventices.

2.4. Les analyses statistiques

Seuls les résultats les plus marquants de cette étude sont présentés ici (pour plus de détails, voir Colbach et Cordeau 2022). Des analyses de variance, des régressions linéaires et des comparaisons de moyennes ont été utilisées pour étudier (1) les liens entre usage d'herbicides, travail du sol et autres pratiques culturales et, (2) l'effet de la suppression du travail du sol sur les services (biodiversité) et dysservices (pertes de rendement) de la flore adventice. Ensuite, des arbres de classification et de régression multivariés ont été utilisés pour identifier (3) les leviers influençant le plus la perte de rendement due aux adventices, l'usage d'herbicides et la fréquence de travail du sol puis (4) des combinaisons de ces leviers permettant de minimiser simultanément ces trois facteurs.

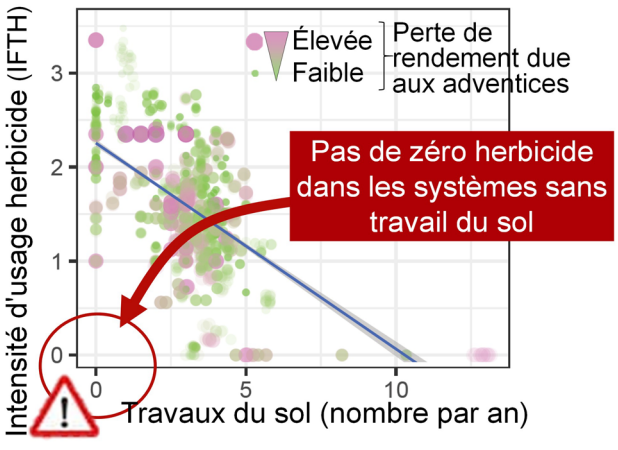


Figure 2 : Intensité d'usage herbicide (indice de fréquence des traitements herbicides, IFTH) en fonction de la fréquence de travail du sol, avec perte de rendement en grains due à la présence des adventices, en moyenne sur la rotation, sur les 395 systèmes de culture collectés dans la pratique agricole (Colbach et Cordeau 2023)

3. Résultats

3.1. Les enquêtes montrent un antagonisme fort entre réduction d'herbicide et de travail du sol

Dans les systèmes de culture enquêtés dans la pratique, le travail du sol (en particulier le labour) est le plus fréquent avant les cultures de printemps (pois, soja, betterave à sucre, tournesol, lin, variant de

3,21 à 4,44 opérations par an). Il est limité devant les associations oléagineuses–légumineuses (1,03) et très rarement pratiqué avant les cultures fourragères. Des tendances similaires sont observées pour l'intensité de l'utilisation des herbicides, l'indice de fréquence des traitements herbicides (IFTH) étant le plus élevé en betterave sucrière (IFTH=2,61) et le plus faible dans les cultures fourragères (IFTH=0,52). Toutes cultures et origines de données confondues, l'usage d'herbicides diminue fortement lorsque le travail du sol devient plus fréquent et aucun système enquêté ne se passe à la fois de travail du sol et d'herbicides (Figure 2).

3.2. Les simulations montrent que supprimer le travail du sol sans changement de système amplifie les effets des adventices

Dans les simulations, lorsque le travail du sol est supprimé des systèmes de culture sans aucune pratique compensatoire, l'infestation des champs (c'est-à-dire la biomasse adventice dans la culture de rente) fait plus que tripler (de 0,51 à 1,8 t·ha^{-1}). La perte de rendement en grains due aux adventices augmente d'environ 75 %, conduisant à une réduction du rendement d'environ un tiers en moyenne sur toutes les cultures (Tableau 1). Le rendement potentiel (en l'absence d'adventices) bouge peu. La suppression des herbicides sans compensation est encore plus néfaste, avec une infestation multipliée par 4 (pour arriver à 2,1 t·ha^{-1} de biomasse adventice). La suppression du travail du sol augmente la contribution des adventices à la biodiversité, notamment l'offre trophique pour les oiseaux ou les pollinisateurs. Ceci signifie que les espèces adventices ont atteint les stades floraison et/ou production de graines, avec un risque d'augmentation du stock semencier et de salissement des cultures futures.

L'augmentation de la nuisibilité des adventices dépend fortement de la fréquence de travail du sol dans les systèmes collectés. Plus le travail est fréquent à l'origine dans les systèmes enquêtés, plus sa suppression se traduit par une forte augmentation de la perte de rendement entre les systèmes sans travail du sol et les systèmes initiaux (environ + 5 % de perte par opération supprimée). En revanche, la corrélation avec la fréquence de labour dans le système d'origine est négligeable (R^2 = 0,003), ce qui indique que la fréquence est plus importante que le type de perturbation pour contrôler les adventices.

Tableau 1 : Effet de la suppression du travail du sol sur la flore adventice et ses impacts.

Indicateurs de production des cultures et impacts des adventices	Variation relative
A. Contribution des adventices à la biodiversité	
Richesse spécifique de la flore	+2 %
Équitabilité de la flore adventice	+40 %
Offre trophique pour oiseaux	+166 %
abeilles	+169 %
B. Rendement des cultures	
En l'absence d'adventices	–2 %
En présence d'adventices	–34 %
C. Nuisibilité des adventices pour la production	
Perte de rendement en grains	+74 %
Contamination des récoltes par des semences/débris adventices	+64 %

Simulations avec le modèle FLORSYS SUR 395 systèmes de culture. Variation quantifiée à l'aide d'analyses de variance

3.3. Les adventices sélectionnées par la suppression du travail du sol

L'impact de la suppression du travail du sol sur les densités d'adventices dépend de l'espèce adventice dans les simulations (Figure 3). Environ la moitié des espèces, comme *Amaranthus retroflexus* (AMARE, amarante réfléchie) ou *Sonchus asper* (SONAS, laiteron rude) voient leurs densités de plantes augmenter dans la majorité des situations (année × système de culture × répétition météo). Six des 30 espèces diminuent dans la majorité des situations (par ex., AVEFA, *Avena fatua, folle avoine*), tandis qu'aucune tendance n'est visible pour les autres.

Les espèces d'adventices ont pu être regroupées en cinq groupes en fonction de leur réaction à la suppression du travail du sol. Par exemple, le groupe A ne comprend que des espèces dont la densité augmente dans la majorité des situations : AMARE, *Chenopodium album* (CHEAL, chénopode blanc), *Digitaria sanguinalis* (DIGSA, digitaire sanguine), *Solanum nigrum* (SOLNI, morelle noire) et SONAS. Ce groupe devient plus abondant après suppression du travail du sol s'il y a initialement un travail du sol estival fréquent et/ou profond, avec peu ou pas d'herbicides à large spectre. Les traits d'espèces les plus sélectionnés par la suppression du travail du sol dans cette situation comprennent une levée en mai et juin et pas de photosynthèse à basse température (< 8-10°C). Ces caractéristiques sont typiques des plantes annuelles d'été.

Quatre autres groupes ont été déterminés. Les espèces du groupe C ont également tendance à augmenter, mais les systèmes de culture et traits d'adventices concernés sont différents du groupe A (Figure 3). Les groupes B et E comprennent à la fois des espèces en augmentation et en diminution après la suppression du travail du sol, tandis que le groupe D est composé d'espèces en diminution.

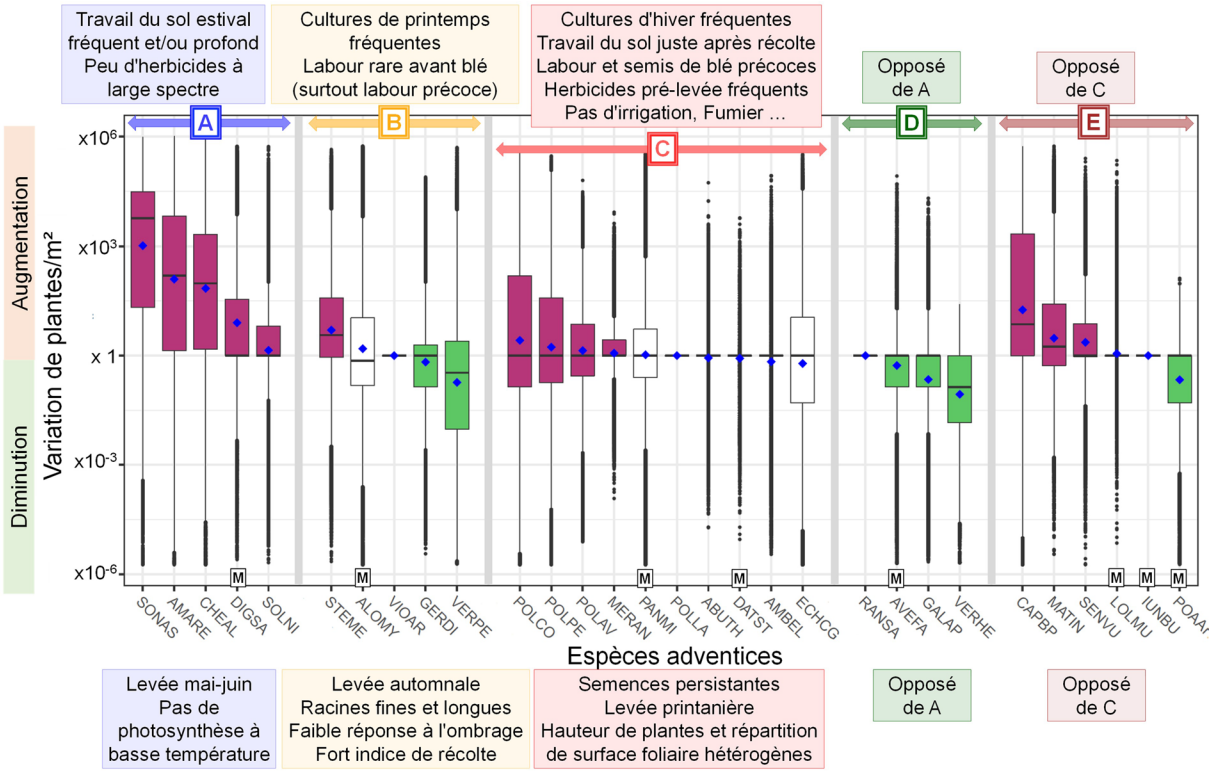


Figure 3 : Variation des densités d'adventices après suppression du travail du sol sans compensation dans 395 systèmes x 30 ans x 10 répétitions météorologiques simulés avec FLORSYS.

Les espèces adventices (code EPPO, https://gd.eppo.int/, avec M indiquant les monocotylédones) sont classées en fonction de la variation décroissante des densités. Les espèces sont classées en groupes, sur la base de leurs traits et de leur réponse à la suppression du travail du sol, en fonction des caractéristiques du système d'origine. Les cases sont colorées en ■ pour les espèces dont la variation

moyenne était significativement > 1, avec une distribution des valeurs biaisée vers des valeurs > 1 (et vice-versa pour les cases colorées en ■) (tiré de Colbach et Cordeau 2023) (détails dans Colbach et Cordeau 2022)

3.4. Les leviers pour à la fois réduire les herbicides, le travail du sol et les adventices

Grâce aux simulations, nous avons identifié une série de leviers permettant de réduire à la fois la perte de rendement, l'usage d'herbicide et la fréquence de travail du sol (Tableau 2). Mais aucun des plus de 1000 systèmes de culture simulés à l'aide de FLORSYS (395 × 3 séries) ne permet de concilier zéro travail du sol avec zéro herbicide sans perte de rendement due aux adventices. La diversification des cultures et la couverture quasi-permanente du sol (que ce soit avec des couverts annuels, pérennes ou des prairies temporaires) sont les leviers les plus efficaces. Toutes ces stratégies visent à rendre l'habitat moins favorable et plus "imprévisible" pour les adventices. Le contrôle non-chimique à l'aide du désherbage mécanique, du broyage et de l'écimage est également crucial, même si le premier levier n'est pas toujours compatible avec une forte réduction du travail du sol qui laisse des résidus en surface. Un meilleur raisonnement de quelques herbicides ou d'opérations de travail permet aussi de réduire la fréquence de ces techniques. Parmi ces ajustements, il y a, sans surprise, des herbicides à plus large spectre et meilleure efficacité mais aussi des traitements plus précoces après le semis ou encore un dernier travail du sol juste avant le semis pour nettoyer la parcelle, à condition que le sol ne soit pas humide pour ne pas déclencher des nouvelles levées adventices (Tableau 3).

Tableau 2 : Processus et risques associés aux leviers-clés (classés du plus au moins influent) pour réduire simultanément la perte de rendement due aux adventices, l'usage d'herbicides et du travail du sol.

Levier	Raisons	Risques
Diversité de cultures et de variétés dans la rotation. Alterner cultures d'hiver et de printemps*	Alterne les conditions favorisant différentes espèces adventices. Diversifie les techniques culturales	Peu de semences et 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	Augmente le contact sol-semences adventices de surface → plus de germination adventice en interculture → moins de semences restantes pour lever en culture	Levée en culture si roulage d'un sol humide juste avant semis
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, peu de jours & matériel disponibles dans certaines régions. Peut endommager la culture. Peut déclencher des germinations adventices en culture
Inter-rang étroit**	Réduit l'espace vide où les adventices peuvent pousser	Désherbage mécanique + difficile
Ne pas irriguer ou irriguer tard après le semis	Réduit la 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)***	Réduit la reproduction des adventices & ↘ réalimentation du stock semencier	Peut endommager la culture. Les semences adventices peuvent déjà être viables

Identification à l'aide d'un arbre de classification et de régression multivariée analysant IFT herbicide, fréquence de travail du sol et perte de rendement simulée avec FLORSYS en fonction des caractéristiques des systèmes de culture (rotation*, semis & récolte**, destruction non-chimique***, autres), à partir de 395 systèmes × 3 séries (standard, sans travail du sol, sans herbicides) × 30 années × 10 répétitions météorologiques.

3.5. Quelle combinaison de leviers pour obtenir le meilleur résultat ?

Certaines de ces pratiques sont déjà bien connues. Les simulations ont permis de les classer en fonction de leur poids et de leur robustesse, d'identifier les raisons de leurs succès et les risques éventuels associés (Tableau 2). Plus important encore, les analyses statistiques ont permis d'aller plus loin, en identifiant des combinaisons de leviers les plus efficaces et des règles chiffrées plus précises (Tableau 3). Les deux stratégies permettant au mieux de réduire à la fois travail du sol, usage d'herbicides et perte de rendement due aux adventices sont très différentes. L'une, S1, permettait de minimiser la perte de rendement, avec des travaux du sol et applications d'herbicides occasionnels, mais optimisés en termes de dates et de types de produits. À l'inverse, S2 n'incluait ni travail du sol ni herbicides, mais au prix d'une perte de rendement bien plus élevée. Dans les deux cas, les rotations devaient inclure des cultures d'hiver et de printemps, avec des contraintes sur les dates de semis et de récolte.

Tableau 3 : Combinaisons de leviers pour concilier faible travail du sol, faible usage d'herbicide et faible perte de rendement due aux adventices.

Stratégie	S1	S2
A. Performance de la stratégie en moyenne sur la rotation (et maximum dans lot de systèmes de culture)		
Indice de fréquence de traitement herbicide (max = 3,47)	0,04	0
Travaux du sol par an (max = 13,1)	0,17	0
Perte de rendement due aux adventices (%)	27 %	41 %
B. Combinaisons de leviers définissant les stratégies		
Couverts d'interculture ou doubles cultures		0
Cultures et variétés sur 30 ans	avec maïs	< 3,5, dont blé
Cultures d'hiver	Oui	Oui
Cultures de printemps	Oui	Oui
Date de semis des cultures de printemps	> 13 avril	< 18 avril
Date de semis des cultures d'hiver	< 3 nov	< 26 sept
Date de récolte des cultures d'hiver		~ 7 juillet
Dernier travail du sol en maïs	< 16 jours avant semis	
Broyage, fauche, écimage		Tous les ≥ 5,5 ans (pas en blé)
Désherbage mécanique	< 0,5 opérations / an	
Irrigation	< 82 mm·an^{-1} et < 2,9 opérations·an^{-1}	
Irrigation en maïs	< 166 mm·an^{-1}et < 5,9 opérations·an^{-1}	
Fumier (sans semences adventices), surtout en blé	< 0.5 apports·an^{-1}	
Efficacité herbicide (moyenne sur toutes les adventices)	≥ 50 %	
Traitements herbicides sur cultures de rente	≥ 0,47·an^{-1}	
dont systémiques	≥ 0,40·an^{-1}	
dont multi-entrée	≥ 0,16·an^{-1}	
dont efficacité sur moncot > 50 %	≥ 0,16·an^{-1}	

Identification des deux meilleures stratégies à l'aide d'un arbre de classification et de régression multivariée analysant l'intensité d'usage herbicide (IFTH), fréquence de travail du sol et perte de rendement simulée avec FLORSYS en fonction des caractéristiques des systèmes de culture, à partir de 395 systèmes × 3 séries (standard, sans travail du sol, sans herbicides) × 30 années × 10 répétitions météorologiques

4. Discussion

4.1. Une méthode pour mieux analyser et extrapoler les observations de terrain

Nous avons utilisé des données sur les systèmes de culture recueillis via des enquêtes agricoles comme entrées du modèle de simulation FLORSYS (jouant le rôle d'un champ expérimental virtuel) et construit un plan de simulation visant à décorréler les principaux leviers de gestion des adventices. Ceci nous a permis de surmonter les principaux inconvénients des essais au champ et des enquêtes en exploitation agricole. L'évaluation des systèmes de culture à l'aide de FLORSYS rend possible une évaluation pluriannuelle complète et ce, pour plusieurs centaines de systèmes simulés sur une douzaine de pédoclimats, avec plusieurs séries météo mais aussi de flores adventices contrastées. Les descriptions fournies par les agriculteurs et les conseillers étaient essentielles pour étudier le rôle du travail du sol dans des systèmes de culture cohérents dont les composantes ont été choisies pour être complémentaires, tandis que les séries de simulations "sans travail du sol" et "sans herbicide" ont permis de démêler le rôle des deux principales options de gestion des adventices l'une par rapport à l'autre et par rapport à d'autres techniques culturales. Ce dernier point est difficile voire impossible sur le terrain, car les agriculteurs compensent la réduction du travail du sol et/ou la réduction de l'utilisation d'herbicides par d'autres pratiques. Ceci peut conduire à des conclusions erronées lorsqu'on établit simplement une corrélation entre les intensités de gestion et les données relatives à la flore adventice ou au rendement (Colbach *et al*. 2020).

L'utilisation d'un modèle de simulation mécaniste (basé sur les processus) est essentielle pour comprendre les raisons des performances observées des systèmes de culture et des effets du travail du sol et pour accéder à des variables d'état détaillées sur les cultures, les adventices et le sol qui sont difficiles ou impossibles à mesurer sur le terrain (Colbach *et al*. 2020). Utiliser le champ virtuel FLORSYS a permis d'appliquer des méthodes agronomiques et écologiques initialement développées pour le diagnostic des systèmes de culture et les enquêtes de terrain, par exemple pour identifier les traits de plantes sélectionnées par les pratiques culturales (Doledec *et al*. 1996) ou bien pour identifier et classer les facteurs limitants du rendement à l'échelle régionale (Doré *et al*. 2008). En conséquence, nous avons produit des connaissances émergentes, par exemple, sur les caractéristiques des adventices qui sont sélectionnées par le travail du sol ou le semis direct, ainsi que des règles pour concevoir des systèmes de semis direct durables en termes de maîtrise des risques malherbologiques. Pour aller plus loin, il faudrait aussi évaluer l'ensemble de la durabilité économique, sociale et environnementale, comme l'ont fait Cavan *et al* pour les systèmes co-conçus avec des agriculteurs (Cavan *et al*. 2025).

4.2. Des résultats cohérents avec les observations de terrain

Le principal inconvénient des études de simulation est que les résultats dépendent de la qualité de prédiction du modèle. C'est bien la raison pour laquelle nous avons évalué dans le passé FLORSYS à l'aide d'observations indépendantes de terrain, provenant de différentes régions et sur plusieurs années. Il en résulte que le modèle simule bien les dynamiques adventices et qu'il classe correctement les systèmes de culture en fonction de leurs rendements et infestations par les adventices (Colbach *et al*. 2019). Les pertes de rendement simulées ici peuvent sembler parfois énormes mais ce n'est pas dû à un défaut dans le modèle. Les études de terrain font bien état de pertes de rendement très élevées pour certaines de ces cultures (voir détails dans Colbach et Cordeau 2018). En l'occurrence, pendant les simulations, les pratiques n'ont pas été adaptées aux flores d'adventices simulées et à la variabilité météorologique interannuelle comme cela aurait été fait par les agriculteurs. Cette approche a été choisie pour distinguer l'effet des pratiques sur les adventices de l'effet des adventices ou de la météo sur les pratiques.

Par ailleurs, nous avons la cohérence des conclusions de notre étude avec les retours de terrain. Outre les augmentations de salissement fréquemment rapportées (Pittelkow *et al*. 2015; Derrouch *et al*.

2020a) en accord avec les résultats de nos simulations, certaines études ont observé, par exemple, des tendances similaires, comme une augmentation des espèces émergentes de printemps/été après l'adoption de l'agriculture de conservation (Derrouch *et al*. 2022). D'autres rapports de terrain n'ont pas pu être confirmés, tout simplement parce que les adventices concernées ne sont pas incluses dans le modèle FLORSYS. C'est le cas des adventices vivaces, qui augmentent souvent avec l'adoption de l'agriculture de conservation (Derrouch *et al*. 2022) et que nous sommes en train d'inclure dans FLORSYS (Skorupinski 2024). Une autre limite de notre étude est liée aux processus manquants. Par exemple, les herbicides pseudo-racinaires (qui pénètrent par le méristème des plantes en cours de levée) ont fonctionné dans simulations sans travail du sol alors qu'en pratique, les agriculteurs en agriculture de conservation utilisent peu ces herbicides car leur efficacité est réduite par la teneur plus élevée en matière organique à la surface du sol non travaillé (Derrouch *et al*. 2020a). Or, ce processus n'est pas inclus dans FLORSYS.

D'autres différences avec la littérature peuvent résulter du corpus de données utilisé. Nous avons notamment volontairement comparé les systèmes collectés sur le terrain à des systèmes dans lesquels le travail du sol a été supprimé sans autre changement dans les techniques culturales. Dans la pratique, la suppression du travail du sol s'accompagne d'une révision complète du système, comprenant de nombreux autres changements dans les pratiques culturales qui pourraient entraîner des évolutions dans la flore adventice qui seraient attribuées à l'absence de travail du sol. Par exemple, le semis direct s'accompagne souvent de couverts d'interculture et de changements dans les dates de semis, deux options qui influencent fortement la levée et la dynamique des adventices.

4.3. Difficile voire impossible de se passer à la fois de travail du sol et d'herbicides

Nos enquêtes ont montré que les systèmes de culture collectés sur le terrain présentent fréquemment un compromis entre l'absence de travail du sol et l'absence d'herbicides, comme dans d'autres études (Cavan *et al*. 2015; Lechenet *et al*. 2017; Cavan *et al*. 2019; Yvoz *et al*. 2020). Cela nous rappelle que l'agriculture de conservation n'est devenue possible dans l'agriculture mécanisée que lorsque des herbicides foliaires non sélectifs ciblant également les plantes vivaces sont devenus disponibles (Evans 1972). Même si nous avons étudié plus de 1000 systèmes de culture, aucun ne conciliait zéro travail du sol, zéro herbicide et faible perte de rendement due aux adventices. Cependant, de nombreux agriculteurs imaginent et expérimentent des innovations (Peigné *et al*. 2015). Nous devons continuer à traquer ces innovations et évaluer dans les fermes, les stations expérimentales ou à l'aide d'outils informatiques.

4.4. Les implications pour la simplification du travail du sol

Notre étude de simulation confirme que supprimer le travail du sol est désastreux pour le contrôle de la nuisibilité de la flore adventice s'il n'est pas compensé par des pratiques de gestion cohérentes à l'échelle système. En effet, le travail du sol est essentiel d'une part pour détruire les plantes adventices avant le semis des cultures commerciales afin de réduire l'émergence des adventices en enfouissant les semences (Mulugeta et Stoltenbert 1997), et d'autre part pour réduire le stock semencier d'adventices par des opérations de faux semis (Lamour et Lotz 2007; Riemens *et al*. 2007; Travlos *et al*. 2020). Par conséquent, plus la fréquence initiale de travail du sol est élevée dans un système de culture, plus le système de culture doit être repensé pour compenser la suppression. Cela met en évidence ce que les agriculteurs pionniers de l'agriculture de conservation (ACS) ont constaté lors de la transition de leur système de culture : le travail du sol a dû être réduit progressivement (Derrouch *et al*. 2020a; Shrestha *et al*. 2020), en supprimant d'abord le labour, puis en réduisant autant que possible l'intensité du travail du sol et, enfin, en passant au non-travail du sol continu. Cela permet un changement plus progressif de la communauté adventice (Derrouch *et al*. 2022) et réduit le rôle du

stock semencier dans la régénération des adventices les années suivantes (Chauhan *et al*. 2012; Cordeau *et al*. 2015) ce qui rend possible des adaptations de pratiques progressives.

Nous avons identifié des pistes pour limiter les pertes de rendement dues aux adventices dans les systèmes avec réduction du travail du sol et des herbicides. Ces pistes sont cohérentes avec ce que les agriculteurs pionniers apprennent de leur phase de transition vers l'agriculture de conservation, comme les rotations diversifiées avec différentes saisons de semis en plus d'une couverture végétale permanente (Derrouch *et al*. 2020a), même si des questions restent en suspens sur l'ordre de ces cultures dans la séquence. L'évaluation multicritère de systèmes sans travail du sol montre d'ailleurs que seuls ceux incluant ces pistes sont durables (Craheix *et al*. 2016). La plupart de ces leviers sont communs à la gestion agroécologique des adventices (Bastiaans *et al*. 2008), soulignant que les systèmes durables sans labour et sans herbicide nécessitent une bonne compréhension de l'écologie des adventices et de leur réponse aux leviers agronomiques (Petit *et al*. 2018) et un raisonnement à l'échelle de la rotation. Cependant, les solutions identifiées ici sont peu nombreuses, elles ne sont réalisables que dans certaines situations de production et peuvent présenter d'autres inconvénients, par exemple le risque d'érosion, les problèmes de débouchés pour les cultures mineures ou les prairies temporaires. Certaines options sont impossibles dans les systèmes en semis direct, comme le désherbage mécanique à l'aide d'une herse et d'outils similaires (en raison de la présence de résidus de culture) ou la réduction de l'espacement entre les rangs (parce que la plupart des semoirs de semis direct exigent un espacement d'environ 17 cm entre chaque rang).

5. Conclusion et perspectives

Notre étude a confirmé à plus grande échelle que la suppression des deux principaux leviers de contrôle des adventices sans compensation est désastreuse. Pour atteindre le Saint Graal des systèmes sans travail du sol, sans herbicide et avec une perte limitée de rendement due aux adventices, les systèmes doivent être repensés en profondeur, allant probablement au-delà de ce qui est actuellement connu, pratiqué ou réalisable. Cela nécessitera également un effort majeur en termes de sélection des cultures (Debaeke *et al*. 2024), en particulier la nécessité de disposer de nouveaux mélanges d'espèces de cultures de couverture capables de surpasser les adventices, plus faciles à éliminer sans glyphosate, tout en limitant les coûts pour l'agriculteur ou les dommages causés à l'environnement.

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

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X ;

Stéphane CORDEAU : https://orcid.org/0000-0003-1069-8388.

Contributions des auteurs

NC : conceptualisation, méthodologie, modélisation, simulation, analyse statistique, rédaction. SC : conceptualisation, méthodologie, analyse, rédaction

Les auteurs précisent que ces résultats ont été présentés précédemment lors d'une conférence du COLUMA en 2023 (Colbach et Cordeau 2023) et dans une revue internationale (Colbach et Cordeau 2022).

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

Ce projet a été financé par INRAE, les projets français ANR CoSAC (ANR-15-CE18-0007, www.projet-cosac.fr/), ANR PPR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008, www6.inrae.fr/specifics/), COPRAA (www6.inrae.fr/projet-copraa/) 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, le Casdar ENGAGED ("Gestion des adventices en semis-direct sur couvert permanent sans glyphosate), avec le soutien du compte "Développement agricole et rural"), ainsi que le projet européen Horizon 2020 IWMPRAISE (N 727321).

Références bibliographiques

Adeux G., Cordeau S., Courson E., Guinet M., Lecaulle S., & Munier-Jolain N. (2024). Evaluation multicritère de systèmes de culture en ACS : cas du réseau DEPHY-Ferme. In: Cordeau S., Maron P.-A., Sarthou J.-P., & Chauvel. B. (éd.). *Evaluation multicritère de systèmes de culture en ACS : cas du réseau DEPHY-Ferme*, 2024. 231-250.

Bastiaans L., Paolini R., & Baumann D.T. (2008). Focus on ecological weed management: what is hindering adoption? *Weed Research, 48*, 481--491.

Cavan N., Alexandre J., Goetz C., Nidriche A., Trinh-Quy L., Queyrel W., Colbach N., & Angevin F. (2025). Retour d'expériences de co-conception de systèmes innovants peu consommateurs d'herbicides avec des agriculteurs : rôle des outils dans l'appui à l'animation. *Innovations agronomiques*.

Cavan N., Labreuche J., Cousin I., I., Wissocq A., & Angevin F. (2015). *Effet d'une réduction du travail du sol sur la gestion des adventices : une analyse de l'enquête SSP (2011)*. In: Rencontres sur la Gestion Durable des Adventices. « Comment maîtriser les adventices dans de nouveaux contextes de production ? », Paris, France (2015-12-15).

Cavan N., Labreuche J., Wissocq A., Angevin F., & Cousin I. (2019). Overview ot tillage practices and correlations with other practices in France: An analysis of the agreste survey (2011). In: (éd.).*Overview ot tillage practices and correlations with other practices in France: An analysis of the agreste survey (2011)*, 2019. 137 p.

Chantre G.R., & González-Andújar J.L. (éd.) *Decision Support Systems for Weed Management.* 2020, 342 p.

Chauhan B.S., Singh R.G., & Mahajan G. (2012). Ecology and management of weeds under conservation agriculture: A review. *Crop Protection, 38*, 57-65.

Chauvel B., Derrouch D., Munier-Jolain N., & Cordeau S. (2018). Gestion de la flore adventice en semis direct sous couvert. In: Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., & Rodriguez A. (éd.).*Gestion de la flore adventice en semis direct sous couvert*, 2018. 207-220.

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*, in press.

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. (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. (2022). Are no-till herbicide-free systems possible? A simulation study. *Frontiers in Agronomy, 4*, 823069.

Colbach N., & Cordeau S. (2023). *Est-ce que des systèmes de culture sans travail du sol ni herbicides sont possibles? Une étude simulation*. In: Végéphyl – 25ème conférence du COLUMA. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Orléans, France (5-7 Dec 2023).

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., Petit S., Chauvel B., Deytieux V., Lechenet M., Munier-Jolain N.M., & Cordeau S. (2020). Relations entre niveau d'usage d'herbicides, flore adventice et rendement : analyse critique des méthodes et synthèse des acquis. *Innovations agronomiques, 81*, 1-17.

Cordeau S., Guillemin J.P., Reibel C., & Chauvel B. (2015). Weed species differ in their ability to emerge in no-till systems that include cover crops. *Annals of Applied Biology, 166*, 444-455.

Craheix D., Angevin F., Dore T., & de Tourdonnet S. (2016). Using a multicriteria assessment model to evaluate the sustainability of conservation agriculture at the cropping system level in France. *European Journal of Agronomy, 76*, 75-86.

Debaeke P., Perronne R., Colbach N., Moreau D., Barre P., Lecouviour F., & Durand-Tardif M. (2024). Non-chemical weed management: Which crop functions and traits to improve through breeding? *Crop Protection, 179*, 106631.

Derrouch D., Chauvel B., Cordeau S., & Dessaint F. (2022). Functional shifts in weed community composition following adoption of conservation agriculture. *Weed Research, 62*, 103-112.

Derrouch D., Chauvel B., Felten E., & Dessaint F. (2020a). Weed management in the transition to conservation agriculture: Farmers' response. *Agronomy-Basel, 10*, 13.

Derrouch D., Dessaint F., Felten É., & Chauvel B. (2020b). L'adoption du semis direct sous couvert végétal: transition douce ou rupture? *Cahiers Agricultures, 29*, 5.

Doledec S., Chessel D., terBraak C.J.F., & Champely S. (1996). Matching species traits to environmental variables: A new three-table ordination method. *Environmental and Ecological Statistics, 3*, 143-166.

Doré T., Clermont-Dauphin C., Crozat Y., David C., Jeuffroy M.H., Loyce C., Makowski D., Malézieux E., Meynard J.M., & Valantin-Morison M. (2008). Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 28*, 151-161.

Evans D.M. (1972). *Field performance of glyphosate derivatives in the control of Agropyron repens and other perennial weeds*. In: British Weed Control Conference, Brighton, UK

Hobbs P.R., Sayre K., & Gupta R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences, 363*, 543-555.

Kudsk P., & Mathiassen S.K. (2020). Pesticide regulation in the European Union and the glyphosate controversy. *Weed Science, 68*, 214-222.

Lamour A., & Lotz L.A.P. (2007). The importance of tillage depth in relation to seedling emergence in stale seedbeds. *Ecological Modelling, 201*, 536-546.

Lechenet M., Dessaint F., Py G., Makowski D., & Munier-Jolain N. (2017). Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants, 3*, 17008.

Mulugeta D., & Stoltenbert D.E. (1997). Seed bank characterization and emergence of a weed community in a moldboard plow system. *Weed Science., 45*, 54-60.

Peigné J., Lefevre V., Craheix D., Angevin F., & Capitaine M. (2015). Évaluation participative de prototypes de systèmes de culture combinant agriculture de conservation et agriculture biologique. *Cahiers Agricultures, 24*, 134-141.

Petit S., Cordeau S., Chauvel B., Bohan D., Guillemin J.-P., & Steinberg C. (2018). Biodiversity-based options for arable weed management. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 38*, 48.

Pittelkow C.M., Liang X.Q., Linquist B.A., van Groenigen K.J., Lee J., Lundy M.E., van Gestel N., Six J., Venterea R.T., & van Kessel C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature, 517*, 365-U482.

Reboud X., Blanck M., Aubertot J.-N., Jeuffroy M.-H., Munier-Jolain N., Thiollet-Scholtus M., & Huyghe C. (2017). Usages *et al*ternatives au glyphosate dans l'agriculture française. Rapport Inra à la saisine Ref TR507024.

Reicosky D.C. (2015). Conservation tillage is not conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation, 70*, 103-108.

Riemens M.M., Van der Weide R.Y., Bleeker P.O., & Lotz L.A.P. (2007). Effect of stale seedbed preparations and subsequent weed control in lettuce (cv. Iceboll) on weed densities. *Weed Research, 47*, 149-156.

Shrestha J., Subedi S., Timsina K., Chaudhary A., Kandel M., & Tripathi S. (2020). Conservation agriculture as an approach towards sustainable crop production: A review. *Farming and Management, 5*, 7-15.

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*, 238 p.

Sun Y.N., Zeng Y.J., Shi Q.H., Pan X.H., & Huang S. (2015). No-tillage controls on runoff: A meta-analysis. *Soil & Tillage Research, 153*, 1-6.

Travlos I., Gazoulis I., Kanatas P., Tsekoura A., Zannopoulos S., & Papastylianou P. (2020). Key Factors Affecting Weed Seeds' Germination, Weed Emergence, and Their Possible Role for the Efficacy of False Seedbed Technique as Weed Management Practice. *Frontiers in Agronomy, 2*.

Yvoz S., Petit S., Biju-Duval L., & Cordeau S. (2020). A framework to type crop management strategies within a production situation to improve the comprehension of weed communities. *European Journal of Agronomy, 115*, 126009.

Pour citer cet article : Nathalie Colbach, Stéphane Cordeau. Gérer les adventices sans travail du sol ni herbicides n'est pas possible dans les systèmes de grande culture. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.94-106. 10.17180/ciag-2025-vol101-art09

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

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

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

Vers une meilleure maitrise du laiteron des champs en Hauts-de-France

Jeanne DELSAUT[1], Bastien BOQUET[1], Jean-Marc MEYNARD[2], Jérôme PERNEL[1], Aïcha RONCEUX[1], Marie FLAMENT[1]

[1] Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2, chaussée Brunehaut, 80200 Estrées-Mons, France

[2] Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR Sad-Apt, 91123 Palaiseau, France

Correspondance : j.delsaut@agro-transfert-rt.org ; b.boquet@agro-transfert-rt.org

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art10

Résumé

Le laiteron des champs (*Sonchus arvensis* L., SONAR) est une adventice vivace avec la capacité de se multiplier par ses graines et par ses racines traçantes où il stocke de l'énergie afin de pouvoir repousser après destruction de son appareil aérien. Il est très présent dans les systèmes légumiers de plein champs biologiques des Hauts-de-France, où le travail du sol favorise sa propagation par fractionnement de son système racinaire. Le projet VivLéBio2 avait pour objectif de capitaliser les connaissances sur le laiteron, en termes de biologie et de leviers de gestion sans herbicides à partir de la littérature, de l'expertise locale et d'expérimentations. Des stratégies de déchaumages répétés avec divers outils et des cultures étouffantes ont pour cela été expérimentées. Les stratégies testées ont montré des réductions de densités de laiteron importantes lorsque les conditions étaient favorables, surtout avec un passage d'outil à disques.

Mots-clés : *Sonchus arvensis*, vivace, gestion des adventices, lutte sans pesticides, expérimentation

Abstract: Towards a better control of perennial sow-thistle in Hauts-de-France

Perennial sow-thistle (*Sonchus arvensis* L., SONAR) is a perennial weed able to multiply through its seeds and roots, where it stores energy in order to regrow once its aerial system has been destroyed. This weed is very frequent in the organic cropping systems including open-field vegetable in the Hauts-de-France region, where tillage can contribute to its spreading by breaking up its root system. As part of the VivLéBio2 project, this study aims to synthesize knowledge on perennial sow-thistle in terms of biology and herbicide-free management levers, from literature, local expertise and experiments. Strategies involving repeated stubble ploughing with various tillage tools and weed-suppressive crops were tested in field experiments. The tested strategies significantly reduced sow-thistle density when conditions were favourable, especially when a disc tool was used.

Keywords: *Sonchus arvensis*, perennial, weed management, non-chemical control, experimentation

1. Introduction

Le laiteron des champs (*Sonchus arvensis* L., SONAR) est une astéracée largement répandue en Europe et de l'Ouest de l'Asie (Anbari, 2015). Aujourd'hui, il est retrouvé partout en France, mais reste plus rare dans le sud (CASDAR Désherbage mécanique, 2012 ; INPN, 2023). C'est une adventice à l'origine de pertes de rendement importantes dans les systèmes de culture conventionnels comme biologiques en Europe (Eckersten *et al.*, 2010 ; Bond *et al.*, 2007) et en Amérique (Diether *et al.*, 1983 ; Friesen & Shebeski, 1960). Encore bien maitrisé par les herbicides foliaires systémiques en agriculture conventionnelle, ses populations peuvent exploser en agriculture biologique dans les cultures peu concurrentielles, particulièrement dans les cultures de printemps à cycle de développement proche (Barrett 1983 ; Weil, 2005). Depuis les années 2000, le laiteron des champs figure comme un problème

croissant, devenant la seconde adventice la plus problématique en grande culture Bio dans le Nord-Pas-de-Calais en 2015 (ITAB, 2015). Comme le chardon des champs (*Cirsium arvense* (L.) Scop., CIRAR, Favrelière *et al*, 2020), le laiteron des champs est une vivace qui se reproduit à la fois par la voie sexuée et végétative. Une fois implanté, il se développe sous forme de tâches, à l'aide de racines traçantes capables de donner de nouvelles tiges aériennes appelées drageons. Ses racines lui permettent de réémerger suite à la destruction de ses parties aériennes ou la fragmentation de ses organes végétatifs suite au passage d'outils (Anbari, 2015 ; Lemna & Messersmith, 1990). Les cultures les plus fréquentes en système légumier (carottes, pommes de terre, oignons, betteraves) sont relativement peu concurrentielles vis-à-vis des adventices, et nécessitent un affinage important du sol pour répondre aux normes de qualité des marchés. L'utilisation d'outils rotatifs comme la fraise, qui émiettent le sol sur 15 cm de profondeur, s'est alors généralisée sur ces cultures et apparait comme un facteur de multiplication du laiteron dans ces systèmes (Leblanc & Lefebvre, 2018a ; Weil, 2018).

Cette problématique montante en Hauts-de-France, n'est qu'anecdotique dans le reste de la France, et aucune référence nationale ne couvrait le sujet pour accompagner les producteurs en difficulté. A partir de 2017, des projets partenariaux, coordonnés par Agro-Transfert Ressources et Territoires (VivLéBio : maitrise des VIVaces et l'insertion de Légumes de plein champ dans les systèmes de grande culture BIOlogiques et VivLéBio2) ont travaillé cette problématique. Ce document a pour objectif : (1) de synthétiser la littérature grise et l'expertise locale sur la biologie du laiteron des champs et (2) de présenter les effets des leviers de gestion expérimentés en Hauts-de-France. Pour cela, une première partie synthétisera la bibliographie sur la biologie et leviers de gestion du laiteron des champs (travaux conduits majoritairement au Canada et dans les pays du Nord de l'Europe). Une seconde partie fera état des connaissances empiriques sa gestion en Hauts-de-France en 2021 (observations et retours terrain). Enfin, une dernière partie présentera les résultats expérimentaux des stratégies de gestion de l'adventice testées en système biologique en Hauts-de-France.

2. État de l'art sur la biologie du laiteron des champs : revue de la littérature et expertise terrain

2.1. Caractéristiques morphologiques du laiteron des champs

Comme beaucoup d'astéracées, le laiteron des champs se caractérise aux stades juvéniles par un développement en rosettes. Ses jeunes feuilles sont glabres, en forme de lance, pouvant présenter 2 à 6 lobes triangulaires. Au fil de sa croissance, une tige de 30 à 150 cm de hauteur se développe au centre de la rosette, contenant du latex visible à la cassure (Lemna et Messersmith, 1990). Cette tige porte alors des feuilles irrégulièrement dentées et à son sommet des inflorescences jaunes en capitule. Chaque capitule porte des poils glanduleux et peut contenir entre 150 et 250 fleurs individuelles (Stevens, 1924). Sur le terrain, des variations morphologiques sont souvent constatées. Les racines de laiteron des champs sont souples et cassantes et se situent à 75 % entre 0 et 20 cm de profondeur (Arny, 1932 ; Weil, 2005). Elles portent des bourgeons végétatifs capables de donner des drageons jusqu'à une profondeur de 50 cm (Håkansson, 1969).

2.2. Développement du laiteron des champs

Le laiteron passe l'hiver sous forme de rosette. Au printemps (avril dans les Hauts-de-France), il reprend sa croissance végétative à partir de ses réserves racinaires, dès que la température dépasse 5°C et que le sol se réchauffe (Stevens, 1924 ; Håkansson, 1969, 1990 ; Weill, 2005). A l'approche de l'automne (septembre, Figure 1), ses bourgeons racinaires entrent en dormance. Dans les Hauts-de-France, la floraison a lieu durant l'été, de juin à août. Roberts et Neilson (1981) mentionnent que les graines sont capables de germer de mars à août en conditions chaudes (températures comprises entre 20 et 35°C). Une particularité du laiteron des champs est sa capacité à développer rapidement son

système racinaire. Le cycle biologique du laiteron associe reproductions sexuée et asexuée, lui permettant ainsi de s'adapter et de coloniser rapidement les parcelles cultivées.

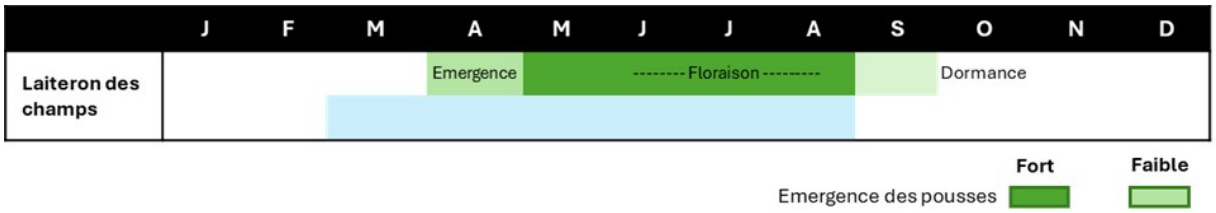


Figure 1 : Périodes du cycle végétatif du laiteron des champs en Hauts-de-France, Jeanne Delsaut (2024), d'après les travaux de Hakansson S. (1982), Andersson *et al.* (2013) ; Emergence : Stevens O. A. (1924), Håkansson (1969) dans Lemna et Messersmith (1990), Weill A. (2005) ; Floraison : Weil A. (2005), Stevens O. A. (1924) ; Dormance : Håkansson S. (1969) et l'expertise des conseillers partenaires.

2.3. Multiplication sexuée

Le laiteron dispose de la capacité de former un grand nombre de graines viables. Environ 30 graines peuvent être produites par fleur (Stevens, 1924), soit 500 à 13 000 graines par tige par an (Bond *et al.*, 2007). Cinq jours seulement sont nécessaires entre la pollinisation des fleurs de laiteron et la production de graines (Stevens, 1924 et Derscheid et Schultz, 1960). La dispersion des graines s'effectue généralement sous l'effet du vent, sur plusieurs mètres, la graine étant comme celle du chardon, accrochée à une aigrette plumeuse (Sheldon et Burrows, 1973). Les graines produites, de part leur petite taille et leurs faibles réserves (poids de 0.51mg), germent à une profondeur réduite (maximum 3 cm) (Håkansson et Wallgren, 1972 & Dorph-Peterson, 1924). Les graines survivent 5 ans dans le sol (Roberts et Neilson, 1981).

2.4. Multiplication végétative

Les racines du laiteron sont capables de s'étendre de 50 cm à 3 mètres par an, formant des tâches d'adventices dans les champs (Lemna et Messersmith, 1990). La destruction de la partie aérienne ou la fragmentation des racines stimulent le bourgeonnement des drageons par levée de la dominance apicale (Anbari *et al.* 2015) et donc l'émergence de nouveaux plants. Les racines traçantes du laiteron sont cassantes, donc sensibles aux passages d'outils, et peuvent ainsi engendrer des fragments racinaires qui peuvent eux-mêmes redonner des pousses dès 1cm (Stevens, 1924 ; Håkansson et Wallgren, 1972 dans Lemna et Messersmith, 1990 ; observation personnelle Agro-Transfert).

2.4.1. Evolution des réserves racinaires du laiteron des champs au cours de l'année

L'émergence du laiteron issu de reproduction végétative repose sur la remobilisation des réserves souterraines pour former les parties aériennes et des radicelles. Le moment où les réserves sont au plus bas est appelé **point de compensation** (Favrelière *et al*, 2020 pour le chardon). Celui-ci intervient entre les stades 3-4 feuilles et 5-7 feuilles suivant les sources (Håkansson, 2003 (p.168) ; Tavaziva, 2012 ; Leblanc et Lefebvre, 2018b). Passé ce stade, la plante reconstitue ses réserves grâce à la photosynthèse. Au voisinage de la floraison, les sucres produits par la photosynthèse des feuilles de la tige sont mobilisés vers l'apex, et seuls ceux produits par les feuilles de la rosette descendent vers les racines (Fykse, 1974). C'est donc une fois la production des organes floraux passée, en été et à l'approche de l'automne, que débute réellement le processus de mise en réserve dans les racines (Lemna & Messersmith, 1990). Dès la fin septembre, suite au raccourcissement de la photopériode (Liew *et al.*, 2012), la plante entre en dormance hivernale. Sa croissance est alors stoppée, même si les feuilles conservent une activité photosynthétique (Hakansson, 1969 ; Tørresen *et al.*, 2010).

2.4.2. Relation entre biologie du laiteron des champs et moyens de gestion

La lutte contre le laiteron des champs doit être organisée en relation avec sa croissance et son cycle de développement. Le principe est de détruire les plantes sans leur laisser le temps d'accumuler des réserves. L'épuisement des populations de laiteron passe par une succession d'interventions au stade clé du point de compensation. C'est à ce stade du cycle de développement que ses réserves racinaires sont au plus bas et qu'il faut donc agir (par travail du sol principalement). Les interventions réalisées avant la fin de la floraison s'avèrent aussi judicieuses afin d'éviter la reconstitution des réserves durant l'été mais aussi de diminuer la quantité de graines viables retournant au stock semencier. Les déchaumeurs à dents présentant un recroisement des socs de 20 à 30% sont recommandés afin d'optimiser le scalpage (i.e. la coupe superficielle) de l'ensemble de l'appareil racinaire à la surface du sol (Weil, 2018). Plusieurs auteurs soulignent l'efficacité de scalpages répétés (2 à 4) entre juin et septembre (Derscheid *et al*., 1961 ; Melander *et al.*, 2012 ; Weill, 2018) ou encore par des scalpages répétés au printemps (2 à 3) avant implantation d'une culture de printemps tardive ou d'été, si possible concurrentielle. Les conditions idéales de réalisation sont des conditions chaudes et séchantes, pour limiter le repiquage. Le fractionnement du système racinaire par plusieurs passages d'outil successifs peut aussi s'avérer efficace du fait de la création de pieds plus petits, contenant moins de réserves et donc plus vulnérables à l'épuisement des réserves.

3. Perceptions par les acteurs du terrain des facteurs et pratiques culturales favorables et défavorables au développement du laiteron des champs

3.1. Matériel et méthode

Des entretiens semi-directifs ont été conduits en région Hauts-de-France entre 2020 et 2021, auprès d'agriculteurs et de conseillers en agriculture biologique, de façon à recueillir leurs retours sur les facteurs favorables et défavorables au développement de l'adventice. L'échantillon comprend 30 producteurs majoritairement spécialisés dans les légumes de plein champ biologiques et 9 conseillers, issus des 5 départements des Hauts-de-France.

3.2. Résultats

Les entretiens mettent en avant deux facteurs qui favoriseraient le développement du laiteron des champs dans les systèmes légumiers de plein champ : un recours à la fraise en préparation de sol, une fertilisation azotée par apport de vinasse. La fraise comme la herse rotative fragmentent en moyenne 2 fois plus les racines de laiterons que les autres outils de travail du sol (Lefebvre et Leblanc, 2018a), démultipliant ainsi les repousses par repiquage. La vinasse, riche en potasse, est un élément que le laiteron apprécie particulièrement et qu'il accumule rapidement pour rentrer en concurrence avec les cultures (Marten *et al*., 1987).

Les répondants s'accordent aussi sur plusieurs pratiques défavorables au développement du laiteron : le binage (17/22 répondants), la luzerne (14/22 répondants), le labour (13/20 répondants) et les couverts d'interculture (13/17 répondants). Un point de vigilance concerne la luzerne : 6 répondants estiment que, bien que le laiteron des champs ne se développe pas dans la luzerne, celle-ci n'a pas pour autant un effet nettoyant et le laiteron réapparaît post-destruction de la luzerne. Concernant le labour, la bibliographie semble nuancer le constat des enquêtés : certains distinguent l'efficacité des labours sur l'épuisement des laiterons selon la période de réalisation (le labour serait plus efficace au printemps qu'en automne - Melander *et al.*, 2012 ; Håkansson, 2003 ; Brandsaeter *et al.*, 2017) alors que d'autres sources mentionnent qu'il ne contribue pas à l'affaiblissement du laiteron mais redistribue les racines dans la couche labourée et étale la période d'émergence (Weil, 2018).

Un dissensus émerge sur le déchaumage (4 agriculteurs le jugent favorable et 5 défavorable au développement du laiteron). Les modalités de mise en place (ex. outil utilisé, nombre de répétitions) expliquent ces divergences. Les outils à disques ou herse à dents droites semblent favorables au développement des populations de laiteron, alors que les scalpeurs à pattes d'oie et un outil extirpateur de type Kvick-Finn sont cités comme permettant de les maîtriser. Un producteur note que des passages répétés d'outils animés (qui fragmentent plus les racines de laiteron que les outils non animés (Leblanc et Lefebvre, 2018a)) donnent des laiterons moins vigoureux. En effet, la bibliographie appuie qu'à longueur identique de racines, les racines coupées en petits fragments produisent plus de rosettes, mais plus petites (Vanhala & Salonen, 2007 ; Anbari *et al*., 2011), plus vulnérables à l'épuisement (Weil 2018) et produisant au final, moins de graines (Anbari *et al*., 2011). Les céréales à paille sont citées comme défavorables au laiteron par 14 répondants, dont la moitié de conseillers, avec de meilleures performances avec la succession de 2 cultures d'hiver. En effet, le laiteron est une plante colonisatrice de sols nus au printemps et peine à se développer lorsqu'il y a peu de lumière, le seigle d'hiver, triticale et autres cultures qui démarrent tôt au printemps sembleraient limiter le développement des vivaces (Weil, 2005 ; CASDAR Désherbage mécanique, 2018 ; Weil, 2018).

3.3. Vers la mise en place d'un dispositif expérimental régional

Afin d'appuyer ces retours, 2 hypothèses ont été retenues pour leur pertinence et notre capacité à les tester chez les agriculteurs partenaires afin d'identifier les meilleures conditions de mises en place des déchaumages : H1 / La fragmentation des racines, en divisant la taille des « unités de réserves » accélère le processus d'épuisement des réserves, et accroît l'efficacité des déchaumages successifs par rapport à des scalpages répétés. H2/ Certaines cultures sont suffisamment concurrentielles du laiteron pour stabiliser voire diminuer des densités de laiterons d'une parcelle suite à un épuisement des réserves racinaires.

4. Dispositif expérimental et méthode de mesures

4.1. Matériel et méthode

Pour tester ces hypothèses, 2 modalités ont été imaginées. La première modalité, R (modalité de référence) est basée sur 3 passages de scalpage avant une culture de printemps. La seconde, modalité F, vise à tester H1 via un premier passage d'outil pour "fragmenter" les racines de laiterons suivi d'au moins 2 scalpages. Aucune modalité « témoin » sans intervention n'a été réalisée, à cause du risque trop élevé de sur-infestation des parcelles par augmentation exponentielle de la biomasse racinaire (Lefevre et Leblanc 2018b). Pour tester H2, l'évolution des densités de laiteron a été suivie pendant 2 ans sur 2 parcelles, après réalisation de la modalité R, suivie d'un sarrasin et d'un escourgeon, deux cultures connues pour être concurrentielles et à implantation rapide au printemps.

La méthode d'observation est basée sur une adaptation de la méthode Casimir[1]. Les tâches de laiteron sont d'abord identifiées suite à un passage en W dans la parcelle. Des quadrats de 16m² à densités homogènes de laiterons sont identifiés et géolocalisés à l'aide d'une canne GPS à précision centimétrique. Un premier comptage est réalisé en interculture de printemps après émergence des laiterons et avant les premiers passages d'outils. Lorsque c'est possible, des comptages sont ensuite réalisés avant chaque intervention mécanique sur l'ensemble des modalités de l'essai. Un dernier comptage est enfin réalisé en fin d'été, avant les premiers travaux du sol post-récolte. Pour les

[1] Le projet CASIMIR : développements méthodologiques pour une CAractérisation SIMplifiée des pressions blotiques et des Régulations biologiques (https://www6.inrae.fr/reseau-pic/Projets/Projet-CASIMIR)

comptages, des cerceaux de 0.25m² sont lancés 4 fois de manière aléatoire dans les quadrats, en évitant les chemins de roue, pour compter les laiterons et estimer leur densité moyenne en pieds par m². L'analyse des résultats porte sur la comparaison de l'évolution des densités de laiterons des champs entre R et F (hypothèse 1) et sur un suivi d'évolution des densités de laiteron suite à R sur une succession de cultures.

Trois expérimentations en ferme ont été réalisées sur des parcelles différentes entre 2022 et 2024, dont une pour la comparaison d'efficacité entre les itinéraires techniques et 2 pour l'étude de l'impact de successions culturales, comme présenté tableau 1 :

Tableau 1 : Caractérisation des expérimentations menées par parcelles.

Parcelle (Localisation)	Type de sol de la parcelle	Années d'étude	Successions de cultures	Passages d'outils par modalités
Parcelle 1 (Cambrai, 59)	Limon battant	2023-2024	Haricots verts binés (semis 16/06/23, récolte 03/09/23), Blé d'hiver (semis 18/12/23, récolte 05/08/24)	R : Scalpage au Cultiscalp à 10 cm (18/04) F : Fragmentation au déchaumeur à disque à 10cm (18/04) 2 scalpages au Cultiscalp à 10 cm (19/05 ;02/06) + Actisol (scalpeur suivi d'un rouleau à pic) (16/06) + 3 binages (04/07 ;17/07 ;10/08)
Parcelle 2 (Crépy-en-Valois,60)	Limon sablo-argileux	2022-2023	Sarrasin (semis 18/05/22, récolte 21/09/22), Escourgeon (semis 26/10/22, récolte 20/06/23)	R : 4 scalpages à 5 cm (02/03/22 ;15/04/22 ;05/05/22 ;18/05/22) + 1 déchaumage (26/10/22)
Parcelle 3 (Crépy-en-Valois,60)	Limon Battant	2023-2024	Sarrasin (semis 03/05/23, récolte 05/10/23), Escourgeon (semis 23/10/23, récolte 18/06/24)	R : 2 scalpages au scalpeur Bonnel à 5 cm (28/02/23 ; 20/04/23) + labour (03/05/23) + déchaumage (23/10/23)

4.2. Résultats

Les résultats de l'essai mené sur la première parcelle (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**1), montrent une diminution de 85% après fragmentation contre 38% après scalpage. Bien que les deux modalités affichent par la suite (2023) des résultats similaires, la modalité fragmentée témoigne en première année (2022) d'une plus forte diminution de la densité de laiterons par rapport à la densité initiale (-89% laiterons /m² pour F contre -73% pour la modalité témoin R). L'essai tend ainsi à valider l'hypothèse H1, que la fragmentation répétée des racines accroit l'efficacité du processus d'épuisement par rapport aux scalpages répétés, tout au moins pour l'année qui suit la fragmentation des organes souterrains.

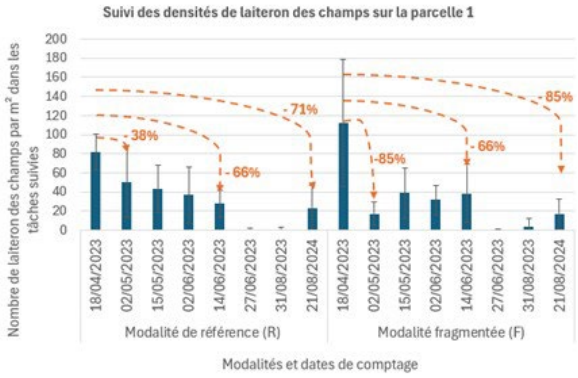
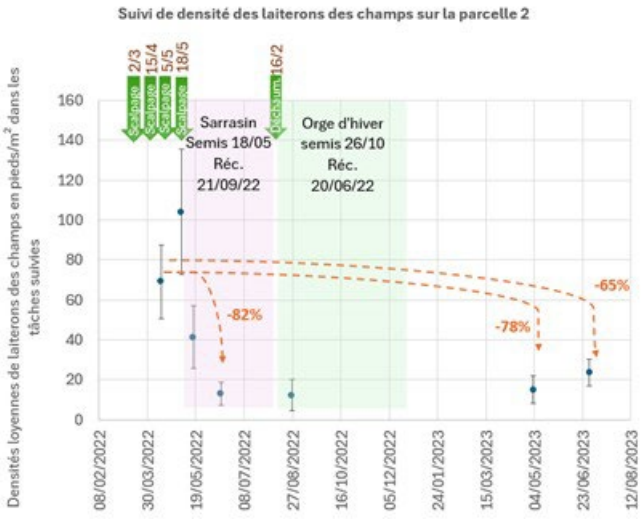


Figure 2 : Suivi de l'évolution des densités de laiterons des champs en fonction des pratiques culturales appliquées sur la parcelle 1.

La modalité R a également été mise en place sur la parcelle 2, pour observer l'effet de la succession de cultures après une stratégie d'épuisement. Comme présenté **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**2, les 4 scalpages superficiels de 2022, combinés aux conditions météorologiques favorables aux opérations, ont permis, dès la première année, de réduire de 88% la densité de laiteron dans les tâches et la bonne implantation du sarrasin. Les deux cultures se sont bien développées et ont eu des rendements satisfaisants. À l'issue de la culture successive de sarrasin et d'escourgeon, les densités de laiteron se sont stabilisées à une vingtaine de plantes par m². Cette réduction est un indice soutant l'hypothèse H2 dans cet essai. Cependant, en l'absence de témoin, rien ne permet d'exclure que cette réduction de laiteron ne soit en fait due (partiellement ou entièrement) à des conditions météorologiques défavorables à l'adventice.

Figure 3 : Suivi de l'évolution des densités de laiterons des champs en fonction des pratiques culturales appliquées sur la parcelle 2.



Sur la 3e parcelle, le premier comptage de laiteron n'a été réalisé que juste avant l'implantation du sarrasin. Les conditions fraiches et humides du printemps 2023 ont limité le nombre de déchaumages (ressuyage difficile et atteinte tardive du point de compensation du laiteron) et ralenti le démarrage du sarrasin. Comme présenté figure 4, la densité de laiteron des champs a augmenté de 61 % en culture de sarrasin et de plus de 300 % à la fin de la succession culturale. Cette seconde expérimentation met en relief que la validation de H2 est conditionnée par la réussite de la stratégie d'épuisement qui précède la culture concurrentielle et à la capacité de cette culture à s'implanter rapidement après la dernière intervention culturale afin d'exercer une concurrence forte sur le laiteron.

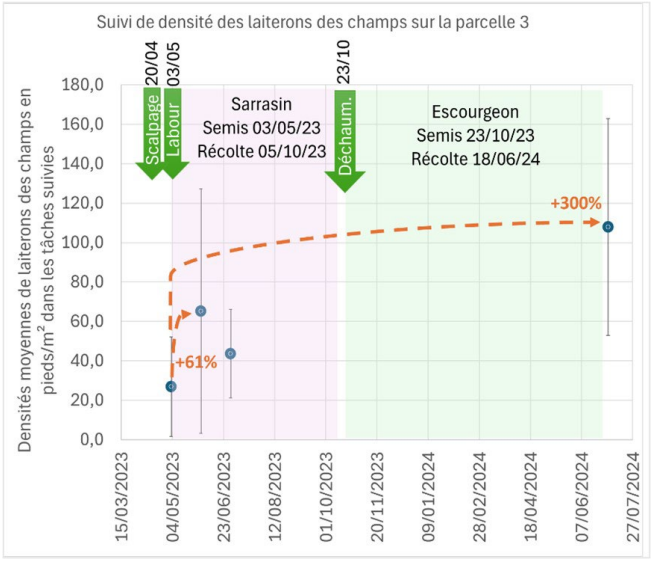


Figure 4 : Suivi de l'évolution des densités de laiterons des champs en fonction des pratiques culturales appliquées sur la parcelle 3.

5. Discussion et perspectives

5.1. Apports et limites de l'étude

L'important travail de synthèse bibliographique réalisé a permis de mettre en avant les données mobilisables pour la compréhension de spécificités biologiques utiles à la gestion du laiteron. En complément, les retours des acteurs du terrain sont une mine d'information riche à exploiter sur les leviers de gestion du laiteron bien qu'il persiste un risque de confusion d'effets lorsque les observations ne bénéficient souvent pas de comptages, répétitions ou de modalités témoins. Ils donnent des références empiriques issues de contextes différents, où il n'a pas été possible de distinguer les propos basés sur des observations en parcelle de ceux basés sur la circulation d'informations, plus ou moins fiables. Les résultats obtenus nous ouvrent des pistes, à confirmer par la littérature scientifique ou par des observations de terrain (Cros, 2021 ; Salembier *et al*, 2021).

Nos expérimentations ont permis de quantifier des impacts de travaux du sol de printemps et de combinaisons pluriannuelles de leviers en conditions agriculteurs, peu présents dans la littérature sur la lutte des vivaces (Favrelière *et al*. 2020). Ils présentent toutefois plusieurs limites : l'absence de modalités « témoins » ne permet pas de discriminer l'effet de la modalité testée de l'effet des conditions météorologiques de l'année sur le développement du laiteron des champs. L'absence de répétition limite également la réplicabilité des stratégies face aux hétérogénéités d'infestation. Les conditions environnementales jouent également sur la faisabilité et la réussite des interventions. Dans notre cas, le nombre d'expérimentations a été limité par le temps court pour réaliser les expérimentations au sein du projet, les contraintes organisationnelles des agriculteurs et un faible nombre de parcelles répondant au contexte expérimental recherché. D'autres expérimentations seront nécessaires pour valider ou invalider nos hypothèses sur l'épuisement des laiterons à l'issue des stratégies de gestion. Un suivi d'autres indicateurs tels que la biomasse racinaire, et le taux de réserves racinaires et des vitesses de croissance des parties aériennes avant et après la mise en œuvre des stratégies auraient été nécessaires pour évaluer la capacité de survie de la population de laiteron des champs. Certains leviers de gestion évoqués dans l'article apparaissent plus difficilement mobilisables que d'autres. Par exemple, le sarrasin est peu cultivé en Hauts-de-France, en raison du manque de débouchés, de la forte variabilité des rendements et des difficultés à garantir les exigences de qualité (p. ex. rémanence d'herbicides). Pour les leviers mécaniques, seuls les outils utilisés et disponibles habituellement chez les exploitants en agriculture biologique de la région ont été utilisés, mais il serait certainement pertinent de concevoir des outils nouveaux (Salembier *et al*, 2020), adaptés au contexte spécifique des légumes de plein champ dans les Hauts-de-France (ex. ailettes, bineuses à écartements spécifiques…).

5.2. Perspectives de recherche

Les recherches sur la biologie du laiteron, principalement établies au XXe siècle et dans les pays nordiques laissent encore des questions en suspens. Par exemple, il existe trop peu de données sur le rôle des graines dans les dynamiques d'infestation, les mécanismes d'entrée en dormance des plants à l'automne, l'évolution de la capacité d'émergence au fil de l'année ou encore la quantification de l'impact du laiteron sur les rendements des cultures. De même, il n'existe pas encore de données sur le potentiel d'expansion et d'adaptation du laiteron face aux évolutions climatiques, qui constituent selon Defant et Ulber (2024) une problématique montante en Allemagne avec une aire de répartition qui s'étendrait de plus en plus vers le sud de l'Europe.

Les lacunes dans la bibliographie restent trop importantes pour que l'on puisse exploiter la richesse des observations des agriculteurs. Pour cela, les travaux d'évaluation de l'impact des différents outils de déchaumage, de leurs profondeurs d'utilisation, d'ordre de passage ou encore des facteurs de développement du laiteron pourraient être creusés. L'effet d'étalement de la période de repousse des laiterons à la suite de la fragmentation voire de labours pourraient être exploités autrement, par

exemple en envisageant de les positionner en fin de stratégie de scalpages de printemps pour laisser à la culture un temps d'avance pour coloniser l'espace. Les expérimentations présentées se basaient sur des interventions au printemps, alors que travailler le sol à l'automne, par une fragmentation ou un labour pourraient également offrir des perspectives d'épuisement, suivis d'une culture d'hiver selon Vanhala et Salonen (2007) et Håkansson, (2003). A l'échelle de la rotation, d'autres cultures compétitives ont été évoquées dans les enquêtes : le triticale, l'avoine ou encore le topinambour qu'il serait intéressant de tester. De même, de nouvelles opportunités peuvent se manifester au travers du développement de « nouvelles » productions en région, réputées très défavorables aux adventices, comme le chanvre. Au sujet de l'impact des couverts sur le développement des laiterons, d'autres expérimentations avaient été menées en 2021-2022 pour comparer des modalités de semis de couverts à date de semis, densités et préparation du sol différent en été. Il en était ressorti que les couverts d'interculture implantés fin juillet étaient peu efficaces pour maitriser les laiterons, par comparaison à des modalités avec deux déchaumages avant l'implantation d'un couvert multi espèce. Une poursuite de tels tests de solutions innovantes en ferme s'avère indispensable.

6. Conclusion

Cette étude capitalise sur l'ensemble des éléments disponibles actuellement pour mieux comprendre la biologie du laiteron des champs et les principes sur lesquels reposent les leviers de gestion pour lutter contre une infestation. Elle met en lumière la complémentarité des apports des articles scientifiques, des expérimentations en ferme et des observations des acteurs de terrain qui participent individuellement à l'émergence d'innovations.

Les éléments clés de la biologie du laiteron à prendre en considération pour optimiser sa gestion à l'échelle de l'itinéraire technique sont précisés ; (i) l'émergence des pousses principalement au printemps et jusqu'en septembre, (ii) les périodes privilégiées pour une destruction efficace des parties aériennes, le point de compensation (4-7 feuilles) et le stade de bourgeon floral où les réserves d'énergie des racines sont au plus bas ; (iii) un système racinaire superficiel souple et cassant. L'étude débouche sur des solutions techniques pour limiter la multiplication du laiteron des champs en systèmes de légumes de plein champ : éviter l'emploi d'outils favorables à la fragmentation des racines (disques, fraises, en particulier), sauf si les conditions d'intervention se prêtent à une fragmentation très forte et qu'une répétition de passage (3 à 4) est possible, qui produit des plantes de petite taille, à réserves racinaires très réduites et peu compétitives ; l'implantation tardive de cultures de printemps, potentiellement sarclées pour épuiser les laiterons à la période la plus poussante ; ou l'implantation de cultures concurrentielles telles que les céréales d'hiver et le sarrasin pour affaiblir sur la durée les laiterons des champs, sous réserve d'être précédée d'une stratégie d'épuisement efficace. Il n'y a pas de recette simple pour maîtriser des populations de laiterons, mais des solutions à combiner au cas par cas.

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

Contributions des auteurs

Jeanne DELSAUT : Rédaction
Bastien BOQUET ; Rédaction
Jean-Marc Meynard ; Révision
Jérôme Pernel, Aïcha Ronceux & Marie Flament ; Supervision et validation

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Nous remercions profondément tous les agriculteurs et conseillers qui ont participé aux enquêtes et ateliers de co-conception pour enrichir notre travail – Gilles Salitot, Alain Lecat, Noëlie Delattre, Solène Kieffer, Mégane Perche-Guillaume, Alain Delebecq, Antoine Stoeffel, Pierre Durand. Nous remercions également nos prédécesseurs qui ont fait un grand travail pour la mise en place des ateliers et expérimentations (Elise Favrelière, Claire Cros, Anicé Anger, Julie Leroy, Jean-Baptiste Fevrier). Nous aimerions remercier également les chercheurs qui nous ont répondu et aiguillé dans nos recherches (Anne Weil, Delphine Moreau, Solèmne Skorupinski) et Delphine Moreau lors de la création du plan de l'article.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été financée sur le temps du projet VivLéBio2, avec le soutien financier de la région Hauts-de-France, l'agence de l'eau Seine-Normandie et l'agence de l'eau Artois-Picardie.

Références bibliographiques

Agro-Transfert Ressources Et Territoires (AGT-RT), 2019. Synthèse des essais sur la gestion des adventices vivaces en agriculture biologique ; essais réalisés par des agriculteurs entre 2016 et 2019 dans le cadre du projet VivLéBio. En collaboration avec le projet CASDAR CAPABLE.

Anbari S., Forkman J., Verwijst T., 2011. Sprouting and shoot development of *Sonchus arvensis* in relation to initial root size. Department of Crop Production Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala. Sweden, DOI : 10.1111/j.1365-3180.2010.00837

Anbari S., Lundkvist A., Forkman J., Verwijst T., 2016. Population dynamics and nitrogen allocation of *Sonchus arvensis* L. in relation to initial root size. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, Vol.66, n°1, 75-84.

Arny AC (1932) Variations in the organic reserves in underground parts of five perennial weeds from late April to November. University of Minnesota Agricultural Experiment Station, Technical Bulletin, 84, 32p.

Barrett S.C.H., 1983. Crop mimicry in weeds. Economic Botany, 37 (3),255-282.

Brandsaeter LO, Mangerud K, Helgheim M, Berge TW (2017) Control of perennial weeds in spring cereals through stubble cultivation and mouldboard ploughing during autumn or spring. Crop Protection, 98, 17-23. http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2017.03.006

Bio En Hauts-De-France (BIO en HDF), 2023. La Bienvenue La lettre d'information de l'agriculture biologique en Hauts-de-France. Comment maintenir ou améliorer la durabilité de mon système légumier de plein champ en temps de crise ?. N°91. P 6-7. [en ligne] Disponible sur : https://www.bio-hautsdefrance.org/wp-content/uploads/2024/07/labienvenue91.pdf

Bond W., Davies G., Turner R.J., 2007. The biology and non-chemical control of perennial sow-thistle (Sonchus arvensis L.).

CASDAR Désherbage mécanique, 2018. Fiches “Connaître les adventices pour les maîtriser en grandes cultures sans herbicides – Le laiteron des champs”

Chambre D’agriculture Regionale Des Hauts-De-France (CA HDF), 2023. Filières &co. Chiffres clés des Hauts-de-France. [en ligne] Disponible sur : https://hautsdefrance.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Hauts-de-France/Filieres_co_7_Avril2023_Legumes_compressed.pdf

Chambre D’agriculture De Lorraine, 2012. Lutte contre les mauvaises herbes : des solutions alternatives et complémentaires aux herbicides. – Guide pratique pour les agriculteurs. [en ligne] Disponible sur : http://www.cra-lorraine.fr/fichiers/guidedeshmecavdefleger.pdf

Cros C., 2021. Enquête sur la gestion du laiteron dans les systèmes de culture biologique des Hauts-de-France, Agro-Transfert Ressources et Territoire, Estrées- Mons

Defant F., 2024. *Sonchus arvensis* - Ecological and Biological Characteristics for Sustainable Weed Management, Thèse de doctorat en cours à l’Institut Julius-Kühn dans le cadre du AC/DC weeds project, Braunschweig, Allemagne.

Derscheid L.A. & Schultz R.E., 1960. Achene development of Canada thistle and perennial sowthistle. Weeds, Vol. 8, Issue 1, p. 55-62

Derscheid L.A., Russell L.N., Wicks G.A., 1961. Thistle control with cultivation, cropping and chemicals. Weeds, Vol. 9, Issue 1, p.90-102

Diether P., Peschken A., Gordon T., Robin F., 1983. Loss in Yield of Rapeseed (Brassica napus, B. campestris) Caused by perennial Sowthistle (Sonchus arvensis) in Saskatchewan and Manitoba. Weed science. Volume 31 ; 740-744

Eckersten H., Lundkvist A., Torssell B., 2010. Comparison of monocultures of perennial sow-thistle and spring barley in estimated shoot radiation-use and nitrogen-uptake efficiencies, Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 60:2, 126-135, DOI: 10.1080/09064710902721347

Favrelière, E., Ronceux, A., Pernel, J., Meynard, J.-M., 2020. Nonchemical control of a perennial weed, Cirsium arvense, in arable cropping systems. A review. Agron. Sustain. Dev. 40, 31. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00635-2

Fykse H., 1974. Untersuchungen über Sonchus arvensis L. I. Translokation von C-14 markiorten Assimilaten. Weed Research. Vol. 14, Issue 5, p.305-312

Håkansson S., 1969 Experiments with Sonchus arvensis L. I. Development and growth, and the response to burial and defoliation in different developmental stages. Annals of the Agricultural College of Sweden 35, 989–1030.

Håkansson S., 1982. Chapter 11: Multiplication, growth and persistence of perennial weeds. In : Holzner W. & Numata M. (eds.), 1982. Biology and ecology of weeds.

Håkansson S., 2003. Chapitre 10: Soil tillage effect on weeds. Weeds and Weed Management on Arable Land: An Ecological Approach. Editions CABI. p.182-183

Håkansson S. & Walgren B., 1972. Experiments with Sonchus arvensis L. 2. Reproduction, plant development and response to mechanical disturbance. Swedish Journal of Agricultural Research, Vol. 2, n°1, p. 3-14

Inventaire National Du Patrimoine Naturel (INPN), 2023. Laiteron des champs (Français). Présentation espèce. Cartes. [en ligne] Disponible sur : https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/124232

Institut De L’agriculture Et De L’alimentation Biologique (ITAB), 2015. Maitriser les adventices les plus problématiques en GC en AB : pistes et actions à mener ? *Enquête été 2015 – Synthèse des 21 réponses au 31 août, 14 régions concernées. Cible : techniciens / ingénieurs / conseillers bio. Répondants : majoritairement Chambres et GAB + 2 instituts, 1 collecteur, 3 agriculteurs.*

Leblanc M., Lefebvre, M., 2018a. Impact de différents outils de travail du sol sur le système racinaire du chardon et du laiteron. Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement https://irda.blob.core.windows.net/media/5365/leblanc-lefebvre-2018-impact_de_differents_outils_de_travail_du_sol_sur_le_systeme_racinaire_du_chardon_et_du_laiteron.pdf

Leblanc M., Lefebvre, M., 2018b. Connaître le chardon et le laiteron pour mieux les réprimer. Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement

Lemna W.K., Messersmith C.G., 1990. The Biology of Canadian Weeds. 94, *Sonchus arvensis* L. Canadian Journal of Plant Science, n°70, p.509–532.

Liew J., Andersson L., Boström U., Forkman J., Hakman I., Magnuski E., 2012. Influence of temperature and photoperiod on sprouting capacity of Cirsium arvense and Sonchus arvensis root buds. Weed Research, Vol. 52, Issue 5, p.449-457

Marten G. C., Sheaffer C. C.,Wyse D. L., 1987. Forage Nutritive value and palatability of perennial Weeds. Agronomy Journal, Vol. 79, p. 980-986.

Melander B., Holst N., Rasmussen I.A., Hansen P.K., 2012. Direct control of perennial weeds between crops – Implications for organic farming. Crop Protection, n°40, p.36-42.

Observatoire Régional De L'agriculture Biologique, 2020. Carte d'identité de l'agriculture biologique en Hauts-de-France. Données 2019. [en ligne] Disponible sur : https://draaf.hauts-de-france.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/ORAB_2020_-_Carte_identite_cle439b61.pdf

Roberts H.A. & Neilson J.E., 1981. Seed survival and periodicity of seedling emergence in twelve weedy species of Compositae. Annals of Applied Biology, vol. 97, Issue 3, p.325-334

Salembier, C., Segrestin, B., Weil, B., Jeuffroy, M.-H., Cadoux, S., Cros, C., Favrelière, E., Fontaine, L., Gimaret, M., Noilhan, C., Petit, A., Petit, M.-S., Porhiel, J.-Y., Sicard, H., Reau, R., Ronceux, A., Meynard, J.-M., 2021. A theoretical framework for tracking farmers' innovations to support farming system design. Agron. Sustain. Dev. 41, 61. https://doi.org/10.1007/s13593-021-00713-z

Salembier C., Segrestin B., Sinoir N., Templier J., Weil B., Meynard J.M. 2020 Design of agroequipment for Agroecology : coupled innovation processes led by farmer-designers. Agricultural Systems 183 (2020) 102856

Sheldon J.C. & Burrows F.M., 1973. The dispersal effectiveness of the achene-pappus units of selected compositae in steady winds with convection. New Phytologist, vol. 72, issue 3, p. 665-675

Stevens O. A., 1924. Perennial Sow Thistle – Growth and reproduction. 630 :7, N82B, no 181, University of Illinois

Vanhala P., Löjönen T., Hurme T., Salonen J., 2006. Managing *Sonchus Arvensis* using mechanical and cultural methods. Agricultural and Food Science, n°15, p.444–458.

Vanhala P., Salonen J., 2007. Overwintering and regrowth of Sonchus arvensis roots in Finland as affected by fragmentation and burial in three different soil types. 7th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control, Salem (Allemagne) : 11-14 Mars 2007. [en ligne] Disponible sur : http://orgprints.org/11237/1/salem.pdf

Weill, A., 2005. Moyens de lutte au chardon des champs en agriculture biologique. [en ligne] Disponible sur : http://www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/Chardon%20med.pdf

Weill, A., 2018. Répression du laiteron des champs, du chardon des champs et du tussilage. CETAB+

Zollinger R. K., Kells J., 1993. Perennial Sowthistle (Sonchus arvensis) Interference in Soybean (Glycine max) and Dry Edible Bean (Phaseolus vulgaris). Weed technology. Volume 7 :52-57

Pour citer cet article : Jeanne Delsaut, Bastien Boquet, Jean-Marc Meynard, Jérôme Pernel, Aïcha Ronceux, *et al*.. Vers une meilleure maitrise du laiteron des champs en Hauts-de-France. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.107-118. 10.17180/ciag-2025-vol101-art10

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

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

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

La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides

Nathalie COLBACH[1], Nicolas CAVAN[1], Marie FLAMENT[2], Thibault MAILLOT[1], Delphine MOREAU[1], Jérôme PERNEL[2], Wilfried QUEYREL[1], Jean VILLERD[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

[2] Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 Chaussée Brunehaut 80200 Estrées-Mons, France

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art11

Résumé

Cet article présente 4 outils pour concevoir des systèmes de culture à zéro/faible usage d'herbicides. Le modèle « parcelle virtuelle » FLORSYS construit à partir d'expérimentations permet de tester les systèmes de culture à long-terme, avec différents pédoclimats et flores adventices. Il prédit de nombreuses « mesures » virtuelles sur les cultures, les adventices et le milieu, ainsi que des indicateurs d'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité. Deux outils d'aide à la décision co-construits avec des acteurs de terrain permettent également de comparer des systèmes de culture, l'un en termes de risque malherbologique pour une série d'espèces adventices préoccupantes (OdERA), l'autre (DECIFLORSYS) avec les mêmes indicateurs d'impacts des adventices que FLORSYS. Enfin, OPTIFLORSYS combine 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.

Mots-clés : aide à la décision, modélisation, co-conception, évaluation multicritère, protection intégrée

Abstract: Complementary models and decision-support systems for accompanying stakeholders in managing weeds with few or no herbicides

This paper presents 4 tools for designing herbicide-sparse cropping systems. The “virtual field” model FLORSYS was built from experiments, and can be used to test cropping systems in the long term, with different pedoclimates and weed floras. It predicts many virtual “measurements” on crops, weeds and soil, as well as indicators of weed impact on crop production and biodiversity. Two decision-support systems co-developed with future users (farmers, crop advisors…) also allow comparing cropping systems, one in terms of weed risk for a series of harmful weed species (OdERA), the other (DECIFLORSYS) with the same weed-impact indicators as FLORSYS. Finally, OPTIFLORSYS combines FLORSYS with optimization algorithms to propose cropping systems that meet the user's production and/or biodiversity objectives.

Keywords: decision support, modelling, co-design, multicriteria evaluation, integrated crop protection

1. Introduction

Le système champ cultivé–adventices est un système complexe, du fait de la diversité et la multitude des processus impliqués dans l’évolution démographique des communautés, de la diversité et la multitude des facteurs techniques affectants ces processus, et de la diversité biologique des espèces, qui leur confère des réponses contrastées aux pratiques des agriculteurs. Les décisions à prendre pour la gestion de la flore adventice sont autant stratégiques (« comment adapter le système de culture de façon à limiter les risques de perte de contrôle des infestations ? ») que tactiques (« Face à la flore que

j'observe aujourd'hui, quelle intervention de désherbage dois-je déclencher pour la maîtriser, compte tenu du système de culture prévisionnel pour les années à venir ? »).

Les outils d'accompagnement et d'aide à la décision stratégique sont d'autant plus indispensables aujourd'hui que l'emploi des herbicides doit être réduit pour des raisons règlementaires, environnementales et sanitaires. En effet, au lieu d'une technique curative, relativement simple et efficace, il s'agit aujourd'hui de combiner une multitude de techniques essentiellement préventives, à effet partiels, avec des fortes interactions et des effets à long-terme (Liebman et Gallandt 1997). Ces outils reposent tous, d'une façon ou d'une autre, sur une forme de modélisation du système étudié. Les modèles sont des représentations simplifiées, relativement abstraites, de processus ou de systèmes, en vue de les décrire, de les expliquer, de les évaluer, ou de les prévoir (Colbach 2010; Colbach 2022). Ils sont souvent construits pour synthétiser les connaissances sur le fonctionnement de l'agroécosystème. Ils peuvent également être utilisés pour assoir des décisions, et sont parfois conçus dans ce but.

Les approches de conception de systèmes de culture basés sur des modèles (ou *in silico*) sont complémentaires d'autres méthodes, comme la conception à dires d'experts suivi du test des prototypes au champ (Lançon *et al*. 2007). Les méthodes *in silico* permettent d'évaluer une très grande gamme de systèmes de culture existants *et al*ternatifs, à long terme et dans différentes conditions pédoclimatiques (Bergez *et al*. 2010; Colbach *et al*. 2019). Ces alternatives peuvent être conçus par exemple dans des ateliers de co-conception avec des agriculteurs (Cavan *et al*. 2023; Queyrel *et al*. 2023) mais aussi par des algorithmes, notamment via des algorithmes d'optimisation (Bergez *et al*. 2010; Colbach *et al*. 2021).

La structure des outils d'aide à la décision stratégique dépend de nombreux aspects : la précision des stratégies de gestion ("labourer un an sur trois" vs. "labourer après 50 mm de pluie post-récolte si infestation dans le précédent supérieur à celle dans l'anté-précédent"), la prise en compte du risque (« le système A est meilleur en moyenne » vs. « le système A est meilleur avec une probabilité de 90 % »), l'échelle d'évaluation (annuelle vs. pluriannuelle), les critères d'évaluation (mono vs multicritère), etc. (Colbach 2010; Colbach 2022).

Nous allons présenter ici 4 cas d'étude contrastés développés ou améliorés dans le cadre du projet COPRAA (projet-copraa.hub.inrae.fr), et analyser leur complémentarité pour la conception de systèmes de culture :

- un modèle « parcelle virtuelle » qui 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 (FLORSYS). Ce modèle mécaniste a été construit à partir d'expérimentations. Il permet donc de comparer et choisir des options stratégiques sur la base d'indicateurs services et disservices agroécosystémiques (production des cultures, biodiversité…) et répond à la question « que se passe-t-il si … » :
- deux outils d'aide à la décision (OdERA et DECIFLORSYS), plus rapide et ergonomique 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 agroécosystémiques) ;
- un outil d'aide à la conception de systèmes de culture (OPTIFLORSYS) 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.

2. Le modèle mécaniste « parcelle virtuelle » FLORSYS

2.1. Structure du modèle

FLORSYS (Colbach *et al*. 2019 ; Colbach *et al*. 2021; Perthame *et al*. 2024)[2] (florsys.hub.inrae.fr/modeles-et-oad/florsys) est un modèle de recherche simulant une parcelle cultivée virtuelle à un pas de temps journalier sur plusieurs années, permettant d'évaluer les performances de systèmes de grande culture en termes de contrôle de la flore adventice, de maintien de la production agricole et de préservation de la biodiversité fonctionnelle, et ce pour l'ensemble des régions françaises tempérées (**Figure 15**). FLORSYS est actuellement paramétré pour 33 espèces de grandes cultures et 32 espèces adventices annuelles fréquentes contrastées. L'intégration des adventices vivaces est en cours (Skorupinski *et al*. 2024).

Les variables d'entrée. L'utilisateur fournit en entrée la liste détaillée des opérations culturales (cultures, variétés, dates, outils, densités, doses, réglages, etc.), les caractéristiques pédologiques de la parcelle, sa latitude et la flore potentielle régionale). Il faut aussi renseigner des fichiers météo journaliers (température, rayonnement, précipitation, évapotranspiration) sur plusieurs années.

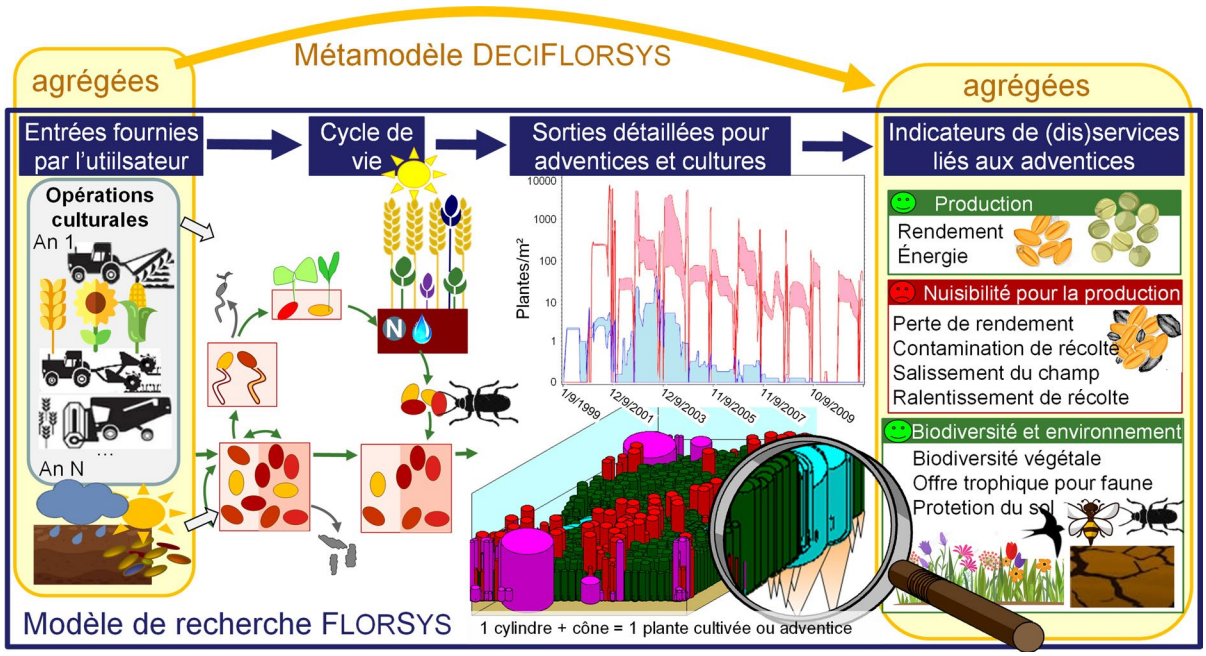


Figure 1 : Présentation du (1) modèle de recherche FLORSYS (rectangle bleu) qui simule le développement et la croissance des cultures et des adventices à partir du système de culture, la météo et du sol, avec une représentation mécaniste des processus biophysiques au jour le jour et en 3D individu-centré (Colbach *et al*. 2019; Colbach *et al*. 2021; Perthame *et al*. 2024), (2) métamodèle DECIFLORSYS (cadres et flèches jaunes) qui calcule directement les (dis)services fournis par les adventices à partir du système de culture (Colas *et al*. 2020) (section 0)

Le cycle de vie des semences et plantes. Ce modèle est la synthèse de nombreux travaux sur le fonctionnement des adventices. Il représente, quantifie et combine les effets de l'ensemble des techniques culturales sur les états du milieu et des plantes adventices et cultivées présentes dans cette parcelle virtuelle. Un cycle de vie générique est appliqué avec un pas de temps journalier aux espèces adventices et aux espèces cultivées, avec une représentation en 3D (aérienne et souterraine) de chaque plante du couvert « culture-adventice ». Les entrées du modèle jouent sur les stades de développement (semences viables, dormantes et germées, etc.) et sur les processus (photosynthèse,

[2] Pour plus de détails, lire les références citées par ces papiers.

respiration, croissance, phénologie, étiolement) du cycle de vie des adventices et des cultures. À maturité, les semences produites par les adventices sont ajoutées au stock semencier du sol et un rendement est estimé pour la culture.

Les processus impliqués dans la régulation biologique des adventices. La compétition plante–plante pour les ressources concerne en premier lieu la lumière, mais aussi l'azote et l'eau du sol (Cournault *et al*. 2024) Elle se traduit à la fois par une perte de rendement des cultures et dépend des espèces (Lebreton *et al*. 2024) et des variétés (Colbach *et al*. 2024). Les carabes prédatent des semences adventices, ce qui peut réduire l'infestation du champ par les adventices (Perthame *et al*. 2024).

Les effets des opérations culturales. L'effet de chaque technique culturale est décomposé en effets individuels qui interagissent avec les états du milieu et des semences et plantes. Par exemple, le travail du sol enfouit et remonte des semences, favorise la levée des dormances et stimule des germinations. Il arrache et enfouit aussi les plantules, les tuant ou réduisant leur croissance, et réduit la prédation des semences par les carabes. Cette approche permet non seulement de prédire des effets moyens (exemple : le retard de semis du blé d'hiver réduit la levée des adventices graminées automnales) mais aussi leur variabilité (exemple : le retard de semis du blé d'hiver n'est efficace que dans 57-64 % des années suivant les régions) et peut même identifier les conditions de succès (exemple : retarder après le 31 octobre lors d'automnes humides) (Colbach *et al*. 2019).

Des sorties détaillées et des indicateurs d'évaluation. L'ensemble des variables du cycle de vie (semences et plantes de différents stades et états) est disponible en sortie pour les adventices et les cultures, à l'échelle journalière et en 3D. Pour faciliter l'évaluation des systèmes de culture, ces variables sont traduites en indicateurs de leurs impacts sur la production agricole et la biodiversité (**Figure 1**). Ces indicateurs ont été développés avec des agriculteurs et des écologues (Mézière *et al*. 2015).

2.2. Domaine de validité

FLORSYS a été évalué avec des données de terrain indépendantes (qui n'ont pas servi à la construction du modèle) sur la dynamique des adventices à court et à long terme à l'échelle métropolitaine, sur une large gamme de systèmes de grande culture. Cette évaluation a montré que les rendements des cultures, les densités adventices journalières et, en particulier, les densités moyennes sur plusieurs années étaient généralement bien prédites. Cependant, dans la version initiale, les densités de semences adventices à la surface du sol étaient surestimées en cas de non-travail du sol continu (Colbach *et al*. 2006; Colbach *et al*. 2016). C'est la raison pour laquelle la prédation des semences par les carabes a été rajoutée dans le modèle, ce qui a effectivement réduit cette surestimation (Perthame *et al*. 2024).

2.3. Exemples d'application

Au fil des années, de nombreuses études de simulation ont été conduites pour évaluer la performance multicritère d'une large gamme de systèmes de culture, avec des focus sur des questions particulières (Tableau 1). Le principe est toujours le même : des systèmes de culture existants provenant d'enquêtes de terrain ou de stations expérimentale ainsi que des systèmes prospectifs proposés par des experts (agriculteurs, conseilleurs, scientifiques) ou des algorithmes sont simulés sur 25 à 30 ans pour évaluer les effets à long-terme des pratiques et des adventices, et les simulations sont répétées avec 10 séries climatiques aléatoires, avec et sans adventices pour calculer la perte de rendement. Des analyses

statistiques (analyses de variance, régressions linéaires, analyse RLQ[3], arbres de régressions et de classification…) sont réalisées sur les densités d'adventices et sur des indicateurs d'impact simulés.

Ces indicateurs visent à comparer les systèmes de culture en termes de multiperformance liée à l'impact des adventices. Cette comparaison est souvent couplée avec un diagnostic à partir des variables d'état des cultures, adventices et sol pour comprendre les causes et conditions de la multiperformance, une étape indispensable pour l'acceptation du modèle et des systèmes par les acteurs de terrain (Colbach *et al*. 2020; Omon *et al*. 2024). Ces analyses permettent aussi d'établir des règles plus génériques pour guider la reconception de systèmes de culture, en identifiant (1) des descripteurs des pratiques expliquant les performances des systèmes de culture (ex. chaque travail du sol superficiel réduit la perte de rendement de 11.5% en systèmes à base de maïs dans le Sud-Ouest, Colbach *et al*. 2017), (2) les traits des adventices sélectionnés par ces pratiques (ex. le labour sélectionne des espèces dont les semences ont des téguments épais, Colbach *et al*. 2014), (4) les traits des adventices expliquant l'impact des adventices sur la performance (Colbach *et al*. 2017).

Tableau 1 : Cas d'étude utilisant FLORSYS pour analyser différents aspects liés à la réduction de l'usage d'herbicides

Évaluer l'effet	Méthode : comparer des scénarios de systèmes de culture / variétés		Quelques conclusions	Exemples de référence
	basés su :r	différents en termes de :		
A. Identifier des idéotypes multiperformants				
Traits des cultures et variétés	Cultures et variétés existantes	Traits des cultures et variétés, situation de production, diversité culturale, pratiques de gestion	Les idéotypes maximisant rendement potentiel et suppression des adventices diffèrent. Une grande surface foliaire placée vers le haut des plantes est essentielle	(Colbach *et al*. 2024)
B. Évaluer les pratiques culturales des agriculteurs pour identifier des solutions économes en herbicides				
Intensité d'usage herbicide des agriculteurs	Pratiques passées et actuelles des agriculteurs	Situation de production, diversité culturale, pratiques de gestion	There are contrasting crop-diverse strategies that reconcile reduced herbicide use with low weed-caused yield loss	(Colbach et Cordeau 2018)
Intensité de travail du sol des agriculteurs			Impossible de concilier zéro herbicide et zéro travail du sol et bonne gestion des adventices	(Colbach et Cordeau 2024)
C. Évaluation ex ante d'innovations proposées par des experts				
Gestion intégrée des adventices	Essai système de culture	Diversité des cultures, intensité de travail du sol, désherbage mécanique, herbicides (Bourgogne, rotation à base de colza et céréales)	La diversification des cultures (≠ cultures/variétés, alterner saisons de semis, couverts d'interculture) peut compenser la réduction des herbicides mais ne garantit pas une bonne biodiversité	(Colbach *et al*. 2019)
Régulation biologique			La prédation de semences adventices par les carabes peut réduire l'infestation du champ par les adventices et augmenter le rendement mais l'effet des cultures et de la météo est plus important	(Perthame *et al*. 2024)
Motifs de semis du blé	Chercheurs	Couverts d'interculture, interrang, date & densité de semis (Bourgogne, rotation colza – céréales d'hiver)	Les couverts d'interculture peuvent augmenter le salissement dans les cultures suivantes si elles empêchent le faux semis ; un placement régulier des plantes est essentiel pour réduire les adventices	(Colbach *et al*. 2019)
Prototypes	Agriculteurs	Diversité des cultures, désherbage mécanique (Champagne crayeuse, rotation colza – céréales)	La diversification des cultures réduit les pertes de rendement dues aux adventices ; les cultures pluriannuelles sont plus efficaces que les associations culturales	(Queyrel *et al*. 2023)
Assolement	Chercheurs	Diversité culturale dans l'assolement d'un îlot de champs (Sud-Ouest, rotations	La diversité de l'assolement augmente la contribution des adventices à la biodiversité mais aussi la nuisibilité pour la production	(Colbach *et al*. 2018)

[3] Analyse de co-inertie des matrices R (pratiques culturales), L (densités adventices) et Q (traits des adventices) pour identifier les corrélations entre pratiques et traits.

		avec maïs)		
Associations céréales–légumineuses	Agriculteurs & chercheurs	Diversité d'espèces de céréales et légumineuses, proportions d'espèces, motifs de semis (Toulouse, rotations très diversifiées)	Les associations avec 2/3 de céréales semées en rangs alternés (ou 2 rangs vs 2) concilient le mieux les rendements et la suppression des adventices ; les céréales très compétitrices (triticale, orge) pénalisent trop la légumineuse	(Lebreton *et al.* 2024)
D. Évaluation ex ante d'innovations résultant de changements dans les règlementations				
Nouvelles variétés de maïs	Statistiques agricoles, conseillers	Diversité des cultures, variétés de maïs et changements de pratiques associés (Sud-Ouest, rotations avec maïs)	Rotations simplifiées et travail du sol simplifié amplifient l'impact des adventices, les couverts d'interculture les réduisent	(Colbach *et al.* 2017)
Bandes enherbées	Chercheurs & conseillers	Diversité des cultures, bandes enherbées (Sud-Ouest, rotations avec maïs)	10 % de bandes enherbées associées aux monocultures permettent un meilleur rendement et une meilleure biodiversité que des rotations diversifiés	(Colbach *et al.* 2018)

Par rapport à la conception de systèmes de culture à dire d'experts, FLORSYS permet ainsi de proposer non seulement des solutions techniques connues pour avoir un fort impact à différents niveaux (labour) mais aussi de définir les options (réaliser un labour 2 ans sur 5) et d'évaluer des actions ayant des effets plus limités (broyage en interculture) ou basées sur des interactions (broyage, passage d'un rouleau avant semis et adaptation de la date de semis). Cette méthode permet aussi d'estimer les probabilités de réussite et d'échec de ces options, et d'identifier les déterminants techniques et biologiques de la performance des systèmes de culture.

3. OdERA : un outil d'évaluation du risque en adventices (http://www.odera-systemes.org/)

3.1. Structure du modèle

OdERA (Pernel *et al*. 2022) est un outil qui a pour finalité d'aider à réduire l'usage des herbicides dans les systèmes de culture. Par son interactivité avec l'utilisateur, il permet la re-conception de systèmes de culture pour diminuer la pression en adventices, en combinant des leviers agronomiques. La motivation pour développer cet outil vient de la difficulté constatée de réduire le poste « herbicides » dans les exploitations agricoles. Cette difficulté est liée à la crainte des agriculteurs de dégrader l'état malherbologique de leur parcelle, ainsi qu'à la nécessité de combiner plusieurs techniques culturales à effets partiels, dépendant des espèces adventices à gérer, et de raisonner à l'échelle du système de culture.

OdERA est un outil construit à dire d'experts, issu d'un travail de co-construction avec les acteurs de terrain coordonné par Agro-Transfert Ressources et Territoires. L'outil s'intéresse au lien qui existe entre les pratiques culturales et la biologie des adventices. Pour les différents leviers de gestion des adventices (rotation, date de semis, labour, déchaumage, désherbage mécanique), leur effet est traduit en nombre de points sur chaque espèce adventice, en prenant en compte des paramètres biologiques (période de levée et Taux Annuel de Décroissance). Par exemple, l'effet de la date de semis de culture prend en compte la connaissance de la phénologie quantitative des levées pendant la période des levées. L'effet du labour prend en compte à la fois la dynamique de levée des adventices, le taux annuel de décroissance du stock semencier, et la fréquence de labour dans la rotation.

L'outil additionne les points correspondants aux leviers mobilisés chaque année pour calculer un score annuel compris entre 0 et 100, puis calcule une moyenne pondérée des scores annuels en fonction du Taux Annuel de Décroissance des adventices, pour obtenir une note de risque à l'échelle du système de culture. L'échelle de risque, qui comporte 5 classes, a été constituée à partir d'un jeu de données issues d'essais systèmes et de parcelles d'agriculteurs (**Figure 2**).

Les données d'entrées nécessaires sont les adventices problématiques de la parcelle et la description des pratiques culturales. Le résultat s'affiche sous la forme d'une grille de points avec le risque pour chaque adventice et par année (**Figure 3**). La date de semis de la culture génère un score initial pour

l'année en question (points positifs) et les autres leviers utilisés viennent réduire ce risque initial (points négatifs). La grille de points permet de voir quelles pratiques impactent le plus le risque dans le système de culture.

L'outil permet tout d'abord de réaliser un diagnostic de la parcelle pour évaluer le niveau de risque en adventices dans le système de culture actuel (pratiques agronomiques déjà en place). Suite à cela, un mode didactique permet de réaliser des simulations de changements de pratiques, en s'appuyant sur une représentation de l'effet des leviers agronomiques sur les adventices. Des graphiques permettent notamment de visualiser les nombres de points qui seront attribués à chaque intervention en fonction de sa date de réalisation. L'utilisateur a ainsi la possibilité de visualiser l'effet des différents leviers et de les positionner au mieux pour réduire la pression en adventices. Cela facilite le travail du conseiller pour que les agriculteurs prennent conscience de l'intérêt à changer leurs pratiques.

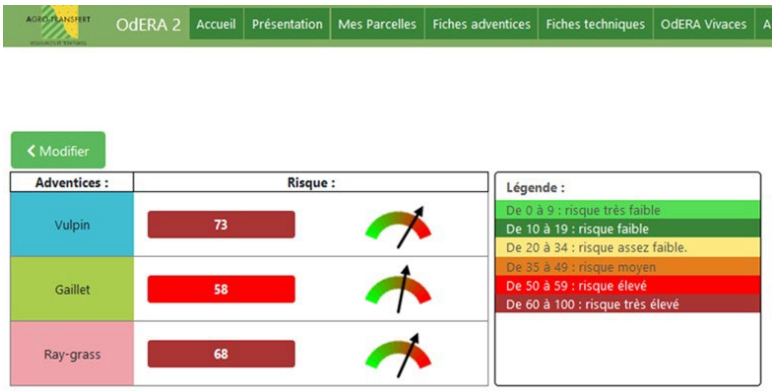


Figure 2 : Capture d'écran du logiciel OdERA montrant les notes de risque à l'échelle du système de culture pour trois espèces d'adventices.

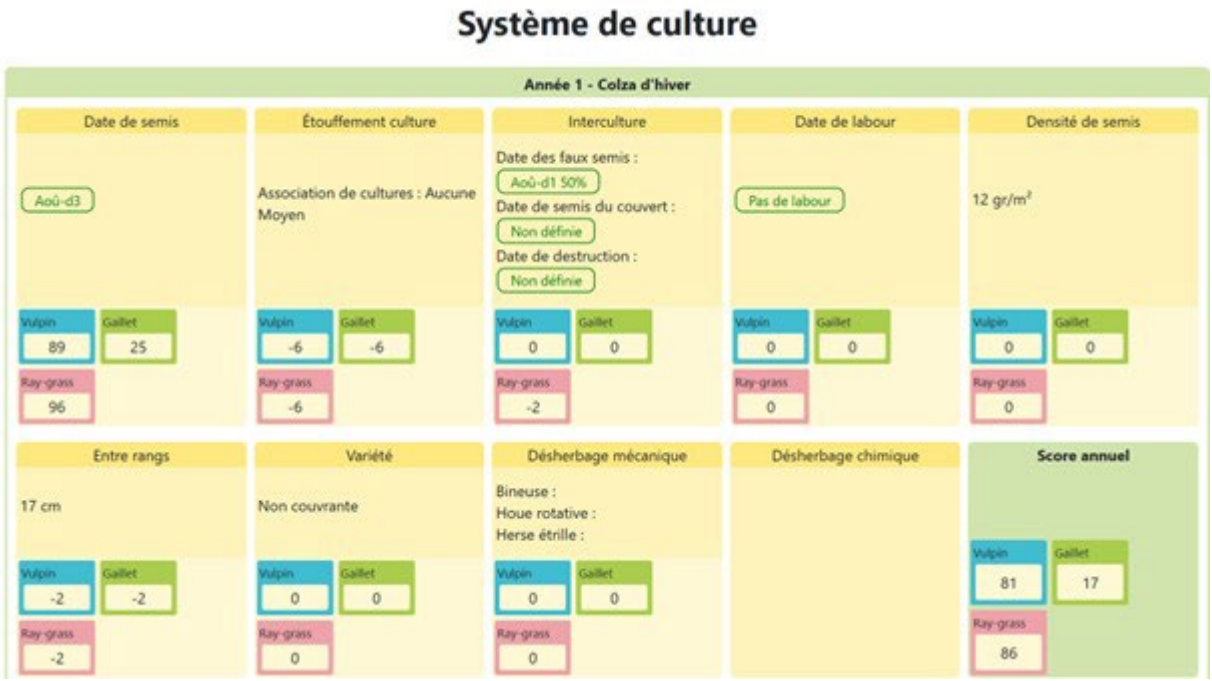


Figure 3 : Grille de points traduisant l'effet d'un système de culture sur la dynamique des espèces adventices dans OdERA

OdERA a été paramétré à partir de connaissances scientifiques et d'expertise sur la biologie des adventices et d'efficacité des leviers agronomiques dans un contexte de grandes cultures françaises. Il a été validé avec des données terrain des Hauts-de-France et de Bourgogne. Depuis sa sortie, il a été utilisé dans différentes régions françaises.

Une des limites d'OdERA est qu'il ne prend pas en compte le contexte pédoclimatique ; le modèle se base uniquement sur des éléments standards de la biologie des adventices. Le niveau de stock semencier adventice initial de la parcelle n'est pas pris en compte non plus. Un travail est en cours afin de pour faire le lien avec un autre outil développé par Agro-Transfert RT permettant d'apprécier le stock semencier. La liste des leviers agronomiques pris en compte n'est pas exhaustive et ne comprend que les leviers pour lesquels il y a suffisamment de connaissances pour parvenir à modéliser leurs effets. Enfin, l'outil ne propose pas une nouvelle stratégie de désherbage chimique adaptée au le nouveau système de culture conçu à partir de l'outil : cela reste du ressort du conseiller.

3.2. Exemples d'application :

OdERA a par exemple été utilisé dans le cadre du projet « Systèmes de Culture Intégrés avec encore moins d'herbicides » conduit par Agro-Transfert RT en partenariat avec les Chambres d'agriculture de Picardie et l'INRA. Il s'agissait de tester la réduction de l'usage des herbicides dans des exploitations agricoles engagées dans une démarche de Production Intégrée.

L'outil a été utilisé avec 9 agriculteurs, pour évaluer le système de culture initial (2002-2006) de 4 parcelles par exploitation et simuler un scénario de changement. Ce scénario de changement a permis d'établir un plan d'actions pour réduire la pression de la flore dominante sur ces parcelles. Les agriculteurs ont ensuite mis en place ce plan d'actions, avec quelques adaptations en fonction des conditions de l'année. Au final, sur le terrain, l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) herbicides a été réduit de 20 à 30 % en fonction de systèmes.

La **Figure 4** montre l'évolution de la note de risque OdERA en vulpin des champs et de l'IFT des antigraminées utilisés sur blé, pour les parcelles étudiées, dans les systèmes de culture initiaux (2002-2006) et reconçus (2007-2012). Grâce au travail de re-conception des systèmes de culture, la note de risque en vulpin des champs est en moyenne réduite de 25 % sur la période 2007-2012 et l'IFT antigraminées a diminué en moyenne de 24 %.

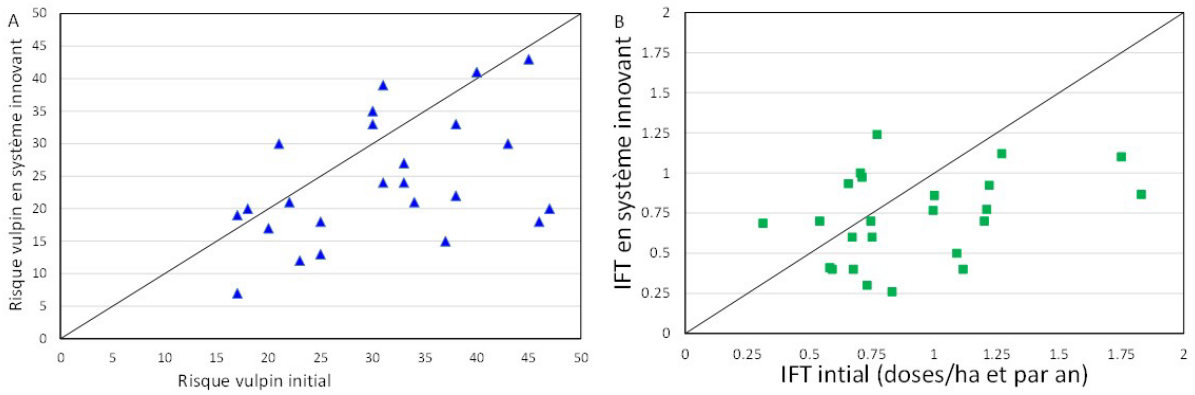


Figure 4 : Évolution du risque vulpin des champs évalué avec OdERA (A) et de l'IFT herbicides antigraminées en blé moyen sur 4 ans (B) sur les parcelles de références du projet « Systèmes de Cultures Intégrés avec encore moins d'herbicides » entre 2002-2006 (système initial) et 2007-2012 (système reconçu à l'aide d'OdERA).

Diffusé depuis 2011, l'outil a été utilisé par plus de 2500 personnes (données issues de la base de comptes utilisateurs), essentiellement des conseillers agricoles, enseignants, étudiants, chercheurs et agriculteurs. Les usages les plus fréquents de l'outil sont dans le cadre de l'animation d'un groupe d'agriculteurs en transition (DEPHY, GIEE, zone à enjeu Eau), l'évaluation de systèmes de culture proposés en ateliers de co-conception et la réalisation d'un diagnostic agronomique par des étudiants. Si l'utilisation de l'outil par un agriculteur seul ne pose pas de difficultés, un changement de système de culture pour réduire la pression en adventices peut entrainer des changements de pratiques importants,

qui vont nécessiter un accompagnement par un conseiller et une évaluation d'autres critères de performance que la gestion de la pression adventice.

4. DECIFLORSYS : un outil synthétisant les connaissances de FLORSYS pour l'aide à la décision

4.1. Les besoins des utilisateurs : conilier facilité d'utilisation et prise en compte de la complexité de l'agroécosystème

L'outil d'aide à la décision OdERA (section 0) est un outil ergonomique et simple d'utilisation, notamment en atelier participatif avec des acteurs de terrain. Il a été construit à partir de connaissances d'experts sur l'effet des différentes composantes du système de culture sur l'infestation du champ par telle ou telle espèce adventice. Cependant, malgré la grande connaissance qu'ont les experts sur cette question, ils peuvent difficilement apprécier les effets à long terme et les interactions entre plusieurs techniques ou entre techniques d'une part et pédoclimat d'autre part, particulièrement dans un contexte de réchauffement climatique

A contrario, le modèle de recherche FLORSYS prédit finement ces interactions et effets à long terme (section 0). Cependant, FLORSYS est inadapté pour une utilisation en direct dans des ateliers participatifs car (1) le modèle n'a pas d'interface humain-machine, (2) il a besoin de nombreuses variables d'entrée souvent difficiles à renseigner, et (3) sa complexité rend les simulations très lentes.

L'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS (florsys.hub.inrae.fr/modeles-et-oad/deciflorsys) est un compromis entre facilité d'utilisation et la complexité de l'agroécosystème. Pour ce faire, FLORSYS a été transformé (« métamodélisé ») en un outil plus simple imitant le fonctionnement du modèle de recherche (**Figure 1**). Cette transformation est basée sur des analyses de sensibilité et de la fouille de données (arbres de régression et classification, forêts randomisées), et a été réalisée avec des conseillers et agriculteurs ainsi que des étudiants et chercheurs pour s'assurer que le nouvel outil d'aide à la décision réponde à leurs besoins et contraintes (Colas *et al*. 2020).

4.2. Une structure du modèle co-développé avec des utilisateurs

La structure de l'outil et son interface graphique continuent d'évoluer en fonction des retours des utilisateurs (Lefeuvre *et al*. 2023; Lefeuvre et *et al*. 2024). Dans la version actuelle de DECIFLORSYS, l'utilisateur :

- positionne sa parcelle sur une carte de France pour définir son pédolimat (avec la possibilité d'affiner les caractéristiques de son sol) ;
- décrit son système de culture existant en détail (comme FLORSYS) (**Figure 5**) dont les déterminants techniques majeurs sont identifiés (Figure 20). Ensuite, la multiperformance en termes d'indicateurs de (dis)services est estimée en quelques secondes par un calculateur à base de forêts randomisées à partir de méta-règles de décision à l'échelle de la rotation (Figure 15) similaires aux déterminants techniques des (dis)services des adventices identifiés à l'aide des simulations FLORSYS (par ex : proportion de cultures de printemps dans la rotation, fréquence de travail du sol superficiel, section 0) ;
- modifie ce système autant de fois qu'il le souhaite, en fonction des calculs de multiperformance accompagnant ces modifications (**Figure 6**).

Pour comprendre les résultats de l'étape 2 et guider l'étape 3, l'utilisateur a accès à des grilles de conseils classant les techniques culturales en fonction de leur impact sur les (dis)services liés aux adventices, avec les causes de ces impacts.

La version précédente de l'outil notamment incluait aussi un arbre de décision pour répondre à la question « quelles combinaisons de pratiques pour atteindre l'objectif X ? », dépendant des indicateurs que l'utilisateur voulait maximiser et son pédoclimat. Cet aspect s'est révélé comme inadapté lors des tests de DECIFLORSYS dans différentes situations d'usage (Lefeuvre *et al*. 2023; Lefeuvre et *et al*. 2024).

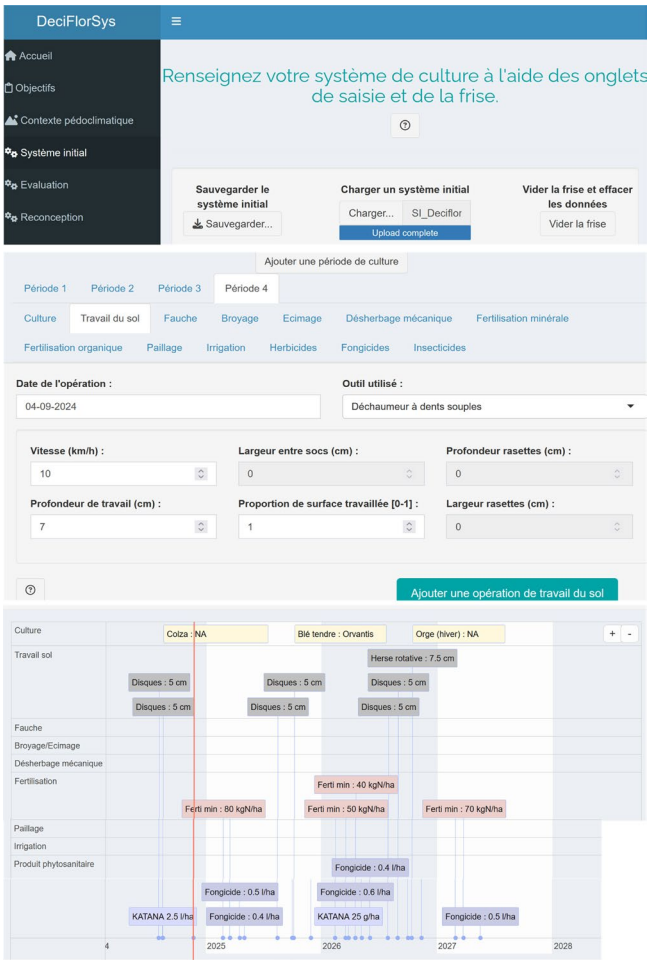


Figure 5 : Capture d'écran du logiciel DeciFlorSys évaluant l'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité à partir d'une description détaillée d'un système de culture existant ou prospectif. Ecran de saisie d'un système de culture et de visualisation sous forme de frise chronologique.

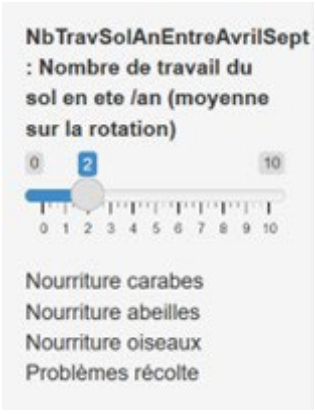


Figure 6 : Un des descripteurs synthétique du système de culture initial, sa position dans la gamme des systèmes utilisés pour la construction de DeciFlorSys,et les indicateurs de performance qui en dépendent. Extrait de l'onglet « Évaluation ».

	initial	modifie
Nourriture carabes	0.332	0.411
Nourriture abeilles	0.357	0.279
Nourriture oiseaux	0.191	0.250
Richesse spécifique adventices	0.384	0.436
Equitabilité de la flore	0.410	0.420
Perte rendement	0.733	0.706
Pollution récolte	0.328	0.320
Salissement champ	0.158	0.144
Problèmes récolte	0.338	0.324

Figure 7 : Comparaison multicritère du système de culture initial et d'un système alternatif dans l'onglet « Reconception » de DeciFlorSys. Initial Les indicateurs représentent des notes allant de 0 à 1 (performance la pire et la meilleure observée dans la base de systèmes de culture utilisée pour la construction de l'outil).

4.3. Quel rôle joue l'outil lors de la co-conception de systèmes de culture ?

Pendant le projet COPRAA, DECIFLORSYS a été utilisé avec plusieurs groupes d'agriculteurs pour co-concevoir des systèmes de culture économes en herbicides (Cavan et *et al*. 2024; Omon *et al*. 2024; Queyrel et *et al*. 2024). Grâce à sa vitesse de prédiction, il permet d'accélérer la boucle conception–évaluation de systèmes de culture, ce qui contribue à modifier les pratiques locales. L'outil a aussi un rôle pédagogique plus général, pour animer des collectifs d'agriculteurs et transférer les connaissances initialement synthétisées dans l'outil FLORSYS, lors de l'analyse des effets des modifications des techniques culturales et des tables de conseil inclus dans l'outil.

Cependant, bien que DECIFLORSYS sache classer les systèmes de culture en termes des impacts des adventices aussi bien que FLORSYS, cet outil ne permet ni de diagnostiquer les causes des performances des systèmes ni d'évaluer précisément les interactions avec le pédoclimat (Colas *et al*. 2020). En effet, DECIFLORSYS prédit directement les indicateurs de (dis)services sans passer par des variables illustrant les processus biophysiques responsables des effets des techniques culturales (**Figure 1**). Ceci peut être un problème pour des techniques qui interagissent fortement avec les états du milieu, comme par exemple la date du travail du sol avec l'humidité du sol. Dans ce cas, il faut retourner vers FLORSYS pour quantifier cette variabilité et identifier les conditions de réussite des pratiques, montrant ainsi la complémentarité entre les deux outils (Cavan et *et al*. 2024; Omon *et al*. 2024; Queyrel et *et al*. 2024).

5. OPTIFLORSYS : proposer au lieu d'évaluer des systèmes de culture

Les outils précédents évaluent des systèmes de culture existants ou des prototypes de systèmes conçus par différents acteurs plutôt que de proposer ou concevoir de tels systèmes (Colbach 2010). Le dernier outil présenté ici, OptiFlorSys (Maillot *et al*. 2024), constitue un changement de paradigme dans la mesure où il propose des systèmes de culture en répondant à question « que faut-il faire pour … ». OPTIFLORSYS est le résultat du couplage de FLORSYS avec des algorithmes d'optimisation, en l'occurrence des algorithmes génétique ou des lucioles (Chetty and Adewumi, 2013 ; West, 2019). Ces algorithmes améliorent pas-à-pas un système de culture initial renseigné par l'utilisateur pour optimiser simultanément des indicateurs d'impact des adventices choisis par l'utilisateur (ex., perte de rendement, indice de traitement herbicide), en modifiant des composantes du système de culture indiquées comme modifiables par l'utilisateur (ex. cultures de la rotation, dates de semis et de récolte, fertilisation azotée etc.).

Tableau 3 : Résumés des caractéristiques et complémentarités des 4 outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices

	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
Auteurs	Chercheurs	Ingénieurs, chercheurs, conseillers et agriculteurs		
Mode de construction	Résultats expérimentaux	Expertise	Fouille de données de milliers de simulations par FLORSYS	Couplage FLORSYS – algorithmes d'optimisation
Structure	Modèle de simulation du fonctionnement biophysique, mécaniste, combinant relations	Modèle empirique des risques malherbologiques en fonction des pratiques culturales	Modèle statistique des indicateurs de production et biodiversité en fonction des pratiques culturales	

	déterministes et stochastiques			
Évaluation	Comparaison à des observations de terrain	Comparaison à des observations de terrain	Comparaison aux simulations de FLORSYS	Comme FLORSYS
Échelle spatiale	Parcelle, îlot de parcelles	Parcelle		
Pas-de-temps	Jour	Décade	Pluriannuelle : notes par système de culture	Comme FLORSYS
Échelle temporelle	Pluriannuelle	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 Indicateurs d'impact sur la production agricole et la biodiversité	Risque en adventices, effet des différents leviers agronomiques	Indicateurs d'impact sur la production agricole et la biodiversité	Propostiion de systémes de culture répondant aux objectifs
Interface humain machine	non	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 - machine	Pas d'approche multicritère dans l'évaluation	Pas de diagnostic des causes des performances	Lenteur, complexité des sorties
Domaine de validité	Grandes cultures, France tempérée	Grandes cultures, France	Comme FLORSYS (sauf cultures associées, cultures mineures)	Comme FLORSYS
Utilisateurs	Chercheurs et instituts techniques	Conseillers, enseignants, étudiants et agriculteurs	Conseillers, agriculteurs, enseignants, chercheurs	Chercheurs, conseilleurs & agriculteurs dans le futur
Utilisation avec les agriculteurs	Occasionnelle	Fréquente, usage pour du conseil		Outil en cours de développement

OPTIFLORSYS est encore à l'état de prototype. Il présente une interface humain-machine co-développée avec les futurs utilisateurs (chercheurs, conseillers, agriculteurs, étudiants), en suivant le même principe que pour DECIFLORSYS (section 0). OPTIFLORSYS est décrit en détail par Maillot *et al* (2024) dans ce numéro, avec des exemples d'application.

6. Complémentarités des 4 outils

Le Tableau 3 synthétise les caractéristiques essentielles des 4 outils présentés ci-dessus, et identifie leurs complémentarités :

- l'avantage majeur de FLORSYS est la prise en compte des interactions entre les techniques culturales, et entre techniques d'une part et le pédoclimat d'autre part. Ceci lui permet non seulement de prédire des effets moyens mais aussi de prédire des probabilités et conditions de succès ou risques d'échec. Ce point est particulièrement important dans la mesure où les agriculteurs sont souvent plus intéressés à réduire le risque d'échecs ou la variabilité inter-annuelle de la production, que d'augmenter la production ou le revenu moyen (Ridier *et al*. 2013). Par sa conception sur la base des processus physiques et biologiques en jeu, FLORSYS

permet de prendre en compte une gamme de techniques culturales très larges, avec un niveau de précision qui peut se révéler décisif en matière de gestion durable de la flore adventice ;

- l'avantage d'OdERA est sa simplicité et sa rapidité de mise en œuvre. Il peut être utilisé comme outil d'aide à la décision auprès d'agriculteurs afin d'objectiver le discours du conseiller sur l'effet des différents leviers agronomiques sur la flore adventice. Il est possible de réaliser différents scénarios pour comparer différentes stratégies, ce qui lui confère une valeur didactique très utile pour l'accompagnement des agriculteurs ;
- DECIFLORSYS est un compromis entre les deux approches, conciliant la diversité des sorties de FLORSYS avec la rapidité et l'ergonomie d'un outil comme OdERA, mais au prix de la possibilité de diagnostic de FLORSYS ;
- OPTIFLORSYS présente un changement de paradigme en proposant des systèmes de culture répondant à des objectifs, au lieu d'évaluer la multiperformance de systèmes comme les 3 premiers, au prix d'une lenteur d'exécution encore pire que FLORSYS. En revanche, il tente de concilier la complexité de FLORSYS avec l'ergonomie d'un outil comme DECIFLORSYS.

7. Conclusion

La complexité du système « champ cultivé – adventices » en fait un candidat privilégié pour une approche de modélisation mécaniste. La modélisation des effets des pratiques agricoles sur la flore a beaucoup progressé au cours de la dernière décennie, et ceci même si le paramétrage des modèles était initialement confronté à un manque d'expertise sur la biologie et l'écologie des espèces adventices, sur la diversité des processus concernés. La structure de tels modèles permet d'inclure des nouvelles connaissances, comme récemment la prédation des semences adventices par les carabes (Perthame *et al*. 2024), la compétition plante–plante pour l'eau (Cournault *et al*. 2024) ou bien encore la multiplication végétative des adventices vivaces (Skorupinski *et al*. 2024).

La valorisation des modèles pour guider les décisions sur le terrain de façon opérationnelle nécessite des adaptations mobilisant des compétences spécifiques d'ergonomie, d'informatique, voire d'intelligence artificielle. En effet, il existe aujourd'hui beaucoup d'outils d'aide à la décision pour les conseillers et agriculteurs. Les retours que nous avons sont qu'au final ces outils sont très peu utilisés. Pour augmenter les chances que les outils soient utilisés, il est indispensable d'intégrer les utilisateurs continuellement lors de la conception, du développement et de l'amélioration de l'outil. Les cas d'OdERA et DECIFLORSYS ont ainsi montré que le contexte ou les priorités des utilisateurs peuvent changer entre la réalisation du cahier des charges et la sortie de l'outil. Parfois, c'est lorsque les utilisateurs ont une version quasi définitive de l'outil qu'ils découvrent de nouveaux usages. Les interactions avec les utilisateurs ont aussi montré qu'il faut des outils différents pour différents usages et utilisateurs, même pour la seule gestion des adventices. Les 4 outils présentés ici couvrent une telle diversité, en allant de l'analyse de processus biophysiques jusqu'à la co-conception de systèmes innovants.

Il s'agit donc d'un champ pluridisciplinaire grand ouvert, qui ne demande qu'à être exploré plus profondément, et ce d'autant que les besoins d'outils sur le terrain sont très importants, même s'ils ne sont pas toujours formalisés de façon explicite. Enfin, ces outils doivent être couplés avec d'autres outils d'évaluation pour aller d'une évaluation multicritère des impacts de la flore adventice vers une évaluation multicritère des trois piliers de la durabilité des systèmes de culture, et ce sans ressaisir plusieurs fois le même système de culture.

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

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X

Thibault MAILLOT : https://orcid.org/0000-0002-9689-9860

Delphine MOREAU : https://orcid.org/0000-0003-2640-9931

Jean VILLERD : https://orcid.org/0000-0001-7156-7512

Contributions des auteurs

NC, TM et JP ont écrit la première version, tous les auteurs ont relu et complété.

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

Ces outils sont le fruit de multiples projets au fil des années qui ne peuvent pas être listés ici. Cette synthèse a été rédigé dans le cadre du projet COPRAA financé l'Office Français de la Biodiversité dans le cadre de l'appel Ecophyto « Approches globales pour limiter l'utilisation des produits phytopharmaceutiques : Combiner les produits préventifs et curatifs dans les filières, de l'agriculteur au consommateur » lancé par les ministères français en charge de l'écologie, de l'agriculture, de la santé et de la recherche.

Références bibliographiques

Bergez J.E., Colbach N., Crespo O., Garcia F., Gary C., Jeuffroy M.-H., Justes E., Loyce C., Munier-Jolain N., & Sadok W. (2010). Designing crop management systems by simulation. European Journal of Agronomy, 32, 3-9.

Cavan N., & *et al*. (2024). Retour d'expériencesde conception de systèmes de culture innovants économes en hebricides avec des agriculteures : rôle des outils dans l'appui à l'animation. *Innovations agronomiques*.

Cavan N., Omon B., Dubois S., Toqué C., Van Inghelandt B., Queyrel W., Colbach N., & Angevin F. (2023). Model-based evaluation in terms of weed management and overall sustainability of cropping systems designed with three different approaches. Agricultural Systems, 208, 103637.

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. (2010). Modelling cropping system effects on crop pest dynamics: how to compromise between process analysis and decision aid. Plant Science, 179, 1-13.

Colbach N. (2022). Modelling the effects of cropping systems on weed dynamics: the trade-off between process analysis and decision support. In: Kudsk P. (éd.). Modelling the effects of cropping systems on weed dynamics: the trade-off between process analysis and decision support, 2022. 143-181.

Colbach N., Bertrand M., Busset H., Colas F., Dugué F., Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N.M., Noilhan C., Strbik F., & Gardarin A. (2016). Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. Environmental Modelling & Software, 86, 184-203.

Colbach N., Burstin J., & Moreau D. (2024). Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : exemple du pois associé au blé. *Innovations agronomiques*.

Colbach N., Busset H., Yamada O., Dürr C., & Caneill J. (2006). ALOMYSYS: Modelling black-grass (Alopecurus myosuroides Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate. II. Evaluation. European Journal of Agronomy, 24, 113-128.

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. (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. (2024). Est-ce que les systèmes de culture sans travail du sol ni herbicides sont possibles ? Une étude de simulation. *Innovations agronomiques*.

Colbach N., Cordeau S., Garrido A., Granger S., Laughlin D., Ricci B., Thomson F., & Messéan A. (2018). Landsharing vs landsparing: How to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. Agriculture, Ecosystems & Environment, 251, 203-217.

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., Darmency H., Fernier A., Granger S., Le Corre V., & Messéan A. (2017). Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. II. Effect on weed impacts on crop production and biodiversity. Environmental Science and Pollution Research, 24, 13121-13135.

Colbach N., Granger S., Guyot S.H.M., & Mézière D. (2014). A trait-based approach to explain weed species response to agricultural practices in a simulation study with a cropping system model. Agriculture, Ecosystems & Environment, 183, 197-204.

Colbach N., Omon B., & Duedal D. (2020). Retour de la pratique : Témoignage d'un agriculteur ayant participé à un groupe de conception de systèmes de culture à l'aide de modèles. *Innovations agronomiques*, 81, 201-208.

Cournault Q., Colbach N., & Moreau D. (2024). Comment modéliser la compétition pour l'eau dans l'optique d'identifier des stratégies de gestion des adventices à la fois agroécologiques et résilientes au changement climatique ? *Innovations agronomiques*.

Lançon J., Wéry J., Rapidel B., M A., Gérardeaux E., Gaborel C., Ballo D., & Fadegnon B. (2007). An improved methodology for integrated crop management systems. Agronomy for Sustainable Development, 27, 101-110.

Lebreton P., Bedoussac L., Bonnet C., Journet E.-P., Justes E., & Colbach N. (2024). Optimiser les traits et proportions d'espèces ainsi que les motifs de semis pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations bispécifiques de légumineuses et de céréales. *Innovations agronomiques*.

Lefeuvre T., & *et al*. (2024). Ateliers de co-conception : enseignements de 12 cas d'étude. *Innovations agronomiques*.

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.

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. (2024). OPTIFLORSYS : Un outil pour aider à la conception de stratégies de gestion d'adventices agroécologiques. *Innovations agronomiques*, in press.

Mézière D., Petit S., Granger S., Biju-Duval L., & Colbach N. (2015). Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. Ecological Indicators, 48, 157-170.

Omon B., Cavan N., Colbach N., & Angevin F. (2024). L'accompagnement de la transition vers des systèmes de culture gérant les adventices avec moins d'herbicides : quelle mobilisation de la connaissance, et des outils et modèles ? *Innovations agronomiques*.

Pernel J., Flament M., Boquet B., & Vandrisse S. (2022). OdERA, un outil pour concevoir des systèmes à plus faible pression en adventices. In: Végéphyl - 7è conférence sur les moyens alternatifs de protection pour une Production Intégrée, Lille, France (8-9 mars 2022).

Perthame L., Petit S., & Colbach N. (2024). La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture. *Innovations agronomiques*.

Queyrel W., & *et al*. (2024). Guide méthodologique d'aide à la conception pour des systèmes peu ou pas consommateurs d'herbicides. *Innovations agronomiques*.

Queyrel W., Van Inghelandt B., Colas F., Cavan N., Granger S., Guyot B., Reau R., Derrouch D., Chauvel B., Maillot T., & Colbach N. (2023). Combining expert knowledge and models in participatory workshops with farmers to design sustainable weed management strategies. Agricultural Systems, 208, 103645.

Ridier A., Ghali M.B.E., Nguyen G., & Kephaliacos C. (2013). The role of risk aversion and labor constraints in the adoption of low input practices supported by the CAP green payments in cash crop farms. Revue d'Études en Agriculture et Environnement, 94, 195-219.

Skorupinski S., Moreau D., & Colbach N. (2024). Titre à définir. *Innovations agronomiques*.

Pour citer cet article : Nathalie Colbach, Nicolas Cavan, Marie Flament, Thibault Maillot, Delphine Moreau, *et al*.. La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.119-134. 10.17180/ciag-2025-vol101-art11

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

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

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

Une analyse des situations d'usage pour concevoir des outils d'aide au changement de pratiques

Marianne CERF[1], Marie-Hélène JEUFFROY[2], Jean-Marc MEYNARD[1], Thibault LEFEUVRE[3], Wilfried QUEYREL[4], Lorène PROST[1]

[1] Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SAD-APT, 91120, Palaiseau, France

[2] Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Agronomie, 91120, Palaiseau, France

[3] AgroParisTech Innovation, IDEAS, 91120, Palaiseau, France

[4] Agroécologie, INRAE, Institut Agro Dijon, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

Correspondance : marianne.cerf@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art12

Résumé

Pour aider les agriculteurs dans leur changement de pratiques, un nombre croissant d'outils sont proposés aux agriculteurs et leurs conseillers. Un des enjeux est d'organiser la conception de ces outils pour qu'ils soutiennent effectivement et efficacement l'activité de celles et ceux qui souhaitent transformer leurs pratiques. Pour y répondre, nous mobilisons une approche fondée sur une analyse de l'activité que l'outil à concevoir doit aider à faire évoluer. Cette analyse met en lumière les « médiations » que l'outil peut contribuer à soutenir entre un acteur et l'objet de son action. A partir de trois projets réalisés (APPI'N, MoCoRiBa, DeciFlorSys), nous montrons les retombées de cette approche sur le processus de conception, en particulier sur : les propriétés de l'outil à concevoir et les médiations qu'il soutient, les formes d'implication des utilisateurs, l'activité des concepteurs.

Mots-clés : conception, activité, transition agroécologique, effet de fixation

Abstract: Analysis of use situations to design tools supporting a change in agricultural practices.

To help farmers change their practices, a growing number of tools are being offered to farmers and their advisors. One of the challenges is to design these tools so that they effectively and efficiently support the activity of those wishing to transform their practices. To meet this challenge, we use an approach based on an analysis of the activity that the tool to be designed should help to change. This analysis highlights the "mediations" that the tool can support between an actor and the object of his action. Based on three completed projects (APPI'N, MoCoRiBa, DeciFlorSys), we demonstrate the impact of this approach on the design process, in terms of: the properties of the tool to be designed and the mediations it supports, forms of user involvement, designer activity.

Keywords: design, activity, agroecological transition, fixation effect

1. Introduction

En vue de répondre aux défis considérables auxquels l'agriculture doit faire face (de l'adaptation au changement climatique à la réduction des impacts négatifs sur les ressources naturelles et la santé humaine), de nombreux acteurs du système de connaissance et d'innovation en agriculture proposent d'accompagner les agriculteurs et les conseillers pour faire évoluer les pratiques agricoles (Darnhofer, 2015 ; Tittonell *et al*., 2016). L'accompagnement au changement de pratiques fait l'objet de réflexions depuis longtemps (Darré, 1985 ; Compagnone, 2014 ; Quinio *et al*., 2021 ; Slimi *et al*., 2022). Cela s'est souvent traduit par la mise au point d'outils (indicateurs, systèmes experts, règles de décision, etc.)

pour soutenir les agriculteurs dans ce changement de pratiques. Dans la suite de cet article, nous nous focaliserons sur des outils qui s'appuient sur des connaissances sur le fonctionnement de systèmes complexes agricoles, pour accompagner des acteurs de terrain (agriculteurs, conseillers) à faire évoluer les pratiques agricoles.

Suite à de nombreux échecs dans la diffusion et l'utilisation d'outils d'aide à la décision, constatés dans les années 1990 et 2000, et à l'analyse faite de ces échecs (par exemple Mac Cown, 2001 ; Prost *et al*., 2011), l'idée d'associer les futurs utilisateurs dès la conception des outils est aujourd'hui largement admise. Elle est vue comme un moyen de réduire les risques de non usage des outils. Néanmoins, la participation n'est pas garante de l'adéquation de ces derniers aux besoins des utilisateurs. D'une part, parce que le travail de conception est réalisé le plus souvent en invitant des utilisateurs « leaders », enclins à expérimenter de nouvelles idées, mais pas forcément représentatifs de la diversité des utilisateurs potentiels des outils. D'autre part, parce que le test de l'outil peut se faire de façon relativement déconnectée des situations réelles de travail, et ne pas intégrer les contraintes propres à ces situations. Dès lors, la question est moins celle de la participation que celle de la capacité des concepteurs à se représenter les usages de leur outil en situation réelle de travail. De fait, au-delà de la présence des futurs utilisateurs dans le processus de conception, il est essentiel que la discussion au sein de ce processus de conception permette (i) d'instruire la façon de réaliser l'activité que le nouvel outil vise à soutenir et (ii) de tenir compte de la façon dont des utilisateurs peuvent poursuivre la conception dans l'usage (Beguin et Rabardel, 2001 ; Cerf et Meynard, 2006 ; Cerf *et al*. 2012 ; Meynard *et al*., 2023).

Comme mis en avant par Beguin et Cerf (2004), tout artefact destiné à être utilisé par des acteurs incorpore une représentation de l'utilisateur visé et de la façon dont il utilisera cet artefact. Prenons l'exemple d'un escalier : il incorpore de fait une représentation d'une personne valide et répond à des situations de dénivelé adaptées aux caractéristiques physiques de l'escalier (par exemple difficile pour l'élagage d'arbres). Les concepteurs peuvent adopter plusieurs stratégies pour se représenter l'utilisateur et l'usage (Akrich, 1993). Mais comment s'assurent-ils que la représentation qu'ils incorporent dans l'outil est suffisamment fidèle à son usage en situation réelle de travail, et éventuellement suffisamment ouverte pour répondre à une diversité de situations d'usage ?

Dans la suite, nous parlerons de « situation d'usage » pour rendre compte de la façon dont un acteur (un individu ou un collectif), devant faire face à une problématique de gestion d'un système complexe, mobilise un outil qui l'aide à résoudre cette problématique. Dit ainsi, la situation d'usage n'est pas centrée sur l'outil en cours de conception, mais sur l'activité instrumentée des personnes qui sont engagées dans la gestion de systèmes agricoles. Comment limiter les risques d'une projection erronée des concepteurs sur les situations d'usage ? Plusieurs travaux antérieurs (par ex Cerf *et al*., 2012) montrent qu'il est important de se doter d'un cadre d'analyse de la relation entre ce que cherche à faire un acteur, ce qu'il est, les outils qu'il mobilise pour atteindre ses finalités, et son environnement à la fois biophysique et socio-économique. Ce cadre sert d'appui pour étudier et représenter la diversité des situations d'usage futures. Il permet d'identifier des éléments clés à retenir pour enrichir le processus de conception compris ici comme un processus allant de l'identification d'un besoin à la production d'une version opérationnelle d'un prototype d'outil en passant par des phases d'idéation et de test de versions plus ou moins élaborées d'un outil.

Dans ce papier, nous nous appuierons sur plusieurs études de cas pour montrer et discuter les apports d'une démarche d'analyse de la diversité des situations d'usage à la conception d'outils destinés à aider des acteurs de terrain à changer des pratiques de gestion d'un système agricole. Nous préciserons avant cela ce qui fonde la démarche d'analyse mobilisée dans les cas d'étude pour étudier la diversité des situations d'usage. Nous présenterons ensuite les cas d'étude, en mettant en avant, pour chacun d'eux, la diversité des situations d'usage étudiées et en pointant ce que l'analyse permet de mettre en mouvement dans le processus de conception.

2. Quel regard porter sur les situations d'usage pour nourrir un processus de conception ?

2.1. Suffit-il d'associer les utilisateurs ?

Classiquement, la représentation des situations d'usage s'appuie sur la connaissance qu'ont les concepteurs des utilisateurs potentiels. Dans le cadre de projets dédiés à la conception d'outils d'aide en agriculture, les concepteurs et les utilisateurs potentiels de l'outil interagissent régulièrement dans le cadre du montage de projets, de travaux conjoints, ou d'échange d'expertises, en particulier chercheurs, ingénieurs des instituts techniques et conseillers. La prise de conscience de la faible appropriation d'un certain nombre d'outils a, de plus, souvent conduit les concepteurs à inclure, dans leurs projets, des conseillers ou des groupes d'agriculteurs susceptibles d'être intéressés par l'outil imaginé. Cependant cette interconnaissance ne se construit que rarement sur la base d'une analyse de la façon dont les acteurs, destinataires potentiels de l'outil en cours de conception, font face à des problèmes et mobilisent des outils dans leur activité quotidienne. Par ailleurs, dès lors que l'enjeu est d'accompagner un changement de pratiques plutôt que d'aider à améliorer les pratiques actuelles, les concepteurs peuvent considérer que l'analyse des pratiques actuelles ne permettra pas d'en tirer des enseignements puisqu'il s'agit d'aider à transformer ces pratiques. De plus, souvent, les concepteurs souhaitent mettre à disposition des nouvelles connaissances qu'ils ont produites et qui peuvent être mobilisées pour intégrer de nouveaux enjeux dans la gestion des systèmes agricoles. La mise en forme de ces connaissances dans un outil est déjà un défi du point de vue de leur validité dans une diversité de contextes agronomiques (Keating et Thorburn, 2018.). Mais il peut y avoir une confusion entre le besoin d'adaptation de l'outil à la diversité de ces contextes agronomiques, d'une part, et le besoin d'appréhender la diversité des situations d'usage telle que nous les avons définies, d'autre part. Ces dernières ne se réduisent pas aux situations agronomiques et à la façon dont elles peuvent se gérer pour plus de durabilité. De fait, s'intéresser aux situations d'usage dans le cas d'un changement de pratiques, nécessite de s'intéresser aux problèmes que les praticiens rencontrent quand ils souhaitent changer de pratiques. C'est aussi s'intéresser à ce qui pourrait être en tension, dans leurs façons de faire actuelles, s'il y avait un changement de pratiques.

Ce constat nous a incités, dans des travaux réalisés dans les années 2000 (Cerf *et al*., 2012), à étudier les situations d'usage à partir de l'analyse de l'activité de gestion des systèmes agricoles. Par gérer, nous entendons aussi bien des actions de pilotage d'un système, d'évaluation des pratiques mises en œuvre, de choix d'une stratégie de conduite du système, de conception de l'organisation de ce système, ou encore d'adaptation ou de conception de nouvelles pratiques. Ces actions sont autant de déclinaisons possibles de ce que « gérer » veut dire. Précisons aussi qu'un large spectre d'acteurs peuvent être impliqués dans la gestion d'un système agricole : ceux qui énoncent des normes à intégrer dans cette gestion, ceux qui prescrivent des règles de gestion, ceux qui accompagnent ou forment des agriculteurs à la gestion de leur système. Cela invite à s'intéresser à la façon dont ces différents acteurs interagissent avec les agriculteurs dans la gestion de leur système, mais aussi à questionner les contraintes et finalités spécifiques de l'action de chacun, contextualisée dans leurs organisations et missions respectives.

2.2. Accéder à l'activité des futurs utilisateurs

Notre approche de l'activité se fonde sur deux courants complémentaires dans le champ des théories de l'activité. Le premier, celui de la théorie instrumentale de l'activité (Rabardel, 1995), met l'accent sur les « genèses instrumentales », c'est-à-dire la façon dont un acteur se saisit d'un outil et dont son activité est transformée par cet outil au travers d'un processus d'appropriation. Ce processus d'appropriation met en jeu des dynamiques « développementales » tournées soit vers l'outil (il est doté de nouvelles propriétés ou fonctionnalités), soit vers le sujet (qui modifie son activité). Le second courant, celui de la théorie culturelle et historique de l'activité, met l'accent sur les dimensions systémique et collective de l'activité à travers la notion de système d'activité (Engeström, 1987). Dans

ces deux cadres d'analyse de l'activité, c'est par des médiations que l'individu atteint « l'objet de son action », cet objet étant à la fois ce qu'il cherche à faire (sa visée, par exemple ce que vise l'agriculteur quand il gère une parcelle ou sa ferme) et ce sur quoi il agit pour y parvenir (par exemple la parcelle ou la ferme). Ces médiations peuvent être le fait d'un outil, elles peuvent aussi être le fait d'autres acteurs. Lorsque les concepteurs souhaitent aider à transformer les pratiques d'un agriculteur, ils cherchent à faire évoluer l'objet de l'action de celui-ci et font le pari d'y parvenir grâce à leur outil. Mais l'outil va modifier les médiations existantes, et en proposer de nouvelles.

L'enjeu de l'analyse est alors de préciser les médiations qui sont à l'œuvre dans l'activité de gestion d'un système complexe agricole ciblée par l'outil en cours de conception afin de les rendre discutables dans le processus de conception Pour cela, la démarche d'analyse repose sur l'étude de la diversité (i) des façons de gérer le système complexe ou des façons d'accompagner cette gestion et son apprentissage, (ii) des outils déjà utilisés dans les activités mises en place en lien avec cette gestion, et (iii) de la façon dont ils sont mis en œuvre dans un ou des systèmes d'activité. Il est aussi possible de proposer d'analyser la façon dont un prototype de l'outil est mis en œuvre en « situation réelle ». Le recueil des données sur les situations d'usage repose le plus souvent sur des entretiens semi-directifs ou compréhensifs, en privilégiant le « comment vous vous y prenez pour gérer tel ou tel problème ?», en cherchant à identifier sur quoi et sur qui s'appuie le « comment », avant de demander « qu'est-ce qui justifie à vos yeux de s'y prendre ainsi ?». Parfois des observations de personnes en situation réelle de travail peuvent être réalisées, pour comprendre comment elles s'y prennent concrètement, plutôt que de les interroger sur le « comment elles font ».

2.3. Une analyse centrée sur les médiations en jeu dans l'usage des outils dans l'activité

Pour analyser ces données et les partager dans le processus de conception, nous avons progressivement identifié, au fil de nos différents projets de conception menés dans les années 2010, cinq types de médiation qui peuvent être impactées par les outils à concevoir, et qu'il y a lieu d'éclairer plus ou moins selon le type d'outil ou la dynamique de conception en cours (voir Figure 1). Ces différentes médiations sont inférées par l'analyste à partir des entretiens ou des observations faites lors du recueil de données sur l'activité conduite par les différents acteurs. L'activité des acteurs est abordée à travers ce qui est fait pour recueillir et traiter des informations sur les dynamiques du système à gérer en lien avec leurs objectifs de gestion de ces dynamiques. Nous en donnons ci-après une définition, avant d'illustrer comment elles s'instancient dans les cas présentés dans ce papier.

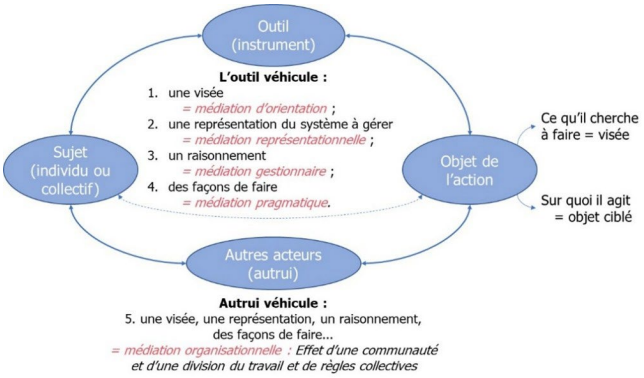


Figure 1 : Une représentation de l'activité à partir des médiations entre le sujet et l'objet de son action.

Médiation 1 ou d'orientation : l'outil incorpore et véhicule une définition de la visée de l'action (e.g. éviter les pertes azotées dans le sol et l'air et valoriser au mieux l'azote dans la plante lors d'une action de fertilisation) et de l'efficacité de l'action, par exemple au travers des critères qui vont servir à évaluer la façon de gérer le système complexe (e.g. l'outil met en avant des critères techniques, économiques, environnementaux, de qualité de vie au travail, etc.).

Médiation 2 ou représentationnelle : l'outil incorpore et véhicule une représentation du système à gérer (e.g. une représentation du champ cultivé, centrée sur la gestion des adventices) et des effets des actions sur ce système (e.g. façon dont les pratiques de l'agriculteur influent sur le devenir de la flore dans le temps).

Médiation 3 ou gestionnaire : l'outil incorpore et véhicule un raisonnement pour agir dans une situation donnée (e.g. l'outil s'appuie sur une analyse fréquentielle du climat pour orienter vers une règle d'action d'un traitement phytosanitaire, ou bien sur une analyse du devenir de la flore adventice à moyen terme ou sur la possibilité d'une perte d'efficacité de la conversion de l'azote dans la plante).

Médiation 4 ou pragmatique : l'outil s'accompagne de modalités de mise en œuvre (e.g. s'agit-il d'échantillonner sur chaque parcelle ou à l'échelle de la ferme ? Faut-il un traitement particulier de ces échantillons pour avoir l'information qui sera à rentrer dans l'outil ? Avec quelle précision faut-il renseigner l'outil ? Quel temps prend le traitement de l'information ? Quels outils existent déjà pour cela ?)

Médiation 5 ou organisationnelle : ce sont les autres acteurs qui créent ce type de médiation (e.g. en proposant une détection précoce d'un risque phytosanitaire sur un réseau de parcelles, la coopérative définit un critère d'efficacité de l'action de traitement à venir, fondé sur ses propres attentes en matière de qualité sanitaire de la production. Elle peut proposer des règles d'apport d'un traitement ou de suivi de l'évolution d'un risque. Elle peut éventuellement proposer d'intervenir directement en fournissant un service d'entreprise de travaux agricoles). Ainsi, autrui peut configurer l'ensemble des médiations précédentes.

Dans ce qui suit, nous mettons en exergue ce qu'apporte une telle analyse au processus de conception dans trois cas d'étude en nous appuyant : (i) sur la façon dont ont été valorisés les résultats produits par l'analyse; (ii) sur les évolutions qui sont apportées à l'idée d'outil ou à son « apparence », (iii) mais aussi sur ce que les concepteurs peuvent pointer comme apport de l'analyse à leur propre activité, que cela soit évoqué lors d'entretiens réalisés *ex-post* ou lors des échanges au cours du processus de conception.

3. Trois cas de développement d'outils pour accompagner le changement de pratiques

Nous avons retenu trois cas, différant par les conditions de réalisation de l'analyse des situations d'usage, mais aussi par les effets de cette analyse sur le processus de conception. Signalons néanmoins que tous les projets sont portés par des agronomes et associent différents partenaires de la R&D, du conseil et de l'enseignement agricole. Les auteurs de cet article ont été impliqués dans au moins un de ces cas, et en particulier dans la réalisation de l'analyse de la diversité des situations d'usage. Le premier cas est le travail réalisé pour développer une nouvelle façon de gérer la fertilisation azotée dans le cadre du projet APPI'N. Le deuxième concerne le développement d'un outil d'aide à la décision pour une nouvelle gestion de la flore adventices, l'outil DeciFlorSys. Enfin, le troisième cas porte sur l'analyse conduite dans le cadre du projet MoCoRiBa visant à proposer une nouvelle façon de gérer un pool de maladies et de ravageurs des cultures.

Nous présentons les cas dans le tableau 1 en mettant en avant différentes dimensions susceptibles de contribuer à la relation entre analyse des situations d'usage et dynamique de conception. Les dimensions retenues pour présenter la dynamique de conception, au-delà d'éléments factuels touchant aux enjeux que cherche à adresser l'outil, et la forme qu'il prend à la fin de notre implication dans le projet, renvoient à la dynamique socio-cognitive et aux cadres organisationnels et institutionnels présents dans les projets de conception. Elles sont des indicateurs des contraintes et ressources existantes, des attentes des concepteurs des outils, des choix opérés dans l'analyse des situations d'usage et dans la façon de la restituer au sein du projet.

Tableau 1 : Présentation synthétique de la façon dont l'analyse des situations d'usage a été initiée, conduite et valorisée dans trois cas d'étude : APPI'N, DeciFlorSys, MoCoRiba

Dimension	APPI'N	DeciFlorSys	MoCoRiBa
Contexte du	Collaboration INRAE-Arvalis	Développement d'un outil basé	Projet ANR porté par INRAE pour

projet	pour améliorer la gestion de la fertilisation azotée sur blé et dépasser les limites de la méthode du Bilan, principal outil de gestion de la fertilisation. Analyse de situations d'usage portée par les chercheurs impliqués dans la conception	sur FlorSys (Colbach *et al*., 2019) pour une gestion des adventices plus rapide et accessible. Analyse des situations d'usage demandée en prestation à la plateforme IDEAS pour concevoir l'interface.	concevoir un outil d'aide à la décision pour la gestion des bioagresseurs. Collaboration avec instituts techniques, conseillers agricoles et éditeurs de logiciels. Analyse des situations d'usage déléguée à des personnes non impliquées par ailleurs dans le projet.
Objectif initial des concepteurs	Concevoir un outil d'aide à la décision qui dépasse les limites de la méthode du Bilan en proposant une approche alternative de la gestion de la fertilisation azotée, plus adaptée aux pratiques des agriculteurs et aux contraintes environnementales.	Transformer le modèle de simulation FlorSys en un outil ergonomique et rapide d'évaluation des systèmes de culture, permettant aux utilisateurs d'optimiser la gestion de la flore adventice tout en intégrant leurs contraintes et leurs logiques de décision.	Concevoir un outil d'aide à la décision basé sur les données et modèles existants, permettant aux agriculteurs et conseillers d'estimer les risques liés aux bioagresseurs et d'adapter leurs pratiques en vue d'une réduction durable de l'usage des pesticides.
Positionnement de l'analyse des situations d'usage dans le processus de conception	En amont de la conception d'un outil d'aide à la décision, avec possibilité de mobiliser des connaissances théoriques et modèle préexistants.	Après une première version sans interface, pour concevoir une interface adaptée aux utilisateurs.	En amont du développement de l'outil, pour aider à préciser les objectifs de conception.
Prototype existant ?	Pas d'outil préexistant, mais des simulations (Azodyn-blé) montrant que des stratégies de fertilisation différentes de celles du Bilan conduisaient à de meilleures performances.	Première maquette existante mais pas encore d'interface ergonomique.	Idée ouverte au départ, outil encore en gestation.
Informations recherchées via l'analyse des situations d'usage	Comprendre les problèmes des agriculteurs avec la méthode du Bilan, identifier des pratiques alternatives et analyser les controverses sur la fertilisation.	Étudier les écarts entre la perception des utilisateurs et la représentation du système inscrite dans le prototype, vérifier la clarté des informations et la pertinence des critères d'évaluation.	Identifier les pratiques et ressources mobilisées pour la gestion des bioagresseurs, comprendre comment les décisions sont prises et évaluer l'intégration de la réduction des pesticides dans les pratiques existantes.
Moyens pour analyser la diversité des situations d'usage	17 conseillers et 25 agriculteurs interviewés, analyse des rapports GREN pour comprendre les controverses et les pratiques de fertilisation azotée.	Ateliers collectifs avec manipulation de maquettes, tests (« test gribouillage », « test vocabulaire ») pour explorer l'usage potentiel de l'outil.	Enquêtes auprès de 23 agriculteurs, 13 conseillers et 8 concepteurs d'OAD pour analyser la gestion des bioagresseurs et les pratiques de conseil.
Avancées relatives à la Médiation 1	Identification de critères de satisfaction consensuels pour une fertilisation efficace : rendement, protéines, efficience de l'azote.	Analyse des critères d'efficacité pour la gestion des adventices : type de flore, densité, seuil d'intervention.	Mise à jour des leviers mobilisés par des agriculteurs réduisant les pesticides : leviers stratégiques et tactiques, diversité des sources d'information.
Avancées relatives à la Médiation 2	Nécessité d'un outil basé sur une autre représentation que la méthode du Bilan.	Etude des décalages entre les représentations des utilisateurs et celles du prototype.	Non traitée spécifiquement dans l'analyse des situations d'usage.
Avancées relatives à la Médiation 3	Remise en question d'une approche basée sur une évaluation a priori de la dose totale à apporter et sur une	Analyse du raisonnement et des critères des agriculteurs et conseillers pour déclencher une décision (seuil d'intervention)	Caractérisation des raisonnements mis en œuvre dans les pratiques de conseil et des outils existants pour la

	estimation du rendement dès février.		gestion des bioagresseurs.
Avancées relatives à la Médiation 4	Non traitée dans l'analyse des situations d'usage traitée par la suite via test de prototype	Evaluation de la clarté des termes, enchaînement des écrans, facilité de saisie et de lecture des résultats.	Non traitée par l'analyse des situations d'usage, traitée par la suite via test de prototype
Avancées relatives à la Médiation 5	Importance, pour les pouvoirs publics, d'un outil dont les bases théoriques soient partagées avec la communauté scientifique.	Analyse de la vision portée par les conseillers, et de l'usage de l'outil pour favoriser de nouveaux apprentissages (formation des agriculteurs et conseillers).	Mise à jour de la diversité des représentations de la gestion des bioagresseurs entre acteurs et de la distribution des rôles dans le conseil.
Restitution de l'analyse des situations d'usage	Présentation aux chercheurs et acteurs R&D, mise en avant des controverses et proposition d'une méthode sans objectif de rendement ni RSH. Groupe ensuite mobilisé pour la conception.	Restitution aux partenaires du projet, mise en évidence des décalages repérés sur les critères d'évaluation (impact agronomique, biodiversité) et dans le mode de raisonnement stratégique. Mise en évidence de de la diversité des collectifs et des niveaux de rupture recherchés pour gérer les adventices. Identification de l'intérêt de l'outil pour la formation.	Restitution avant atelier d'idéation pour affiner l'orientation du projet.
Effets sur le processus de conception	Formulation de l'inconnu désirable pour la conception du nouvel outil et critères d'évaluation à prendre en compte.	Processus itératif d'amélioration du prototype, intégration de scénarios de conseil et formation associée.	Redéfinition de l'objectif de l'outil vers un outil de positionnement des pratiques par rapport à celles de pairs.
Suite	Développement d'un nouvel outil de fertilisation basé sur les résultats de l'analyse des situations d'usage.	Création d'un guide d'utilisation (Nidriche *et al*., 2024) et d'une formation sur la gestion de la flore adventice.	Développement du prototype et test en situation réelle avec des conseillers.

4. Quels enseignements tirer de ces trois exemples ?

Comme précisé dans le choix des cas, ceux-ci se rapportent à la conception d'outils qui visent à aider les acteurs agricoles à faire des choix de pratiques pour gérer un système complexe. APPI'N vise à aider les agriculteurs et conseillers à gérer la fertilisation azotée en intégrant des connaissances sur la tolérance du blé à des carences temporaires et sur les phénomènes de volatilisation et lixiviation. DeciFlorSys vise à développer de nouvelles stratégies de gestion des adventices en limitant les traitements, tout en valorisant des services rendus par les adventices à la faune auxiliaire. MoCoRiBa vise à aider les agriculteurs à gérer un pool de bioagresseurs en valorisant les connaissances sur leurs dynamiques tout en visant à réduire l'usage de produits phytosanitaires.

4.1. Analyser les médiations : explorer les invariants et les différences au sein de la diversité des situations d'usage

Dans chacun des projets, comme le montre leur présentation ci-dessus, la phase d'analyse réalisée couvre au moins 4 médiations. Ces dernières viennent éclairer : ce qui est déjà représenté dans l'outil existant (DeciFlorSys) ; ce qui est projeté dans l'outil à concevoir (MoCoRiBa) ou ce qui peut s'avérer problématique dans la mise en œuvre d'outils largement recommandés (APPI'N). Soulignons que, dans les trois cas, les données recueillies concernent l'usage possible de l'outil tant par des agriculteurs que des conseillers ou des enseignants, voire dans APPI'N par des acteurs publics pour éclairer à la fois une diversité de publics ciblés mais aussi, pour chaque public, une diversité de situations d'usage.

Cette diversité permet à l'analyste de repérer, dans les médiations mises en évidence, les invariants et les différences susceptibles de questionner les choix de conception à réaliser. Passer par les médiations permet aussi de relativiser la façon dont le statut professionnel ou le contexte d'usage plus largement, influent ou non sur la façon dont sont mobilisés les outils en situation réelle de travail.

Dans les trois projets, nous avons ainsi :

- éclairé la diversité des visées et résultats attendus de l'activité c'est-à-dire la diversité des médiations de type 1 mais aussi parfois leur convergence. Ce faisant, de nouveaux usages possibles peuvent émerger. Ainsi dans DeciFlorSys, l'analyse souligne qu'outre l'enjeu de concevoir des systèmes de culture, apparaît la visée de former des agriculteurs à d'autres principes et critères de raisonnement de la gestion de la flore adventice que ce soit à la demande des conseillers ou d'autres acteurs. Dans MoCoRiBa, certains agriculteurs expriment leur souhait d'une aide stratégique pour y voir plus clair sur les risques encourus, les nuisibilités effectives, visée qui n'avait pas été imaginée par les concepteurs. Peuvent également ressortir des attentes partagées sur les résultats attendus à intégrer dans l'objet à concevoir. Ainsi, dans APPI'N, l'analyse pointe que l'ensemble des acteurs convergent vers trois critères importants (rendement, qualité protéique, efficience de l'azote) pour leur gestion de la fertilisation azotée ;
- étudié les représentations et raisonnements mobilisés c'est-à-dire les médiations de type 2 et 3 et en quoi elles diffèrent de celles des concepteurs. Dans le cas Appi'N, les acteurs font part de leurs difficultés sur certains éléments de raisonnement mobilisés dans le bilan méthode de gestion de la fertilisation recommandée par les pouvoirs publics (objectif de rendement difficile à établir, confiance accordée aux mesures de reliquat d'azote minéral en sortie d'hiver). Pour DeciFlorSys, l'analyse met en lumière que le diagnostic fait par des agriculteurs ou des conseillers repose souvent sur une observation de la densité d'adventices, et une difficulté à se représenter l'évolution du stock de semences. Elle met aussi en lumière la difficulté à s'approprier les arbres de décision proposés par les chercheurs dans le prototype de l'outil, et la différence de vocabulaire pour parler du système de culture et de la gestion des adventices. Pour MoCoRiBa, les entretiens avec les différents acteurs montrent que les données en cours de saison (présence de ravageurs ou de symptômes) sont les plus utilisées pour le conseil et dans les outils alimentant des décisions tactiques (traiter ou ne pas traiter) alors que les agriculteurs enquêtés expliquent bien à quel point ils se nourrissent d'informations qui vont bien au-delà d'une information immédiate sur l'état sanitaire de leur parcelle ou du paysage ;
- mis en évidence des contraintes opérationnelles (médiations de type 4) propres à un type d'acteurs ou communes à la diversité des acteurs étudiés ainsi que l'organisation collective autour des outils qui permet d'éclairer comment s'opèrent les médiations de type 5. Dans APPI'N, l'analyse pointe une organisation du travail qui sort du périmètre strict de la R&D et du conseil et met en lumière comment des outils viennent s'inscrire dans une activité à caractère plus réglementaire, celle des GREN. Dans MoCoRiBa, l'étude souligne le rôle des conseillers dans la collecte et le traitement de l'information et l'abondance d'outils disponibles pour alimenter les décisions tactiques de gestion des bioagresseurs des agriculteurs. Elle permet de décrire comment s'organisent et se distribuent entre les acteurs le recueil de l'information et son traitement, les outils déjà existants pour ce faire, et les contributions respectives des acteurs dans les choix à opérer pour gérer le système. Dans DeciFlorSys, les contraintes sont plutôt du côté de l'interprétation des résultats fournis et quelles personnes peuvent contribuer à celle-ci.

4.2. Un choix opéré dans la valorisation des médiations analysées dans la suite du projet de conception

L'ensemble des médiations identifiées dans l'analyse n'est pas toujours pris en compte lors de la restitution auprès des concepteurs, ou dans l'évolution du projet de conception. Ainsi, dans

DeciFlorSys, la restitution de l'analyse se fait lors d'ateliers ou de réunions du projet. Elle met l'accent sur l'existence de différents types d'activités, par exemple en demandant aux partenaires de se projeter dans ces activités (conception collective avec un groupe d'agriculteurs, conception entre expérimentateurs, animation d'une formation). Les écarts constatés entre la façon dont l'outil prend en charge certaines médiations (les représentations du système ou les critères d'efficacité de l'action) et celles identifiées dans l'analyse des situations d'usages sont pris en compte par les concepteurs pour apporter des modifications à l'interface utilisateur (suppression des arbres de décision dans la version standard de l'interface) mais aussi pour concevoir une formation sur la prise en compte du rôle des adventices dans la gestion de la biodiversité fonctionnelle. Dans APPI'N, la restitution met en avant une difficulté transverse à l'ensemble des acteurs (agriculteurs, conseillers, GREN) qui sert de base aux concepteurs pour lancer une idéation autour d'un nouveau concept (une méthode sans objectif de rendement, sans mesure du Reliquat d'azote minéral dans le sol en Sortie d'Hiver - RSH). Dans MoCoRiBa, la restitution pointe un usage potentiel souhaité et non envisagé jusqu'ici par les concepteurs (aide à la décision stratégique) et met le collectif en travail sur la diversité des systèmes d'activité susceptibles de valoriser des connaissances sur l'épidémiologie des maladies et ravageurs dans une approche stratégique de leur gestion.

Ces différences dans la façon de mettre en avant et en discussion certaines médiations semblent liées à trois facteurs principaux qui ne sont pas indépendants : (i) ce qui est déjà connu sur la diversité des situations d'usage au moment où la démarche est mise en œuvre, (ii) ce qui est attendu comme retour pour faire évoluer le processus de conception (cela peut concerner la construction même de l'artefact, les acteurs à mobiliser, la façon d'expérimenter un prototype, l'évolution des pratiques de conception, etc.), (iii) l'existence ou non d'un prototype à tester.

Pour MoCoRiBa, le concept de l'outil à concevoir était très peu avancé lorsque l'analyse de l'activité a été réalisée par un CDD au sein de la plateforme IDEAS, à la demande de porteurs de projet. Il était plutôt orienté vers la gestion tactique des bioagresseurs, qui s'est avérée peu pertinente pour les agriculteurs ayant déjà réduit l'usage des pesticides. Il a donc été choisi de mettre en avant comment des agriculteurs qui utilisent peu, voire pas de pesticides, gèrent leurs bioagresseurs et les problèmes qu'ils évoquent, pour orienter les réflexions encore très ouvertes des concepteurs. Parallèlement, la restitution a mis en avant la diversité des façons dont les agriculteurs et leurs conseillers se représentent cette gestion et les différentes personnes influant sur les décisions de l'agriculteur.

Pour APPI'N, les concepteurs avaient développé un modèle dynamique de l'azote dans les plantes et cela a influé sur leur choix de concevoir un outil s'appuyant sur cette dynamique (accepter des carences non préjudiciables ; favoriser les apports en période de croissance importante de la cuture en se basant sur la corrélation entre vitesse de croissance des plantes et efficience de l'engrais). Néanmoins, leurs travaux antérieurs leur ont permis de constater que ce modèle, en tant que tel, n'est pas mobilisable par les agriculteurs ou leurs conseillers. Ils dégagent de l'analyse des médiations plusieurs critères d'intérêt pour développer une nouvelle méthode. Celle-ci doit permettre une bonne efficience d'utilisation de l'azote tenant compte des périodes de sécheresse possibles, être orientée vers la prise en compte de la dynamique des processus au champ, et sans objectif de rendement et RSH. La présentation des constats relatifs aux limites du Bilan pour une diversité d'usages, et leur partage avant l'atelier d'idéation, a permis d'enrôler les acteurs (chercheurs, ingénieurs R&D, conseillers) pour explorer d'autres pistes que l'amélioration continue du Bilan dans laquelle ils étaient engagés depuis longtemps.

Dans DeciFlorSys, les concepteurs souhaitaient valoriser un modèle existant, FlorSys. Ils avaient déjà réalisé des enquêtes auprès d'agriculteurs et de conseillers pour envisager une première version d'un outil fondé sur le modèle, et proposant une réflexion pour définir un système de culture permettant de gérer différents niveaux de compromis entre des impacts agronomiques et environnementaux des adventices annuelles. L'analyse de l'activité par un chargé d'innovation de la Plateforme IDEAS en prestation de service, conduite lors d'ateliers permettant à des partenaires ayant une pratique de

conception de systèmes de culture d'utiliser l'outil (en version « papier » ou avec un premier prototype informatisé), s'est faite en direct, en présence des concepteurs. Ainsi, ces derniers en tiraient rapidement des enseignements, soit sur le plan de l'adéquation du mode de représentation du système de culture, soit concernant la manipulation de l'outil. Dans la restitution de nos propres observations, nous avons plutôt mis en avant les décalages entre les critères d'évaluation des agriculteurs et conseillers d'une part (type de flore et densité), des concepteurs de l'autre (impacts agronomiques et environnementaux), ou encore entre leurs raisonnements respectifs (tactique versus stratégique) de la gestion de la flore. Les concepteurs ont réinvesti ces éléments pour envisager l'usage de l'outil pour former à un nouveau raisonnement des façons de gérer les adventices dans un système de culture.

4.3. Les effets produits sur le processus de conception sont variés

Nous observons finalement quatre grands types d'effets engendrés par l'analyse de la diversité et sa restitution pour une valorisation dans le processus de conception.

Un premier effet est de permettre aux concepteurs de se défixer par rapport à l'usage envisagé ou incorporé dans des premières versions de l'outil. Par exemple, dans le cas MoCoRiBa, les concepteurs prennent conscience que leur choix d'aider à une décision tactique n'est en fait pas nécessairement ce qui va être le plus pertinent en regard de leur visée d'aider à transformer les pratiques pour réduire l'usage de produits phytosanitaires.

Un deuxième type d'effets est d'identifier la dimension systémique et collective de l'activité de gestion d'un système complexe. Dans les cas étudiés, les projets avaient généralement associé une diversité d'acteurs, mais sans toujours questionner la façon dont ceux-ci collaboraient entre eux, en quoi ils pouvaient ou non être en interaction lors de l'utilisation de l'outil et de quelles ressources ils pouvaient avoir besoin pour en faire un instrument de leur activité. La prise en compte de cette dimension collective et systémique de l'activité de gestion a été traitée, soit en l'intégrant dans la phase d'idéation (APPI'N, MoCoRiBa), soit en s'interrogeant sur la place du concepteur dans cette activité collective et systémique en lien avec le souhait de transmission de l'outil. Ainsi dans DeciFlorSys, le développement de scénarios pédagogiques de formation (Pleux, 2021) ou l'écriture du guide d'utilisation (Nidriche *et al*., 2024) traduisent la nécessité ressentie d'aller au-delà de la mise à disposition d'un modèle comme FlorSys.

Un troisième effet est la réponse qu'apportent les concepteurs au constat des écarts entre leur façon de représenter le fonctionnement de l'agroécosystème en lien avec des enjeux d'une gestion durable, et celle(s) des utilisateurs selon leurs propres enjeux. Parfois ces écarts sont pris en compte pour identifier des propriétés ou des fonctionnalités de l'outil et aider à défixer d'une représentation centrée sur le compartiment sol, comme dans APPI'N. Le constat peut conduire à proposer d'accompagner les acteurs via une formation, par exemple comme dans le cas de DeciFlorSys.

Un quatrième effet s'observe dans les choix de conception faits pour traiter des écarts constatés en particulier quand ils touchent aux critères d'efficacité et/ou aux moyens d'action pour gérer l'agroécosystème durablement. Ainsi, dans APPI'N, les concepteurs se sont orientés vers un outil qui tout en aidant à gérer la fertilisation, peut soutenir des apprentissages concernant la tolérance aux carences temporaires. Dans DeciFlorSys, une réflexion sur la façon d'enchaîner les étapes du raisonnement a été conduite pour s'adapter à la façon dont les acteurs peuvent s'approprier le raisonnement suivi pour évaluer l'impact agronomique et environnemental de la combinaison de pratiques choisie. Dans MoCoRiBa, il s'agit d'imaginer comment l'outil pourra aider à passer d'une gestion tactique à une gestion stratégique.

Il est rare cependant que les effets produits aient été totalement anticipés. Certes, dans APPI'N, les concepteurs en réalisant eux-mêmes l'analyse des situations d'usage, anticipaient d'en tirer des pistes d'exploration de nouveaux concepts d'outils, mais sans une idée préconçue de celles-ci. Dans les autres cas, où les personnes qui réalisent l'analyse ne sont pas directement impliquées dans la conception de l'outil, l'anticipation des effets est plus difficile. Et *in fine*, les effets réels sur l'outil peuvent

s'avérer mineurs au regard des décalages pourtant mis en évidence entre ce que projettent les concepteurs et ce qui est effectivement réalisé dans l'activité de gestion qu'ils cherchent à outiller. C'est particulièrement le cas lorsque l'analyse de la diversité des situations d'usage arrive à un stade où l'outil est déjà un prototype informatisé. Dans le cas de DeciFlorSys, le décalage perçu sur la façon d'appréhender la flore adventice au champ par rapport à la façon dont l'outil aide à conduire le raisonnement se traduit par des changements plutôt mineurs dans l'outil, mais donne lieu à une réflexion sur une formation. Lorsque l'outil est peu développé, comme dans APPI'N ou MoCoRiBa, l'analyse peut plus facilement être source de défixation. Si c'est totalement recherché dans APPI'N, c'est potentiellement fortuit dans MoCoRiBa, où des difficultés de modélisation rencontrées ont aussi joué pour favoriser une réorientation du projet sur la base des résultats de l'analyse des situations d'usage.

5. Discussion

Nous nous sommes appuyés sur trois cas d'étude pour montrer les apports d'une analyse de la diversité des situations d'usage. Dans ces cas d'étude, les concepteurs étaient tous acquis à l'intérêt d'intégrer des utilisateurs, dans le projet de conception. De fait, chaque projet de conception associait des chercheurs, des acteurs de la R&D et du conseil, et des groupes d'agriculteurs ou d'étudiants. Néanmoins, dans ces projets, s'est posée la question de la façon de se représenter les situations d'usage et l'usage des outils. La proposition faite a été de considérer la situation d'usage en référence à l'activité instrumentée développée par des acteurs pour faire face à un problème lié à la gestion d'un système complexe. L'analyse des situations d'usage produit un changement de perspective dans le processus de conception : on ne cherche pas à analyser directement l'usage de l'outil en cours de conception, mais à analyser l'activité de ceux qui pourraient s'appuyer sur cet outil en vue de décider la façon de gérer leur système complexe.

Dans les cas étudiés, la démarche d'analyse s'appuie toujours sur : (i) la caractérisation d'une diversité d'acteurs, de leur activité et des finalités que ces acteurs poursuivent, (ii) l'identification des conditions d'accès à des outils et à d'autres personnes ; (iii) la façon de mobiliser ces outils et personnes. Cependant, caractériser la diversité n'est pas une fin en soi. Il s'agit de permettre aux concepteurs de faire des choix quant à leur façon de la prendre en compte dans le processus de conception. Dans nos trois cas, les concepteurs souhaitent, par leur outil, permettre aux acteurs de prendre des décisions qui tiennent compte d'enjeux liés à la gestion durable des agroécosystèmes. Cependant, ils ne se projettent pas toujours dans les transformations des médiations qu'ils induisent via l'outil qu'ils conçoivent. La démarche d'analyse des situations d'usage permet de saisir les écarts et convergences entre les médiations existantes pour des utilisateurs qui ont une gestion durable de leur agroécosystème ou non, et celles que les concepteurs souhaitent incorporer dans l'outil. En pointant les transformations nécessaires pour s'approprier de nouvelles façons de se représenter ce qui est à gérer dans le système, de nouvelles finalités assignées à cette gestion ou encore de nouvelles façons de gérer, l'analyse produit des éléments pour discuter sur les conditions et modalités à imaginer pour que les outils soient appropriés au double sens d'adéquats par rapport aux médiations portées par un outil, et de l'intégration de l'outil dans l'activité. Or c'est bien une condition pour que les outils soient appropriés. Ainsi, l'analyse de l'activité permet de sortir d'une question d'acceptabilité pour aborder celle de l'inscription d'un outil dans l'activité, c'est-à-dire comme l'a mis en évidence Rabardel (1995) d'ouvrir sur des genèses instrumentales par l'acteur, en vue de transformer l'outil en une ressource efficace et effective dans l'action.

Le changement de perspective lié à l'analyse des médiations dans une diversité de situations d'usage conduit tout d'abord à ouvrir différentes pistes du point de vue de la conduite du processus de conception : (i) des pistes d'exploration possibles dès lors qu'on repère que les outils existants sont insuffisants et peuvent être des obstacles pour intégrer ces enjeux (APPI'N) ou qu'on identifie des raisonnements et modes de gestion originaux mis en œuvre par certains agriculteurs (MoCoRiBa) ; (ii) des pistes sur la façon d'assurer le fonctionnement de l'outil en routine, dès lors que les systèmes de

recueil et de traitement de l'information se trouvent soit confortés, soit réinterrogés par ce qui a été imaginé (DeciFlorSys); (iii) des pistes de modalités de test en situation réelle d'usage de l'outil pour comprendre les modalités d'appropriation de l'outil et faire évoluer ce dernier en regard de ces modalités (DeciFlorSys, APPI'N, et récemment MoCoRiBa) ; (iv) des pistes sur les utilisateurs à associer dans la suite du processus de conception même si cela a été peu mis en avant dans ce papier. En effet, la caractérisation des médiations de type 5, peut amener à une réflexion sur les acteurs qu'il peut s'avérer nécessaire d'associer dans un processus de conception innovante participative pour aller vers l'usage. C'est ce qui a été fait dans le projet Agor@gri (Gross *et al*., 2024) par exemple en intégrant des développeurs de réseaux sociaux et des managers de communautés en ligne.

Ces effets sont en fait peu anticipables *a priori* sur le processus de conception. La diversité des effets constatés dans nos cas semble liée à quatre facteurs principaux qui ne sont pas indépendants : (i) le moment où l'analyse des situations d'usage arrive par rapport au degré de formalisation de l'outil; (ii) le choix des médiations qui seront présentées par l'analyste pour qu'elles soient débattues avec les concepteurs ; (iii) la propension des concepteurs à remettre en cause leur façon de représenter les médiations qu'opèrent l'outil ou le collectif impliqué dans l'activité de gestion et à en tirer les conséquences pour faire évoluer l'outil ; (iv) la possibilité effective de modifier l'organisation collective mise en place pour concevoir l'outil.

6. Conclusion

Disposer d'une démarche fondée théoriquement sur l'analyse des médiations en jeu dans l'activité instrumentée permet de s'interroger, au cours d'un processus de conception, sur les conditions et modalités d'appropriation des outils que l'on cherche à concevoir. Au sein du réseau IDEAS, dans cette optique, nous avons formalisé deux démarches selon l'existence ou non d'un prototype : le diagnostic des situations d'usage qui intervient plutôt au début d'un processus de conception, et le test de prototype en situation d'usage, qui intervient plutôt lorsque les concepteurs ont déjà développé une maquette. Les deux peuvent bien sûr se combiner comme cela a été le cas dans certains des projets présentés dans cet article. De telles démarches vont au-delà de la question de l'acceptabilité telle qu'elle est souvent traitée (pour une revue de cette question, voir Bobillier-Chaumon, 2023). Elles s'inscrivent dans les débats en science de la conception sur les dialogues à construire entre l'activité et les artefacts pour que ces derniers soient des médiateurs efficaces et effectifs entre un sujet (individuel ou collectif) et l'objet de son action. Représenter et mettre en débat la diversité des façons de gérer un système complexe et l'activité que cela implique, les médiations en jeu, produit des effets plus ou moins anticipables à trois niveaux : celui de l'outil en cours de conception, celui des représentations de la gestion de l'agroécosystème, celui de l'activité même des concepteurs. Il faudrait aussi pouvoir organiser, dans le processus de conception, des échanges avec les personnes à qui sont destinés les outils fondés sur l'exploration des différentes médiations que l'outil réalise. Cela reste à mieux travailler en vue de permettre la coévolution des outils et de leur activité pour d'intégrer de nouveaux enjeux et développer des modes de gestion adéquats pour y faire face.

Éthique

Sans motif pour cet article

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

Marianne CERF : https://orcid.org/0000-0003-2765-5421 ; Marie-Hélène JEUFFROY : https://orcid.org/0000-0003-0520-9172 ; Thibault LEFEUVRE : https://orcid.org/0000-0001-7939-7909 ; Jean Marc MEYNARD : https://orcid.org/0000-0002-4280-1768 ; Lorène PROST ; https://orcid.org/0000-0001-9635-2729 ; Wilfried QUEYRIEL : https://orcid.org/0000-0002-0901-2425.

Contributions des auteurs

L'ensemble des auteurs ont contribué à la collecte, au traitement des données ainsi qu'à la rédaction de l'article.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Le travail a été réalisé dans le cadre du réseau IDEAS et a bénéficié des échanges au sein de ce réseau. Nous remercions également l'ensemble de collègues et partenaires avec qui ont eu lieu les échanges autour des outils APPI'N, DeciFlorSys, MoCoRiBa au sein des projets partenariaux qui ont été le cadre des interactions de conception évoquées dans cet article.

Déclaration de soutien financier

Aucun pour le travail réalisé dans cet article.

Références bibliographiques

Akrich M., 1993. Les objets techniques et leurs utilisateurs, de la conception à l'action. Bernard Conein, Nicolas Dodier, Laurent Thévenot. Les objets dans l'action, 4, Editions de l'EHESS, pp.35-57, Raisons Pratiques.

Bobillier-Chaumon M-E (2023). Psychologie du travail digitalisé : nouvelles formes de travail et clinique des usages, Dunod: Malakoff, 207p.

Beguin P., Cerf M., 2004. Formes et enjeux de l'analyse de l'activité pour la conception de systèmes de travail, @ctivités, vol 1, n°1,54-71 http://www.activites.org/v1n1/v1n1.pdf

Beguin P., Rabardel P. 2001. Designing for instrument mediated activity, Scandinavian Journal of Information Systems, 12-1, 173-190. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0353-0_2

Cerf M., Meynard J.M., 2006. Les outils de pilotage des cultures : diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception, Natures, Sciences, Sociétés, 14, 19-29. https://doi.org/10.1051/nss:2006004

Cerf M., Jeuffroy M.H., Prost L., Meynard J.M., 2012. Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. Agronomy for Sustainable Development. https//doi.org/10.1007/s13593-012-0091-z

Colas F., Cordeau S, Granger S.,Jeuffroy M.-H., Pointurier O., W. Queyrel, Rodriguez A., Villerd J., et Colbach N. 2020. « Co-development of a decision support system for integrated weed management: Contribution from future users », European Journal of Agronomy 114 (mars):126010. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126010

Colbach, N, Colas N., 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. https://doi.org/10.1016/j.fer.2020.108006

Colbach, N, Gardarin A, et Moreau D.. 2019. « The response of weed and crop species to shading: Which parameters explain weed impacts on crop production? » Field Crops Research 238:45-55. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.008

Compagnone C., 2014. Les viticulteurs bourguignons et le respect de l'environnement : réseaux de dialogues professionnels et dynamiques de changement, Revue Française de Sociologie, 2014/2 vol.55 : 319-358. https://doi.org/10.3917/rfs.552.0319

Darré, J-P., 1985. La parole et la technique : l'univers de pensée des éleveurs du Ternois, L'Harmattan, Paris, 196 p.

Darnhofer, I., 2015. Socio-technical transitions in farming: key concepts. In Transition pathways towards sustainability in agriculture: case studies from Europe (pp. 17-31). Wallingford UK: CABI.

Engeström Y., 1987. Learning by expanding: An activity-theoretical approach to developmental research. Helsinki, Finland: Orienta-Kosultit Oy

Gross H., Cerf M., Follet D., Fourrié L., Mathieu G., *et al*., 2024. Agor@gri 1 : Les médias sociaux numériques au service de la transition agroécologique. *Innovations agronomiques*, 94, pp.1-15. ff10.17180/ciag-2024-vol94-art01

Keating B.A., Thorburn P.J., 2018. Modelling crops and cropping systems—Evolving purpose, practice and prospects. Eur. J Agron. 100, 163-176. https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.007

McCown, R.L., 2001. Learning to bridge the gap between science-based decision support and the practice of farming: evolution in paradigms of model-based research and intervention form design to dialogue. Crop and Pasture Science 52(5):549-572 https://doi.org/10.1071/AR00119

Meynard J.-M., Cerf M., Coquil X., Durant D., Le Bail M., Lefèvre A., Navarrete M., Pernel J., Périnelle A., Perrin B. *et al*., 2023. Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition. European Journal of Agronomy, 150, 126948, https://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2023.126948

Nidriche A., N. Cavan, T. Lefeuvre, N. Colbach, F. Angevin, et W. Queyrel. 2024. « Guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice ». Guide méthodologique.

Pleux, M.. 2021. « Co-construction d'une formation-action à un outil d'aide à la conception de systèmes de culture agroécologiques avec les futurs utilisateurs ». Mémoire de fin d'étide d'ingénieur. Dijon.

Prost L., Jeuffroy M-H., Cerf M., 2011. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models: a review, Agronomy for Sustainable Development, DOI 10.1007/s13593-011-0059-4.

Quinio M., Salazar P., Gardarin A., Petit M-S, Jeuffroy M-H., 2021. Capitaliser les connaissances avec les acteurs pour concevoir des systèmes agroécologiques, AES, vol 11, n°2-10. https://doi.org/10.54800/cca118

Rabardel P., 1995. Les hommes et les technologies. Approche cognitive des instruments contemporains, Armand Colin : Paris, 239 p.

Slimi C., Prost M., Cerf M., Prost L. 2022. Les échanges entre agriculteurs dans un contexte de transition agroécologique, Revue d'anthropologie des connaissances [En ligne], 16-2 | 2022, http://journals.openedition.org/rac/26704

Tittonell P., Klerkx L., Baudron F., Félix G.F, Ruggia A., van Apeldoorn D., Dogliotti S., Mapfumo P., Rossing W.A.H., 2016. Ecological Intensification: Local Innovation to Address Global Challenges. Sustainable Agriculture Reviews, 19, 1-34, DOI 10.1007/978-3-319-26777-7_1

Pour citer cet article : Marianne Cerf, Marie-Hélène Jeuffroy, Jean-Marc Meynard, Thibault Lefeuvre, Wilfried Queyrel, *et al*.. Une analyse des situations d'usage pour concevoir des outils d'aide au changement de pratiques. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.135-148. 10.17180/ciag-2025-vol101-art12

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

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

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

OPTIFLORSYS : Un outil pour aider à la conception de stratégies agroécologiques de gestion d'adventices

Thibault Maillot[1], Mathieu Chanis[1], Jean Villerd[1], Wilfried Queyrel[1], Laurène Perthame[1], Nicolas Cavan[1], Jean-Baptiste Vioix[2], Nathalie Colbach[1]

[1] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon

[2] Univ. Bourgogne, Route des plaines de l'Yonne, Auxerre

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art13

Résumé

Pour lutter contre les adventices avec peu ou pas d'herbicides, la reconception de systèmes de culture est essentielle. Le nouvel outil d'aide à la décision OPTIFLORSYS combine le modèle « parcelle virtuelle » de FLORSYS avec des algorithmes d'optimisation des pratiques. Il permet d'optimiser de manière cohérente un système de culture ou des idéotypes variétaux selon les valeurs prédites par FLORSYS des indicateurs d'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité. En ce sens, l'outil accompagne la reconception de systèmes de culture, en identifiant des nouvelles pistes de gestion. Après une présentation de l'outil, cet article présente trois cas d'étude, optimisant des rotations, le travail du sol ou l'identification d'idéotypes de maïs pour illustrer le fonctionnement d'OPTIFLORSYS et ses intérêts dans le cadre d'une démarche de reconception de systèmes de culture. L'outil est en phase de développement et est amené à évoluer avec, entre autres, les retours des futurs utilisateurs.

Mots-clés : conception, optimisation, système de culture, modélisation, simulation

Abstract: OPTIFLORSYS – a decision support system to design agroecological weed management strategies

Redesigning cropping systems is essential to manage weeds with few or no herbicides. The new decision support system OPTIFLORSYS combine the "virtual field" model FLORSYS with optimization algorithms. It allows optimizing cropping systems and crop ideotypes in a coherent manner and based on indicators of weed impacts on crop production and biodiversity predicted by FLORSYS. Thus, the tool accompanies the redesign of cropping systems, identifying new management strategies. This paper first presents the OPTIFLORSYS tool, followed by three case studies aiming to optimise rotations, tillage or maize ideotypes, to illustrate the OPTIFLORSYS functioning and its contribution to redesigning cropping systems. The tool is still under development and is likely to evolve depending on, among other things, the feedback from future users.

Keywords: design, optimization, cropping system, modelling, simulation

1. Introduction

La gestion agroécologique des adventices nécessite de repenser les systèmes de culture pour les rendre compatibles avec les attentes environnementales, économiques et institutionnelles (Martin *et al*. 2013; Meynard *et al*. 2017). Des méthodologies de reconception ont été proposées, dans la littérature, afin de faciliter ce processus (Cavan *et al*. 2023; Hill and MacRae 1996). Parmi celles-ci, les méthodes permettant de mettre l'agriculteur au centre de la réflexion, au cours d'atelier de co-conception par exemple, semblent être bien adaptées pour aboutir à des solutions répondant à des objectifs et contraintes locales des agriculteurs (Cavan *et al*. 2023; Lacombe *et al*. 2018).

Différents outils sont à disposition des animateurs pour accompagner le déroulement des ateliers (Martin *et al*., 2013). Parmi ceux-ci, les outils de simulation et des outils d'aide à la décision permettent de soutenir la réflexion, d'en concrétiser les implications et de nourrir ainsi les échanges (Cavan *et al*. 2023; Pelzer *et al*. 2012; Queyrel *et al*. 2023). C'est dans cette optique, que nous avons développé dans le passé à partir d'expérimentations au champ et en conditions contrôlées le modèle de parcelle virtuelle FLORSYS qui simule la dynamique pluriannuelle de la flore adventice selon la rotation et les itinéraires de conduite retenus et déduit les conséquences pour la production des cultures (rendement, qualité de récolte, taux de protéines) et la biodiversité (Colbach *et al*. 2021; Colbach *et al*. 2019; Colbach *et al*. 2024). Son 'petit frère', l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS (Colas *et al*. 2020; Colbach *et al*. 2024), a été co-construit par la suite avec des acteurs de terrain, à partir d'une méta-modélisation[4] de FLORSYS, et doté d'une interface humain-machine ergonomique. DECIFLORSYS prédit les mêmes indicateurs d'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité que FLORSYS, à partir du système de culture, et en quelques secondes au lieu de quelques heures. En revanche, DECIFLORSYS ne prédit pas les variables de sorties de FLORSYS décrivant les états des cultures, adventices et sol, indispensables pour diagnostiquer la performance des systèmes de culture quantifiées par les indicateurs d'impact.

Dans les deux cas, il s'agit d'outils qui évaluent des systèmes de culture proposés par les utilisateurs, souvent dans le cadre d'une boucle de conception pas-à-pas, avec (1) la définition des objectifs et contraintes par les utilisateurs des outils, (2) la conception de systèmes de culture par ces utilisateurs, (3) une évaluation par les outils, selon le cadre posé dans la première étape, puis (4) une amélioration des systèmes par les utilisateurs sur la base des résultats de l'étape précédente, avec les étapes 3 et 4 qui se répètent jusqu'à la satisfaction des participants (Bergez *et al*. 2010).

Ces aller-retours entre les étapes 3 et 4 peuvent aussi être automatisés à l'aide d'un algorithme d'optimisation pour arriver à des systèmes de culture optimaux répondant aux objectifs et contraintes fixés (Bergez 2013; Bergez *et al*. 2010). Au lieu de répondre à la question « que se passe-t-il si … » comme le font FLORSYS et DECIFLORSYS, la combinaison d'un modèle avec de tels algorithmes d'optimisation répond à la question « que faut-il faire pour… ».

Dans cet article, nous présentons l'outil d'aide à la décision OPTIFLORSYS qui est la combinaison de différents algorithmes d'optimisation appliqués au support de la parcelle virtuelle de FLORSYS. L'outil est doté d'une interface humain-machine selon un cahier des charges co-construit avec des acteurs de terrain. Nous allons aussi illustrer plusieurs cas d'étude où OPTIFLORSYS a été utilisé pour optimiser des caractéristiques de variétés, des techniques culturales ou les rotations entrant dans le système de culture, afin de mettre en avant les intérêts de ce nouvel outil.

2. Matériel et méthodes

2.1. La « parcelle virtuelle » FLORSYS

2.1.1. Les variables d'entrée et paramètres des espèces

FLORSYS (Colbach *et al*. 2021; Colbach *et al*. 2019; Colbach *et al*. 2024) vise à simuler un champ virtuel sur lequel des systèmes de culture peuvent être testés sur une large gamme de mesures virtuelles recouvrant les variables d'état des cultures et des adventices ainsi que certains descriptifs de l'environnement. Les variables d'entrée de FLORSYS (Figure 1.A) consistent en (1) une description du champ simulé selon le climat journalier, la latitude et les caractéristiques du sol ; (2) toutes les cultures et opérations de gestion, avec les dates, les outils et les options retenues pour ces opérations (matières

[4] Émulateur ou modèle d'un modèle permettant de prédire les sorties du modèle parent à partir des entrées du modèle parent

actives et doses de pesticides, profondeur de travail du sol, etc.) ; et (3) le stock semencier adventice présent dans le sol au début de la simulation.

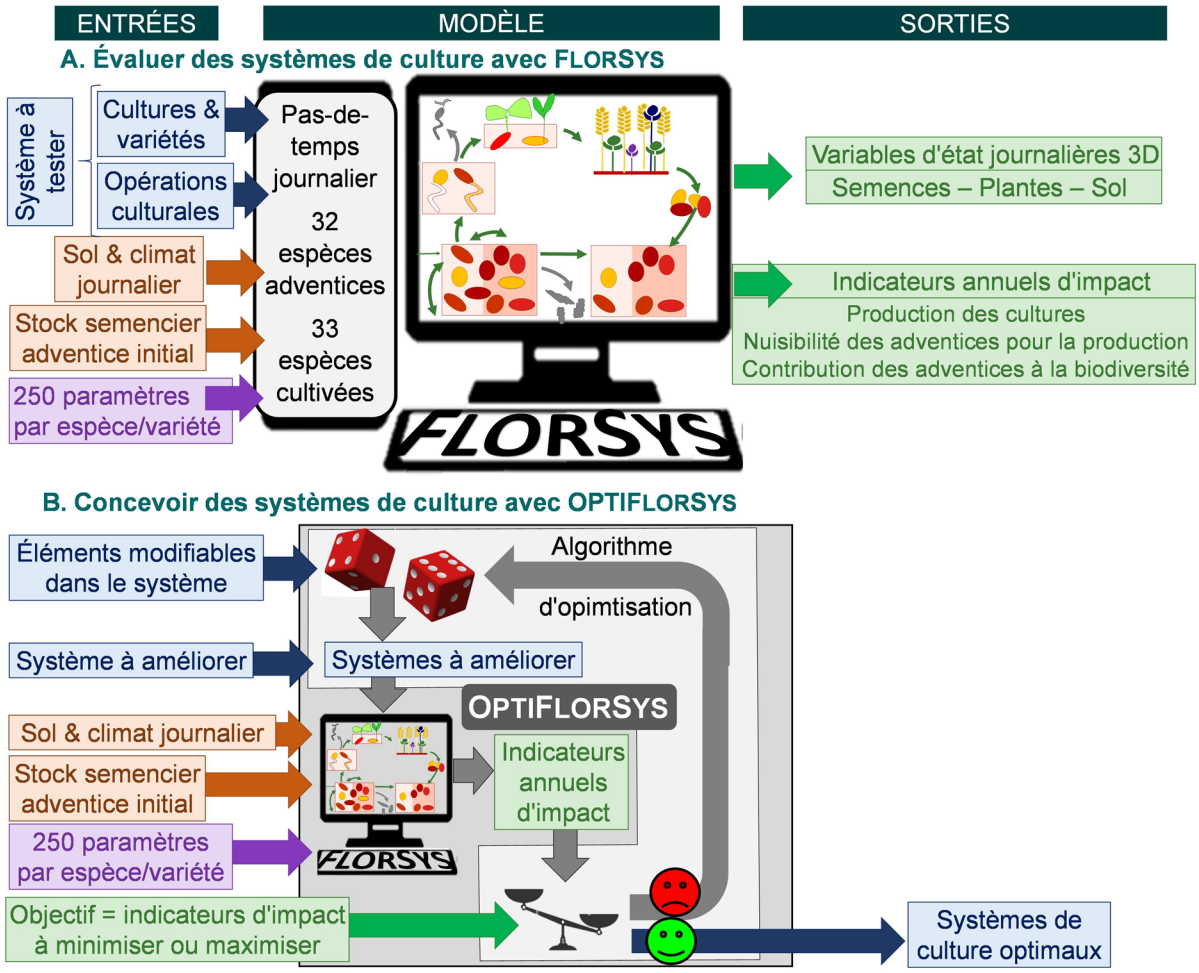


Figure 1 : Représentation schématique du modèle FLORSYS (A) de l'outil d'aide à la décision OPTIFLORSYS (B). FLORSYS simule le cycle de vie des adventices et des cultures à partir du système de culture et du pédoclimat, pour en prédire des variables d'état détaillés permettant de faire un diagnostic de la performance des systèmes de culture évalués à l'aide d'indicateurs d'impact des adventices. OPTIFLORSYS propose à partir d'un système de culture initial renseigné par l'utilisateur des systèmes de culture permettant de maximiser ou minimiser des indicateurs d'impact des adventices choisis par l'utilisateur. Cet outil contient deux algorithmes d'optimisation (dont le choix dépend s'il s'agit d'optimiser des variables qualitatives ou quantitatives) qui évaluent des systèmes de culture via des simulations menées sur FLORSYS et proposent des nouveaux systèmes par tirage aléatoire jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration des indicateurs.

Le modèle est actuellement paramétré pour 32 espèces adventices annuelles fréquentes et contrastées et 33 espèces de cultures, dont plusieurs variétés pour le blé tendre et le pois. Chaque espèce et variété est décrite par un jeu de 250 paramètres qui qualifient des constantes inhérentes à l'espèce ou la variété et rendues indépendantes du milieu (ex., surface foliaire spécifique en l'absence de stress, paramètre de réponse de cette surface foliaire spécifique au stress azoté). Ces paramètres sont estimés dans des expérimentations : les paramètres de germination sont par exemple estimés dans des expérimentations sur papier filtre en enceinte climatisée (Gardarin *et al*. 2011), la surface foliaire spécifique en l'absence de stress sur plante individuelle en parcelle jardinée fertilisée et irriguée (Colbach *et al*. 2020), les paramètres de réponse de la surface foliaire spécifique au stress azoté ou hydrique dans des pots en serre fertilisés pour obtenir différents niveaux de stress (Cournault *et al*.

2024; Perthame *et al*. 2022), le taux de mortalité *in situ* ou le niveau de dormance des semences sur des lots de semences enfouies au champ à 30 cm pendant 2 ans (Gardarin *et al*. 2010). Pour simplifier l'addition de nouvelles variétés, certains de ces paramètres difficiles à mesurer sont estimés à partir de traits d'espèces faciles à mesurer, à l'adie de relations fonctionnelles (Colbach *et al*. 2020; Gardarin *et al*. 2011; Gardarin *et al*. 2010).

2.1.2. Effet des techniques culturales sur les processus du cycle de vie

Les variables d'entrée et paramètres influencent le cycle de vie annuel des adventices et des cultures, avec un pas de temps journalier (Figure 1.A). Ce cycle au pas-de-temps journalier couvre une succession de stades balayant des semences aux plantes (semences viables, dormantes, germées, plantes en croissance pré-levée, stade végétatif, floraison, maturité), avec une description détaillée de leurs états respectifs (ex. hauteur et largeur de chaque plante, biomasse des différents compartiments – racines, feuilles, tiges, reproducteur). Les processus liant les stades (ex., photosynthèse, respiration, croissance, réponse à l'ombre) dépendent des dates, des outils des techniques de gestion (travail du sol, semis, herbicides, désherbage mécanique, fauche, récolte, etc.) et des options retenues, en interaction avec les états des cultures, des adventices et du sol. Par exemple, une opération de désherbage mécanique va arracher et enfouir des plantules, et les dégâts sur les plantes augmentent avec l'humidité du sol, la profondeur de travail, la vitesse du tracteur et l'agressivité de l'outil, et elle diminue avec la taille des plantes.

2.1.3. Indicateurs de l'impact des adventices sur la production végétale

En plus de toutes les variables décrivant les états du sol, des semences et plantes des cultures et des adventices, FLORSYS calcule le rendement des cultures ainsi qu'un ensemble d'indicateurs évaluant l'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité. Ces indicateurs comprennent notamment le rendement des cultures, la perte de rendement due aux adventices, l'infestation des champs par la biomasse d'adventices, la biodiversité végétale liée à la flore adventice et la contribution de cette flore à la fourniture de ressources alimentaires pour les oiseaux des champs et les abeilles domestiques. Le dernier indicateur est l'indice de fréquence de traitement herbicide.

2.1.4. Domaine de validité

FLORSYS a été évalué avec des données de terrain indépendantes sur la dynamique des adventices à court et à long terme à l'échelle nationale française, sur une large gamme de systèmes de grande culture. Cette évaluation a montré que les rendements des cultures, les densités adventices journalières et les densités moyennes sur plusieurs années étaient généralement bien prédites (Perthame *et al*. 2024).

2.2. Lier FLORSYS à des algorithmes d'optimisation dans OPTIFLORSYS

2.2.1. La boucle de comparaison – reconception des systèmes de culture

OPTIFLORSYS est le résultat d'un couplage entre FLORSYS et des algorithmes d'optimisation multi-objectifs. Son principe revient à « inverser » FLORSYS : au lieu de prédire la performance d'un système de culture proposé par l'utilisateur (Figure 1.A), OPTIFLORSYS propose une série de systèmes de culture produisant la performance recherchée par l'utilisateur (Figure 1.B). 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 :

1. crée une série de systèmes de culture à partir du système renseigné par l'utilisateur, à partir de tirages aléatoires au sein des éléments du système de culture indiqués comme modifiables par l'utilisateur. Cette étape est indispensable pour limiter le risque de tomber sur optimums locaux, comme le point (–2, –3) dans la Figure 2 (section 0) ;

2. simule ces systèmes avec FLORSYS, sur environ 30 ans et 10 répétitions météo ;
3. compare les valeurs des indicateurs prédits par FLORSYS pour ces systèmes, et en fonction des indicateurs à minimiser ou maximiser choisis par l'utilisateur, crée des nouveaux systèmes de culture par tirages aléatoires ;
4. identique à l'étape 2 ;
5. compare les valeurs des indicateurs à ceux de l'étape 3 :
    a. si il n'y a plus d'amélioration, les derniers systèmes simulés sont proposés à l'utilisateur,
    b. si il y a un changement dans les résultats, retour à l'étape 3.

Les étapes 4–5 sont exécutés jusqu'à arriver à l'étape 5a.

2.2.2. Évaluer la multiperformance

Différentes approches existent pour évaluer la multiperformance d'un système de culture. Dans certaines études, une moyenne pondérée de sorties du modèle est utilisée comme fonction objective de cette optimisation (Bessette *et al*. 2019). Cependant, une telle moyenne pondérée ne peut être utilisé que si les données sont chiffrables et comparables (la moyenne d'un rendement et d'une densité d'adventices n'a pas de sens). De plus, les sorties à optimiser peuvent être antagonistes, par exemple, minimiser à la fois l'indice de fréquence de traitement herbicide et le salissement du champ, minimiser le salissement et maximiser la biodiversité végétale, ou maximiser la production des cultures et l'offre trophique aux abeilles. Des compromis doivent être trouvés, et pour cela, toutes les sorties sont utilisées pour cadrer le lien entre les objectifs. Un front de Pareto est alors construit en cherchant l'ensemble des solutions de compromis (Memmah *et al*. 2015). Il s'agit de tous les systèmes pour lesquels il est impossible d'améliorer un indicateur (ex. rendement) sans détériorer un autre (ex. offre trophique aux abeilles) (voir la Figure 3.1 de la section 0).

Cette approche multicritère donne au conseiller ou à l'agriculteur la possibilité de choisir la stratégie qui lui convient le mieux : faut-il privilégier la solution permettant une production plus importante, une offre trophique pour les abeilles prépondérante ou bien trouver une solution permettant d'obtenir un résultat comparable entre ces deux indicateurs ?

2.2.3. Différents algorithmes pour différents éléments à optimiser

En fonction, de la nature des éléments du système de culture à optimiser, différents algorithmes sont utilisés pour construire le front de Pareto au sein de l'outil OPTIFLORSYS. Pour des éléments qualitatifs, comme pour la création de rotations culturales, un algorithme génétique est utilisé (Sarker and Ray 2009). Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle et l'appliquent à une population de solutions potentielles au problème donné. La solution est approchée par « bonds » successifs. Pour optimiser des variables quantitatives d'un itinéraire technique (ex. dose d'azote) ou de paramètres variétaux (ex. surface foliaire spécifique, hauteur de plante par unité de biomasse), un algorithme des lucioles est privilégié (Chetty and Adewumi 2013; West 2019). C*et al*gorithme optimise les tirages aléatoires des variables ou paramètres dans l'étape 3 (section 0) en concentrant les tirages vers les endroits de l'espace à explorer (c.a.d., les combinaisons de variables ou paramètres à optimiser) où les lucioles (= les systèmes évalués à l'étape précédente) brillent le plus fort (= montrent la meilleure multiperformance) (Figure 2).

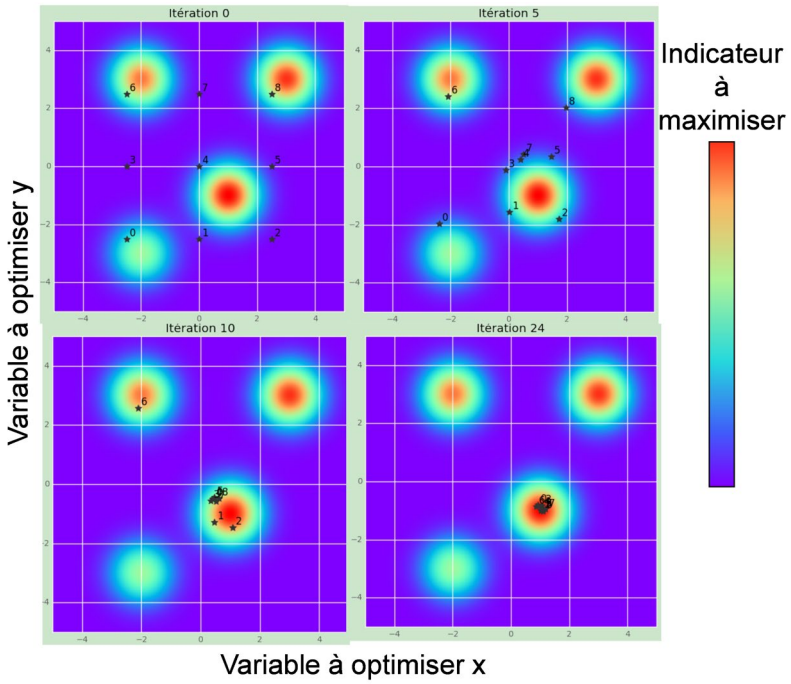


Figure 2 : Exemple de l'exploration de l'espace des possibles de deux variables quantitatives x et y à optimiser afin de maximiser un indicateur. Position des « lucioles » (★) à différentes itérations (de 0 à 24), montrant la migration des lucioles vers la valeur maximale de l'indicateur à la position (1, -1)

2.3. Une interface humain–machine pour la saisie des entrées et la présentation des résultats

Afin d'aider les utilisateurs de l'outil (agriculteurs, conseillers, …) dans leur mobilisation de l'outil, une interface a été co-développée avec ces utilisateurs, a l'instar de l'interface de DECIFLORSYS (Colas *et al*. 2020; Lefeuvre and *et al*. 2024; Lefeuvre *et al*. 2023). L'interface vise à simplifier la saisie des entrées, prend en charge le lancement de l'algorithme et des simulations FLORSYS, et aide à analyser les sorties. Par exemple, un algorithme de clustering a été mis en place afin de regrouper des solutions équivalentes et simplifier l'affichage et l'analyse des résultats (Kropp *et al*. 2019).



Figure 3 : Capture d'écran de l'outil d'aide à la décision OptiFlorSys, montrant l'onglet de saisie du système de culture à améliorer fourni par l'utilisateur, après le choix du type d'optimisation (rotation, techniques culturales ou caractéristiques variétales) à la page d'accueil puis la description du

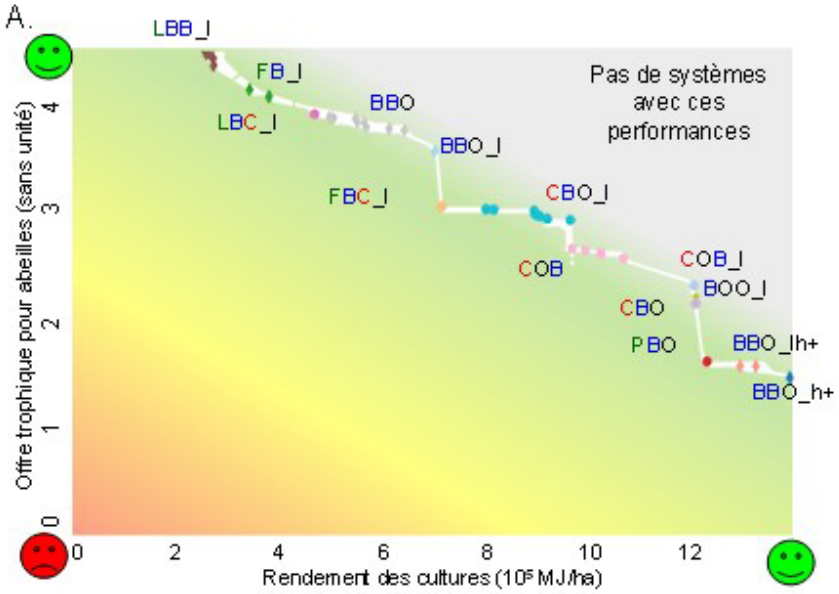
pédoclimat. Les étapes suivantes consistent à choisir les opérations à optimiser et les indicateurs à maximiser ou minimiser, avant de lancer l'optimisation et arriver à la présentation des résultats.

3. Cas d'étude

3.1. Optimiser une rotation

Le cas d'étude de la Figure 3 vise à identifier les rotations triennales à base de céréales qui concilient la production avec l'offre trophique due aux adventices pour les abeilles domestiques, à l'aide d'un algorithme génétique (Colbach *et al*. 2021). La figure 3.A montre un front de Pareto : il n'existe aucun système qui présente à la fois un meilleur rendement et une meilleure offre trophique au-delà du front (dans la zone grise en haut à droite), et les systèmes en bas à gauche du front ont à la fois un rendement et une offre trophique plus faibles que les systèmes du front.

A.



B.

Système de culture	Rotation			Gestion d'interculture (sans couvert semé)					Herbicides en culture[§]	Désherbage mécanique
	Espèces (nombre)	Légumineuses (%)	Céréales (%)	Broyage	Labour	Travail du sol superficiel[§]	Roulage	Glyphosate		
LBB_l	2	33	66	1 an/3	1 an/3	1/an	2 ans/3	Non	1.33/an	Non
FBB_l	2	33	66	1 an/3	1 an/3	1.33/an	2 ans/3	Non	1.33/an	3 ans/3
LBC_l	3	33	33	1 an/3	1 an/3	1.33/an	3 ans/3	1 an/3	1.33/an	Non
BBO	2	0	100	Non	Non	1.67/an	1 an/3	1 an/3	2.66/an	Non
BOO_l	2	0	100	Non	1 an/3	4.33/an	Non	2 ans/3	2.66/an	2 ans/3
FBC_l	3	33	33	1 an/3	1 an/3	2.66/an	2 ans/3	Non	1.67/an	3 ans/3
CBO_l	3	0	66	Non	1 an/3	4/an	1 an/3	1 an/3	2.33/an	2 ans/3
COB	3	0	66	Non	Non	3/an	1 an/3	1 an/3	3/an	Non
COB_l	3	0	66	Non	1 an/3	4.33/an	1 an/3	2 ans/3	2.33/an	2 ans/3
BBO_l	2	0	100	1 an/3	1 an/3	2/an	1 an/3	1 an/3	2.66/an	Non
CBO	3	0	66	Non	Non	2/an	Non	1 an/3	3/an	Non
PBO	3	33	66	Non	Non	3.66/an	Non	2 ans/3	2.66/an	Non
BBO_lh+	2	0	100	Non	1 an/3	3.66/an	2 ans/3	3 ans/3	3.33/an	Non
BBO_h+	2	0	100	Non	Non	3.66/an	Non	1 an/3	3.33/an	Non

[§] B=blé tendre d'hiver, O=orge d'hiver, T=triticale, C=colza, L=luzerne, P=pois, F=féverole ; h+ fort usage d'herbicides ; l=labour. [&] nombre d'opérations moyenné sur la rotation

[§] B=blé tendre d'hiver, O=orge d'hiver, T=triticale, C=colza, L=luzerne, P=pois, F=féverole ; h+ fort usage d'herbicides ; l=labour. [&] nombre d'opérations moyenné sur la rotation

Figure 4 : Optimisation de rotations triennales à base de céréales, et leur gestion des cultures, avec OptiFlorSys visant à concilier une forte offre trophique aux abeilles et un fort rendement. A. Front de

Pareto (chaque point est la moyenne sur 30 ans et 10 répétitions météo). B. Description des rotations (tiré sur Colbach *et al*. 2021)

Sur ce front de Pareto, les monocultures de céréales maximisent le rendement au détriment de la biodiversité (en bas à droite de la figure 3), tandis que les rotations à base de légumineuses tendent à améliorer la biodiversité (en haut à gauche). Les rotations comportant le plus grand nombre d'espèces de cultures différentes (au centre) présentent à la fois une biodiversité moyenne et une production moyenne. Cette étude a également démontré qu'une rotation donnée peut donner des résultats très différents en fonction de la gestion des cultures. Par exemple, le labour augmente le rendement au détriment de la biodiversité dans certaines rotations (BBO, blé/blé/orge), alors que l'inverse s'est produit dans d'autres cas (CBO, colza/blé/orge).

3.2. Optimiser le travail du sol lors de la destruction des couverts d'interculture

3.2.1. Le point de départ : un système conçu par des agriculteurs.

Dans le cadre du projet COPRAA, des ateliers de co-conception de l'outil se sont déroulés, par visioconférence, les 15 avril 2022 et 23 janvier 2023. Lors du second atelier, l'outil OPTIFLORSYS a été utilisé, sur un cas d'étude (Cavan and *et al*. 2024), afin de faire une démonstration des possibilités de l'outil. Lors de cette démonstration, l'objectif était d'optimiser des opérations de travail du sol (dates et profondeurs) réalisées après des couverts d'interculture dans un système de culture conçu par groupe d'agriculteurs afin de maîtriser les adventices tout en réduisant les herbicides (Figure 4). L'objectif de l'optimisation était de minimiser la perte de rendement due aux adventices tout en maximisant l'offre trophique aux abeilles.

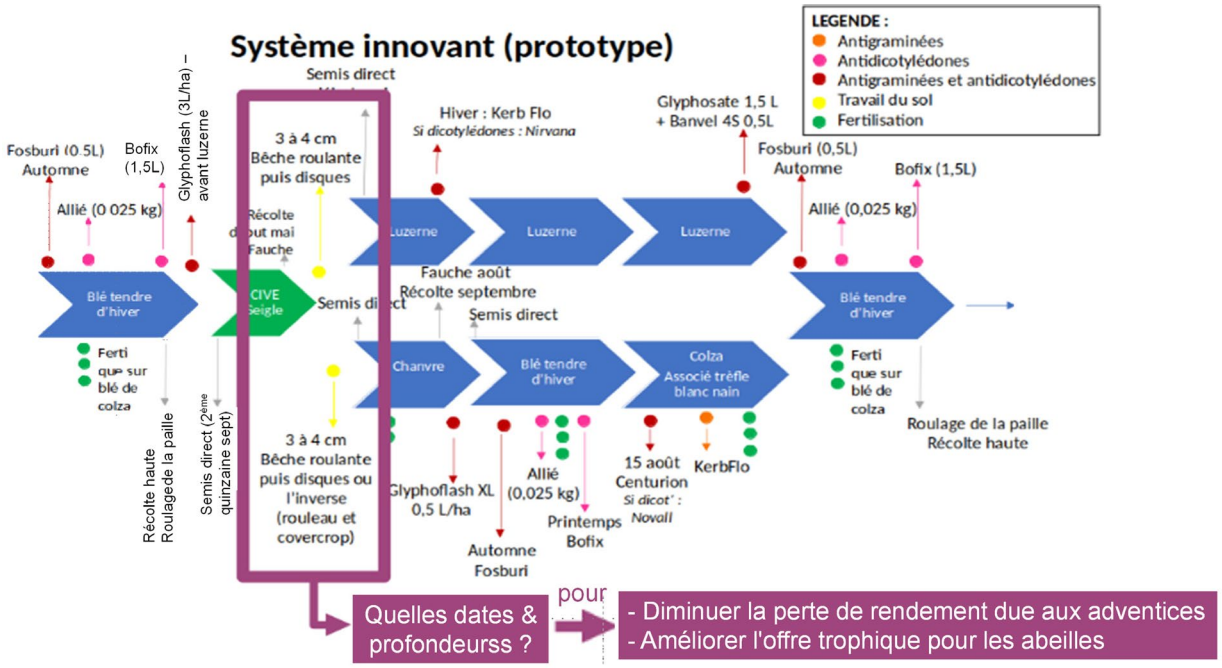


Figure 5 : Système de culture conçu par des agriculteurs et utilisé pour l'étude de cas d'utilisation d'OPTIFLORSYS. La rotation est un blé suivi de 3 ans de luzerne ou de chanvre / blé / colza–trèfle. L'objectif était d'optimiser les dates et profondeurs de travail du sol après le couvert d'interculture suivant le blé, afin de minimiser la perte de rendement due aux adventices tout en maximisant l'offre trophique aux abeilles.

3.2.2. Identification de deux alternatives

Tout comme dans l'exemple de la section 3.1, un front de Pareto avec les solutions de compromis a été construit (Figure 5), cette fois-ci avec un algorithme des lucioles. Enfin, l'étape de clustering permet, dans ce cas d'étude, d'extraire deux types de systèmes : la première alternative favorise l'offre trophique aux abeilles, la seconde minimise la perte due aux adventices.

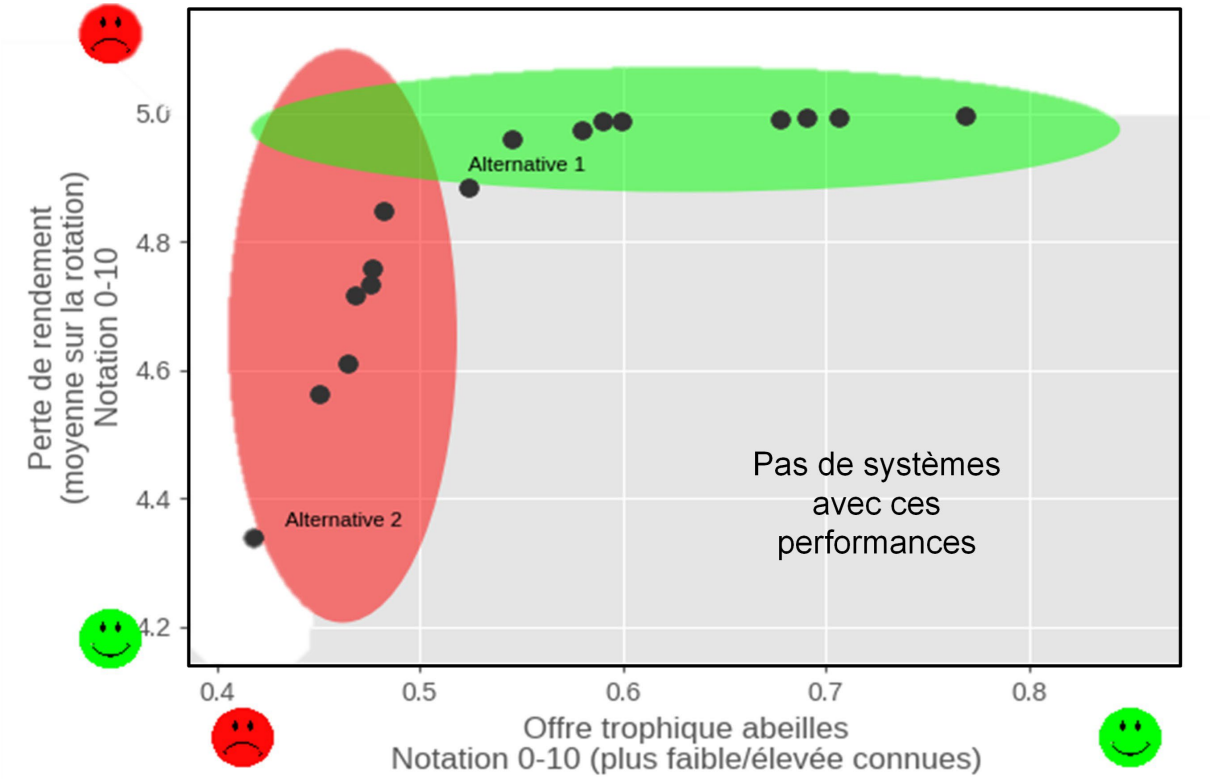


Figure 6 : Front de Pareto (points noirs) identifiés par OPTIFLORSYS pour optimiser dates et profondeurs de travail du sol dans le système de la Figure 4, et aggrégation des résultats issus de l'optimisation en deux alternatives. Les indicateurs d'évaluation ont été normés de 0 (la plus faible valeur observée pour la région dans la base de données simulées) à 10 (la plus forte valeur). Chaque point est la moyenne sur 30 ans et 10 répétitions météo d'une combinaison de date et profondeur de travail du sol.

3.2.3. Diagnostic grâce aux variables d'état décrivant la parcelle virtuelle

OPTIFLORSYS met à disposition des variables intermédiaires permettant de comprendre les résultats. Dans l'étude, les deux alternatives ont ainsi réduit et avancé (via le choix des dates et types d'intervention de travail du sol) les germinations adventices par rapport au semis de la luzerne suivante (Figure 6.A), réduisant ainsi l'infestation de la luzerne. La dynamique de floraison des adventices a aussi été changée, notamment pour l'alternative 2 visant à favoriser l'offre trophique pour abeilles (Figure 6.B). En effet, après le premier blé de la simulation, les différentes options de travail du sol ont tout d'abord changé la flore levée en luzerne (ou chanvre, suivant les options, voir Figure 4), avec le résultat que pendant les occurrences suivantes du blé, les dynamiques de floraison étaient déjà différentes avant les opérations de travail du sol qui distinguent les trois systèmes de la Figure 6.

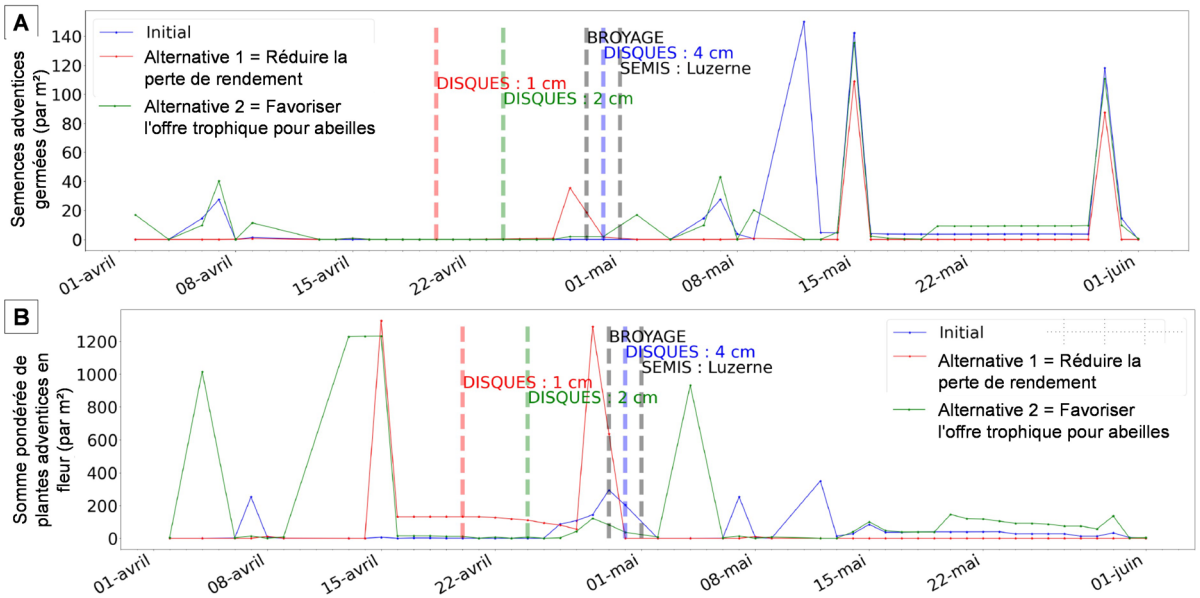


Figure 7 : Dynamique de deux variables d'état des adventices simulés par FLORSYS pour le système de culture initial et deux alternatives issues de l'optimisation par OPTIFLORSYS. Moyenne sur la durée de simulation et 10 répétitions météo.

3.3. Identifier des idéotypes variétaux

Dans ce dernier cas d'étude, OPTIFLORSYS a été utilisé pour identifier des idéotypes variétaux (combinaisons optimales de valeurs de traits) pour réguler les adventices par compétition pour l'azote dans le cas d'une monoculture de maïs en Aquitaine (Perthame 2020). Tout d'abord, les traits liés à la nutrition azotée ayant le plus d'influence sur les indicateurs d'impact des adventices prédits par FLORSYS ont été identifiés grâce à une analyse de sensibilité. Ensuite, OPTIFLORSYS a été utilisé pour construire le front de Pareto optimisant trois traits variétaux permettant de maximiser le rendement potentiel tout en minimisant la perte de rendement due aux adventices (Figure 7). Grâce à un clustering, trois classes d'idéotypes ont été identifiées, regroupant les combinaisons de traits similaires. L'analyse de ces combinaisons permet de conclure que les idéotypes se distinguent surtout par leur tolérance aux adventices (c'est-à-dire, la capacité à limiter la perte de rendement due aux adventices, Tableau 1). Cette tolérance est surtout liée à la capacité à maintenir la compétitivité pour la lumière en cas de stress azoté, et, plus précisément, à ne pas réduire la surface foliaire spécifique en cas de stress azoté (ne pas faire des feuilles plus petites et épaisses). Le potentiel de rendement est plutôt lié à une forte capacité de prélèvement d'azote.

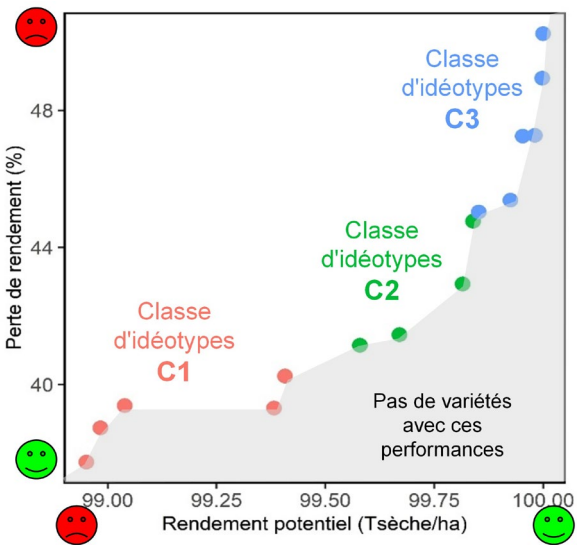


Figure 8 : Front de Pareto constitué de combinaisons de valeurs de 3 traits (voir Tableau 1) optimales pour concilier fort potentiel de rendement et faible perte de rendement due aux adventices (tiré de Perthame 2020). Chaque point correspond à la moyenne, pour les deux indicateurs, sur l'ensemble des années de simulations pour une combinaison optimale de traits. Les combinaisons ont été regroupées en classes avec la classe C1 en rouge, la classe C2 en vert et la classe C3 en bleu.

Tableau 1 : Classes de combinaisons optimales de traits à la suite des optimisations présentées dans (Perthame, 2020). Les classes ont été formées en fonction des valeurs des indicateurs et des valeurs de traits

(élevée en rouge foncé, faible en rouge clair). Plus les valeurs d'indicateurs sont proches des objectifs, plus la case est vert foncé. Les points colorés font référence à celles utilisées dans la Figure 4 pour distinguer les classes.

Classe d'idéotypes identifiés par optimisation	Indicateurs d'évaluation		Traits des variétés à optimiser		
	Perte de rendement (%)	Rendement potentiel (% du maximum)	Réponse de la surface foliaire spécifique au stress azoté (sans unité)	Concentration optimale d'azote dans les feuilles ($g \cdot g^{-1}$)	Capacité de prélèvement d'azote par les racines ($g \cdot g^{-1} \cdot jour^{-1}$)
Gamme de variation	[0, 100]	[0, 100]	[-1.54, 0]	[0.03, 0.11]	[0.001, 0.09]
C1	[38, 40]	[98.95, 99.41]	[-0.47, -0.26]	0.03	[0.04, 0.07]
C2	[41, 45]	[99.58, 99.84]	[-0.95, -0.61]	0.03	0.09
C3	[45, 50]	[99.85, 100]	[-1.54, -1.01]	0.03	0.09

4. Conclusion

L'utilisation d'un modèle agronomique, d'algorithmes d'optimisation et d'une interface web a permis de mettre en œuvre un processus de reconception de système de culture. L'outil OPTIFLORSYS ainsi été co-développé avec les futurs utilisateurs, avec comme objectif d'accompagner les agriculteurs pour la conduite de leurs systèmes de culture, sur le long terme. L'outil permet de proposer des pistes d'amélioration, il est aussi un vecteur favorisant la discussion entre agriculteurs, lors d'ateliers. Cependant, son utilisation est actuellement limitée par la lenteur des simulations réalisées avec le composant FLORSYS. L'utilisation d'OPTIFLORSYS est donc actuellement plutôt limitée à la recherche, et c'est plutôt l'outil DECIFLORSYS, PLUS RAPIDE ET PLUS MUR (Colas *et al*. 2020; Colbach *et al*. 2024), qui est utilisé dans les ateliers de co-conception avec les agriculteurs. Des retours d'expérience sur de telles utilisations pour accompagner la transition vers des systèmes de culture économes en herbicides sont décrits dans d'autres papiers de ce numéro (Cavan and *et al*. 2024; Omon *et al*. 2024; Queyrel and *et al*. 2024). Une solution envisagée dans le futur pour pallier au problème de la lenteur D'OPTIFLORSYS est de remplacer FLORSYS par DECIFLORSYS (Colas *et al*. 2020; Colbach *et al*. 2024).

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

Thibault MAILLOT : https://orcid.org/0000-0002-9689-9860

Mathieu CHANIS : https://orcid.org/0009-0001-4954-7336

Laurène PERTHAME : https://orcid.org/0000-0002-6421-8055

Jean VILLERD : https://orcid.org/0000-0001-7156-7512

Jean-Baptiste VIOIX : https://orcid.org/0000-0002-0624-2399

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X

Contributions des auteurs

TM a conçu l'outil avec JV, JBV et MC, les tests ont été réalisés par tous les auteurs, TM et NC ont écrit le papier.

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

Ce projet a été financé par INRAE et le projet COPRAA (www6.inrae.fr/projet-copraa/) 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.

Références bibliographiques

Bergez J.E. (2013). Using a genetic algorithm to define worst-best and best-worst options of a DEXi-type model: Application to the MASC model of cropping-system sustainability. *Computers and Electronics in Agriculture, 90*, 93-98.

Bergez J.E., Colbach N., Crespo O., *et al.* (2010). Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy, 32*, 3-9.

Bessette D., Wilson R., Beaudrie C., & Schroeder C. (2019). An online decision support tool to evaluate ecological weed management strategies. *Weed Science, 67*, 463-473.

Cavan N., & *et al.* (2024). Retour d'expériencesde conception de systèmes de culture innovants économes en hebricides avec des agriculteure : rôle des outils dans l'appui à l'animation. *Innovations agronomiques*.

Cavan N., Omon B., Dubois S., *et al.* (2023). Model-based evaluation in terms of weed management and overall sustainability of cropping systems designed with three different approaches. *Agricultural Systems, 208*, 103637.

Chetty S., & Adewumi A.O. (2013). Studies in Swarm Intelligence techniques for annual crop planning problem in a new irrigation scheme. *South African Journal of Industrial Engineering, 24*, 205-226.

Colas F., Queyrel W., Van Inghelandt B., *et al.* (2020). DeciFlorSys : un outil pour accompagner les agriculteurs dans la transition agroécologique. *Innovations agronomiques, 81*, 91-100.

Colbach N., Colas F., Cordeau S., *et al.* (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., *et al*. (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., Flament M., Maillot T., *et al*. (2024). La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides. *Innovations agronomiques*.

Colbach N., Moreau D., Dugué F., *et al*. (2020). The response of weed and crop species to shading. How to predict their morphology and plasticity from species traits and ecological indexes? *European Journal of Agronomy, 121*, 126158.

Cournault Q., Colbach N., Busset H., *et al*. (2024). Interspecies diversity in morphological responses to water stress: Study on a panel of weed and crop species. *Environmental and Experimental Botany, 224*, 105825.

Gardarin A., Dürr C., & Colbach N. (2011). Prediction of germination rates of weed species: relationships between germination parameters and species traits. *Ecological Modelling, 222*, 626-636.

Gardarin A., Dürr C., Mannino M.R., *et al*. (2010). Seed mortality in the soil is related to the seed coat thickness. *Seed Science Research, 20*, 243-256.

Hill S.B., & MacRae R.J. (1996). Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture, 7*, 81-87.

Kropp I., Nejadhashemi A.P., Deb K., *et al*. (2019). A multi-objective approach to water and nutrient efficiency for sustainable agricultural intensification. *Agricultural Systems, 173*, 289-302.

Lacombe C., Couix N., & Hazard L. (2018). Designing agroecological farming systems with farmers: A review. *Agricultural Systems, 165*, 208-220.

Lefeuvre T., & *et al*. (2024). Ateliers de co-conception : enseignements de 12 cas d'étude. *Innovations agronomiques*.

Lefeuvre T., Prost L., Alaphilippe A., *et al*. (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*.

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.

Memmah M.-M., Lescourret F., Yao X., & Lavigne C. (2015). Metaheuristics for agricultural land use optimization. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 35*, 975-998.

Meynard J.-M., Jeuffroy M.-H., Le Bail M., *et al*. (2017). Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agricultural Systems, 157*, 330-339.

Omon B., Colbach N., Cavan N., & Angevin F. (2024). L'accompagnement de la transition vers des systèmes de culture gérant les adventices avec moins d'herbicides : avec quelle mobilisation de la connaissance, et des outils et modèles ? *Innovations agronomiques*.

Pelzer E., Fortino G., Bockstaller C., *et al*. (2012). Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators, 18*, 171-182.

Perthame L.,2020.*Analyse et modélisation du rôle de la compétition pour l'azote dans la régulation des adventices,* PhD Thesis,Dijon, Francep.

Perthame L., Colbach N., Busset H., *et al*. (2022). Morphological response of weed and crop species to nitrogen stress in interaction with shading. *Weed Research, 62*, 160-171.

Perthame L., Petit S., & Colbach N. (2024). La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture. *Innovations agronomiques*.

Queyrel W., & *et al*. (2024). *Innovations agronomiques*.

Queyrel W., Van Inghelandt B., Colas F., *et al*. (2023). Combining expert knowledge and models in participatory workshops with farmers to design sustainable weed management strategies. *Agricultural Systems, 208*, 103645.

Sarker R., & Ray T. (2009). An improved evolutionary algorithm for solving multi-objective crop planning models. *Computers and Electronics in Agriculture, 68*, 191-199.

West J. (2019). Multi-criteria evolutionary algorithm optimization for horticulture crop management. *Agricultural Systems, 173*, 469-481.

Pour citer cet article : Thibault Maillot, Mathieu Chanis, Jean Villerd, Wilfried Queyrel, Laurène Perthame, *et al*.. OPTIFLORSYS : Un outil pour aider à la conception de stratégies agroécologiques de gestion d'adventices. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.149-162. 10.17180/ciag-2025-vol101-art13

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

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

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

Diagnostic sociotechnique du salissement parcellaire en région Hauts-de-France

Marie FLAMENT[1], Jérôme PERNEL[1], Pierre-Yves BERNARD[2]

[1] Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 chaussée de Brunehaut, 80200 Estrées-Mons

[2] UniLaSalle, SFR NORVEGE FED 4277, AGHYLE Rouen UP 2018.C101, 76130 Mont-Saint-Aignan

Correspondance : m.flament@agro-transfert-rt.org

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art14

Résumé

Les difficultés grandissantes de gestion des adventices et les pollutions diffuses engendrées par l'utilisation des herbicides incitent à mobiliser davantage les leviers agronomiques visant à maîtriser la flore adventice. Pour ce faire, les agriculteurs doivent être accompagnés dans l'appropriation de ces nouvelles pratiques. Nous proposons ici une approche concrète permettant d'initier cet accompagnement par la réalisation d'un diagnostic sociotechnique du salissement adventice à l'échelle de la parcelle. Ce diagnostic comprend : (1) une approximation du stock semencier de la parcelle, (2) une évaluation des pratiques agronomiques, (3) une évaluation du risque de résistance des graminées aux herbicides et (4) une appréciation du cadre de contraintes et des moteurs de changement de l'agriculteur. Le diagnostic a été déployé chez sept agriculteurs en région Hauts-de-France. Les trajectoires de salissement parcellaire sont concordantes au sein de l'échantillon enquêté. Les agriculteurs en situation de difficultés techniques expriment une motivation à faire évoluer leurs pratiques. La poursuite des actions est en cours chez 3 agriculteurs du panel initial avec l'identification et l'expérimentation de nouvelles pratiques culturales.

Mots-clés : accompagnement des agriculteurs, gestion des adventices, stock semencier, moteurs de changement

Abstract: Sociotechnical diagnosis of weed pressure in Northern France

The growing difficulties in controlling weeds and the diffuse pollution generated using herbicide encourage a greater mobilization of agronomic levers. In order to achieve this, farmers need to be supported in the adoption of these new practices. We propose to start this support by a sociotechnical diagnosis of weed pressure at the plot level. This diagnosis includes: (1) an approximation of the soil seedbank of the plot, (2) an assessment of agronomic practices, (3) an evaluation of the risk of resistance of grassweeds to herbicides and (4) an assessment of farmer's constraints and drivers of change. The diagnosis was conducted through individual interviews with seven farmers in the Hauts-de-France region. Weed pressure trajectories are consistent within the sample surveyed. Farmers facing technical difficulties are motivated to improve their practices. The continuation of the actions is underway with three farmers from the initial panel, with the identification and experimentation of new farming practices.

Keywords: support of farmers, weed management, seedbank, drivers of change

1. Introduction

Depuis les années 2000, des travaux sont conduits en région Hauts-de-France par les acteurs de la recherche et développement et les structures de développement agricole sur la gestion agronomique de la flore adventice. Les leviers agronomiques (diversification de la rotation culturale, labour, retard de date de semis, etc…) ont été étudiés dans les agrosystèmes régionaux. Les particularités de ces agrosystèmes sont la présence de cultures industrielles et de pommes de terre (respectivement 10,2 %

et 6,0 % de la surface agricole utile – Agreste, 2020), qui impliquent des rotations diversifiées avec cultures d'hiver et de printemps. Un panel de 178 agriculteurs régionaux enquêtés par Agro-Transfert Ressources et Territoires en 2019 citent une diversité d'espèces adventices problématiques, reflet de la diversité culturale parmi lesquelles le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) et le ray grass (*Lolium sp.)* (qui représentent 53 % des adventices citées), ainsi qu'un panel de 35 autres espèces (47 % restants) (Boquet B., 2019). Depuis une dizaine d'années, les acteurs agricoles et agriculteurs constatent des difficultés accrues de maîtrise de la flore : (i) plus d'agriculteurs touchés (dans 40 % des cas cités par les répondants, les problèmes sont en cours d'apparition) et (ii) plus de situations problématiques (pour un quart des agriculteurs sondés, les observations faites sont inquiétantes ou traduisent une situation d'impasse technique).

En parallèle des difficultés de gestion de la flore, un autre enjeu de territoire est celui de la qualité de l'eau et des concentrations en résidus herbicides et métabolites associés. Le suivi des masses d'eau notait, en 2017, 88 **%** des stations du bassin Artois-Picardie qui présentaient une concentration cumulée en pesticides supérieure à 5 µg/l, avec des molécules à effets herbicides retrouvées fréquemment telles que le glyphosate et son métabolite AMPA, le diflufénicanil, la propyzamide, l'éthofumésate et la bentazone (Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2018).

Ces deux constats, (i) l'augmentation des difficultés de gestion de flore adventice en parcelle agricole et (ii) la présence de résidus herbicide dans les eaux, imposent un emploi accru des leviers agronomiques pour maîtriser les adventices. Les leviers agronomiques s'appuient sur les processus biologiques des adventices. Ils agissent sur leurs développements et leurs potentiels d'infestation. Leurs efficacités partielles isolément impliquent de les combiner au sein du système de culture (Munier-Jolain, 2018). Le choix de la combinaison de leviers appropriée est propre à chaque parcelle. La composition floristique d'une parcelle est fortement liée aux pratiques culturales en place (Fried *et al.*, 2008). La succession culturale (culture et précédent cultural) est le principal facteur explicatif. Viennent ensuite les pratiques (chimiques et agronomiques) à l'échelle culturale. Le diagnostic parcellaire consiste ainsi à déterminer les facteurs explicatifs de la pression adventice et à orienter la réflexion sur les leviers agronomiques adaptés au contexte parcellaire.

Se restreindre uniquement aux éléments de compréhension techniques serait omettre des éléments essentiels dans la réflexion de l'agriculteur, que sont les aspects organisationnels. Moss (2019) et Pasquier *et al.* (2020) les ont identifiés comme un frein majeur à l'adoption de pratiques alternatives aux herbicides : les leviers agronomiques sont perçus comme plus complexes à intégrer dans l'organisation des chantiers, ainsi que plus chronophages, alors même que la rationalisation du travail conduit à une systématisation des interventions. Effectivement, pour économiser du temps, les agriculteurs sont fréquemment amenés à raisonner le désherbage à l'échelle de la sole sans tenir compte des spécificités parcellaires de la flore adventice.

Introduire des leviers alternatifs et/ou complémentaires aux herbicides se réfère, de manière plus large à la transition des pratiques agricoles, l'adoption et l'acceptabilité de nouvelles pratiques. Les deux modèles que sont celui de Rogers (1962) et Lewin (1947) décomposent le changement de pratiques en plusieurs phases. La première phase consiste ainsi à remettre en cause les pratiques actuelles. Cette remise en cause ne peut avoir lieu que si des facteurs endogènes ou exogènes à l'exploitation sont constatés par l'agriculteur. Ces facteurs sont qualifiés de moteurs de changement (Mawois *et al.*, 2019). Coquil *et al.* (2017) les classent en 4 catégories : (i) les difficultés techniques, (ii) les contraintes extérieures, (iii) la découverte de l'impensable et (iv) la distorsion entre les pratiques et les normes de l'agriculteur. Identifier ces moteurs de changements dans le cadre du diagnostic semble donc un prérequis pour l'accompagnement proposé par la suite aux agriculteurs, car gage d'acceptabilité d'un changement de pratiques.

L'ensemble des éléments que sont le potentiel d'infestation de la parcelle, les pratiques culturales, les aspects organisationnels, le cadre de contraintes et les moteurs de changement de l'agriculteur

constitue donc le diagnostic sociotechnique, mis au point dans le cadre du projet Adventurh (2020-2024, projet multi-partenarial en région Hauts-de-France sur les difficultés de gestion de flore adventice et la réduction de l'utilisation des herbicides). Ce diagnostic a été testé auprès de sept agriculteurs dans l'objectif de déboucher sur l'expérimentation de leviers alternatifs aux herbicides sur certaines de leurs parcelles et l'adoption de ces leviers si satisfaction.

2. Méthodologie du diagnostic sociotechnique et dispositif expérimental

2.1. OdESSA, un outil prototype pour apprécier le stock semencier en parcelle

Le stock semencier se définit comme le réservoir de semences adventices contenues dans l'horizon travaillé ou en surface, les semences viables étant celles en capacité de germer lorsque les paramètres de germination et de dormance le permettent (Grundy and Jones, 2002). A dire d'experts, les retours d'expérience du terrain font souvent état d'une augmentation du stock semencier dans les parcelles cultivées, pour partie expliquée par les phénomènes de résistance et moindre efficacité des herbicides. La gestion de la flore levée, telle qu'effectuée historiquement devient alors insuffisante et les leviers à mobiliser sont ceux d'une réduction et d'une non-réalimentation du stock semencier (Schwartz-Lazaro and Copes, 2019). L'évaluation du stock semencier d'une parcelle se réalise de manière très distincte entre acteurs de terrain et chercheurs : les agriculteurs et agents du conseil agricole estiment qualitativement la pression adventice d'une parcelle au regard de la flore levée et la recherche quantifie le stock semencier viable de chacune des espèces adventices par prélèvement de terre et mise en germination des semences. Le protocole de recherche consiste ainsi à prélever des carottes de terre de façon à être aussi représentatif de la parcelle que possible, laver la terre pour conserver la fraction comprenant les graines adventices, puis les mettre en germination en serre avec une succession de phases distinctes faisant varier les de paramètres de lumière et de température de façon à lever les dormances des graines (Mahé *et al.,* 2020). La composition floristique de la parcelle est ainsi obtenue après plusieurs mois de comptage régulier des adventices levées. La complexité et le besoin d'équipement spécifique ne permettent donc pas une réalisation de ce protocole par les acteurs de terrain. Faisant état d'une lacune de méthode simplifiée permettant l'évaluation quantitative du stock semencier d'une parcelle, le consortium projet Adventurh a mis au point un outil d'appréciation du stock semencier. Cet outil fournit une fourchette de stock semencier par espèce adventice (par exemple, stock semencier de ray grass compris entre 25 et 135 graines / m²), associée à une classe qui s'échelonne de très faible à très forte (moyenne pour la fourchette ray grass en exemple). Les données d'entrée sont les observations de salissement par adventice de l'année en cours et des années précédentes. Le salissement correspond ici à la classe Barralis d'infestation d'une parcelle au plus fort de son salissement. L'outil a été construit en faisant le lien entre la flore observée en parcelle et le stock semencier résultant de cette flore, obtenues par expérimentation virtuelle avec le modèle FlorSys. Le taux annuel de décroissance permet de passer de l'échelle annuelle à pluriannuelle et la classe de densité de semences dans le stock retenue est la plus élevée, de façon à minimiser le risque de sous-estimation du stock.

2.2. OdERA, diagnostic de la pression des pratiques agronomiques sur les adventices

OdERA est un outil développé par Agro-Transfert Ressources et Territoires en partenariat avec INRAE, les Chambres d'agriculture des Hauts-de-France et avec l'appui d'un groupe de fermes-pilotes. C'est un outil qui évalue la pression exercée sur la flore par les leviers agronomiques de gestion des adventices. Il fournit ainsi des éléments à l'agriculteur pour comprendre si les pratiques mises en place favorisent ou défavorisent l'apparition de chaque espèce adventice. Il s'appuie : (i) à l'échelle pluriannuelle sur la rotation culturale et la fréquence de labour, (ii) à l'échelle annuelle sur les interventions de travail du sol et de semis, ainsi que la couverture du sol. Les interventions de travail du sol et de semis sont mises au

regard des périodes préférentielles de levées des adventices considérées. Une date de semis de la culture durant le pic de levées de l'adventice par exemple sera considérée comme très risquée en termes de gestion de la flore (levées potentielles d'adventices échelonnées pendant plusieurs semaines). Les interventions de travail du sol en interculture en début de période préférentielle de levées seront considérées comme réduisant le risque en culture (faux-semis).

2.3. Grille d'évaluation du risque de résistance graminées

Evaluer les pratiques herbicides de gestion de la flore adventice d'une parcelle implique de connaître (Délye, *et al*.) :

- la résistance à certains modes d'action herbicide ;
- les conditions au champ et modalités d'application herbicide ;
- la dose appliquée et adjuvants associés ;
- le stade de développement des adventices ciblées

Compte-tenu de la nuisibilité secondaire des adventices, c.-à-d. l'alimentation du stock semencier par des graines viables un nombre d'années variable suivant l'espèce adventice considérée, un échec de désherbage chimique conduisant à de fortes densités d'adventices l'année en cours, sera d'autant plus marqué qu'il existe un effet cumulé d'augmentation du stock semencier sur plusieurs années. L'échec de désherbage peut être lié à différents facteurs : mauvaises conditions d'application, dosage insuffisant, résistance au produit, etc…. Le pool de données à collecter pour une évaluation de l'ensemble de ces facteurs est donc assez conséquent. De plus, ce sont, en particulier pour les conditions et modalités d'application, des données qui ne font pas partie des saisies obligatoires. Il est par exemple très rare que l'agriculteur se souvienne des conditions d'application de l'herbicide post-levée d'il y a trois ans.

Le choix a donc été fait de resserrer les facteurs considérés pour les pratiques chimiques aux seules pratiques pouvant occasionner l'apparition de résistance aux herbicides. La grille d'évaluation du risque résistance vulpin des champs et du ray-grass aux antigraminées foliaires mis au point par le Réseau Mixte Technologique (RMT) Florad répondait à ce besoin. Afin d'évaluer ce risque, trois types de critères sont étudiés : (i) des critères concernant la succession culturale et le travail du sol, (ii) des critères concernant les stratégies de désherbage antigraminées dans la rotation et la dernière céréale et (iii) des critères concernant la qualité du désherbage et l'environnement de la parcelle.

Les résultats fournis par la grille d'évaluation du risque apportent peu d'éléments de compréhension du salissement, mais permettent d'analyser le risque engendré par les pratiques actuelles de l'agriculteur. Ces résultats conduisent ainsi à une réorientation de la gestion chimique de la flore et à une plus forte intégration des leviers agronomiques. Le périmètre de validité de la grille d'évaluation du risque ne s'applique qu'aux graminées annuelles automnales, vulpin des champs et ray-grass. Dans le cas d'autres adventices problématiques, la grille n'est actuellement pas opérationnelle.

L'accroissement du salissement par perte d'efficacité des herbicides ou échec de désherbage ponctuel, en lien par exemple avec un traitement qui n'a pas pu être réalisé ou a été réalisé dans de mauvaises conditions, est recueilli en complément des informations relatives au remplissage de la grille lors de l'entretien.

2.4. Cadre socio-organisationnel de l'agriculteur

La charge de travail et la priorisation des chantiers sont des facteurs explicatifs de l'efficacité du désherbage. Ils sont d'autant plus importants que la moindre efficacité des herbicides renforce l'importance de réaliser les traitements aux stades les plus favorables. S'ajoutent à cela les facteurs

exogènes à l'exploitant, tels que les déterminants pédoclimatiques et le contexte réglementaire. Le tissu économique et social permet quant à lui de comprendre les choix de production de l'agriculteur et les verrouillages sociotechniques en présence. L'ensemble des facteurs endogènes à l'exploitant et l'exploitation, exogènes et d'environnement socioéconomique correspond au cadre de contraintes. Il se caractérise et il est essentiel pour comprendre les choix de l'agriculteur mais ne donne pas nécessairement lieu à un échange ultérieur.

En plus du cadre de contraintes, le diagnostic permet de déterminer la présence de moteurs de changement chez l'agriculteur (Mawois *et al.,* 2019 ; Coquil *et al*. 2017). Si ces moteurs de changement sont absents de la réflexion de l'agriculteur, le risque est grand que la transition de pratiques n'ait pas lieu. L'idéal serait de pouvoir en dénombrer plusieurs sur l'exploitation (au moins deux, selon Coquil *et al*. (2017)).

2.5. Agrégation des volets du diagnostic et échantillon d'agriculteurs-pilotes

Le diagnostic sociotechnique du salissement parcellaire comprend donc quatre volets : (i) le stock semencier, qui oriente la nature et l'intensité des leviers agronomiques à introduire, (ii) les pratiques agronomiques, explicatives de la pression adventice de la parcelle et des processus biologique à l'œuvre, (iii) le risque de résistance aux graminées vulpin et ray-grass, qui interroge les pratiques de désherbage chimique et (iv) le volet socio-organisationnel qui regroupe une évaluation du cadre de contraintes et des moteurs de changement de l'agriculteur. A la restitution auprès de l'agriculteur, les éléments issus des différents volets sont agrégés de façon à reconstituer la trajectoire de salissement de la parcelle. Ceci dans l'objectif d'amener l'agriculteur à s'interroger sur la capacité de la combinaison de pratiques en place à gérer la flore sur le long terme.

Sept agriculteurs-pilotes ont testé ce diagnostic, à l'exception du premier volet qui était encore en construction lors de la phase expérimentale. Certains volets n'ont pu être réalisés chez des agriculteurs. Les agriculteurs se situaient dans l'Oise, l'Aisne et la Somme. Le recueil de données a eu lieu au printemps 2022 et la restitution au printemps 2023, sauf pour un des agriculteurs où le recueil des données et la restitution ont eu lieu à un mois d'intervalle à l'été 2023.

3. Déploiement du diagnostic sociotechnique auprès des agriculteurs-pilotes

3.1. Flore problématique et pression adventice sur la parcelle

Le vulpin des champs est cité comme problématique sur 5 des 7 parcelles ciblées (**Tableau 1**). Sur deux d'entre elles, il est associé à d'autres graminées automnales (ray grass et agrostis jouet du vent), la différenciation de salissement entre graminées n'étant pas faite par les agriculteurs. Sur quatre parcelles, les stratégies de désherbage ne réduisent pas le salissement parcellaire, il peut même être plus important en fin de cycle cultural qu'il l'était en début. Un point de vigilance étant que certains traitements se réalisent avant le stade d'émergence des adventices, il est donc difficile pour les agriculteurs d'estimer leur salissement avant désherbage.

Tableau 1 : Adventices problématiques et état du salissement des cinq parcelles ciblées par les agriculteurs-pilotes

	Adventices problématiques	Etat du salissement*	
		Avant désherbage	**Après désherbage**
Agriculteur 1	Graminées automnales (vulpin des champs et ray grass)	4	1
	Chardon des champs	3	1
Agriculteur 2	Vulpin des champs	5	4

Agriculteur 3	Vulpin des champs	3	4
Agriculteur 4	Agrostis jouet du vent	3	3
Agriculteur 5	Graminées (vulpin des champs, agrostis jouet du vent et pâturin annuel)	5	5
Agriculteur 6	Ray-grass	NR**	Ronds : 5 Hors ronds : 2,5
Agriculteur 7	Vulpin des champs	3	5

*Note comprise entre 0 et 5 **Non renseigné

Bien que les données soient directement fournies par l'agriculteur, leur intégration dans le diagnostic permet un échange autour de la satisfaction de l'agriculteur vis-à-vis de la propreté de la parcelle. Des caractéristiques biologiques sur les espèces adventices citées sont insérés dans le compte-rendu du diagnostic et discutés.

3.2. Analyse des pratiques agronomiques

Les rotations culturales (comprenant des cultures d'hiver et de printemps sur 6 parcelles sur 7) permettent de réduire la pression des graminées occasionnée par les céréales d'hiver. Les deux parcelles qui présentent un risque faible comprennent 50 % de cultures d'hiver / 50 % de cultures de printemps. Les autres parcelles sont en classe de risque plus élevée, car : (i) ayant une majorité de cultures d'hiver, (ii) avec des dates de semis des céréales tardives seulement lorsque le précédent est une culture de printemps récoltée à l'automne. Le pâturin annuel est une adventice avec des levées échelonnées sur l'année, aucune culture ne lui est donc défavorable, ce qui explique la note de risque assez élevée (**Tableau 2**).

Les classes de risque restent néanmoins acceptables. La pression induite par les pratiques agronomiques n'est que pour partie explicative du salissement parcellaire recensé par les agriculteurs.

Tableau 2 : Note et classe de risque OdERA des adventices problématiques sur les 5 parcelles ciblées par les agriculteurs-pilotes

	Adventice ciblée	OdERA	
		Note	Classe de risque
Agriculteur 1	Vulpin des champs	16 / 100	Faible
	Ray-grass	16 / 100	Faible
Agriculteur 2 - Rotation 1	Vulpin des champs	44 / 100	Moyen
Agriculteur 2 - Rotation 2	Vulpin des champs	41 / 100	Moyen
Agriculteur 3	Vulpin des champs	41 / 100	Moyen
Agriculteur 4	Agrostis	30 / 100	Assez faible
Agriculteur 5	Vulpin des champs	30 / 100	Assez faible
	Agrostis jouet du vent	25 / 100	Assez faible
	Pâturin annuel	48 / 100	Moyen
Agriculteur 6	Ray-grass	19 / 100	Faible
Agriculteur 7	Vulpin des champs	46 / 100	Moyen

3.3. Risque de résistance des graminées aux herbicides

Le risque d'apparition de graminées résistantes aux herbicides est élevé sur 6 des 7 parcelles étudiées. Le diagnostic met en avant que le salissement parcellaire post-désherbage et la présence de graminées résistantes dans l'environnement des parcelles sont les deux principaux facteurs de risque d'apparition de résistance sur la parcelle (volet qualité du désherbage et environnement – **Tableau 3**).

S'ajoutent à cela : (i) des modes d'action antigraminées trop peu diversifiés (seules 3 parcelles présentent plus de 2 modes d'action antigraminées), (ii) des pratiques agronomiques (rotation culturale et travail du sol) ayant une pression réelle mais insuffisante sur les graminées.

Tableau 3 : Notes et classe de risque de résistance graminées (grille RMT Florad)

	Volet 1 Pratiques agronomiques (42 points maximum)	Volet 2 Stratégie de désherbage anti-graminées (42 points maximum)	Volet 3 Qualité du désherbage et environnement (56 points maximum)	Score total de la parcelle	Classe de risque de résistance
Agriculteur 1	17	9	38	64	Modéré
Agriculteur 2	25	9	44	78	Elevé
Agriculteur 3	21	15	47	83	Elevé
Agriculteur 4	15	26	41	82	Elevé
Agriculteur 5	20	14	53	87	Elevé
Agriculteur 6	29	15	44	88	Elevé
Agriculteur 7	20	15	38	73	Elevé

3.4. Cadre de contraintes et moteurs du changement

3.4.1. Organisation du travail

Les agriculteurs-pilotes font état d'une charge de travail importante (5 agriculteurs sur 6) qui s'explique par la présence d'autres ateliers de production que les grandes cultures ou des activités annexes à l'exploitation (Tableau 4). De cette charge de travail importante résulte une compétition pour les travaux agricoles qui peut se faire au détriment, soit des opérations de gestion de la flore à l'interculture, soit des traitements herbicides en culture. Ainsi, par manque de temps, trois agriculteurs estiment ne pas toujours traiter au stade optimal et deux agriculteurs ne pas toujours réaliser des faux-semis (distinction faite entre un déchaumage et un travail du sol, qualifié de faux-semis, en conditions favorables aux levées adventices).

La priorisation des critères de satisfaction par rapport à la maîtrise de la flore, ainsi que les objectifs de l'agriculteur permettent de comprendre la vision qu'il a de son métier et les choix réalisés, qualifié de sens du métier par Chauvat *et al.* (2015). Le premier profil d'agriculteurs ne trouve pas de sens au désherbage chimique et n'y voient pas non plus d'avenir. Pour l'un d'entre eux, il s'agit d'un facteur explicatif de la non-priorisation des traitements herbicides par rapport à d'autres chantiers. Le second profil estime que la satisfaction de son travail passe par la propreté de la parcelle et que la chimie restera le levier principal pour atteindre cette satisfaction (« On fera ce qu'on peut avec ce qu'on aura »).

Tableau 4 : Analyse de l'organisation du travail sur les exploitations-pilotes

Collectif de travail		Contenu du travail			Souplesse du travail	
Cellule de base (ETP)	Autre (ETP)	Atelier(s) autre(s) que les grandes cultures	Traitements phytosanitaires possiblement délégués	Activité(s) autre(s) que l'exploitation	Compétition vis-à-vis des désherbages chimiques	Compétition vis-à-vis des chantiers de travail du sol
2,5		OUI	NON	NON	OUI	OUI
0,5	0,5	NON	OUI	OUI	NON	OUI
1,5	0,5	NON	NON	OUI	OUI	NON

1,3		OUI	OUI	NON	NON	NON
2	0,5	OUI	NON	NON	OUI	NON
			NR			
1	0,5	NON	NON	NON	NON	NON

3.4.2. Facteurs exogènes à l'exploitant et à l'exploitation

Les conditions pédoclimatiques sont peu citées par les agriculteurs de l'échantillon comme une difficulté vis-à-vis de la gestion de la flore : deux agriculteurs témoignent d'un type de sol difficile pour réaliser les interventions et un agriculteur cite la sécheresse estivale, comme facteur empêchant la réalisation de faux-semis. Le contexte réglementaire, avec plus particulièrement le retrait des matières actives, inquiète mais n'est pas vu comme contributeur du salissement actuel, les agriculteurs ayant adaptés leurs programmes de désherbage au regard des évolutions réglementaires et s'estimant bien accompagnés par leurs conseillers pour le faire.

3.4.3. Les moteurs de changement

Les moteurs de changements sont présents chez 4 des 5 agriculteurs enquêtés (**5**). Ils n'ont pas été collectés auprès des deux derniers agriculteurs lors de l'entretien. Les difficultés de gestion de la flore apparaissent comme le moteur de changement le plus fréquemment identifié. S'agissant du critère de recrutement des agriculteurs-tests par les conseillers (c.-à-d. agriculteurs présentant des difficultés de gestion des adventices), ce moteur de changement est une confirmation que les difficultés ont également été perçues par les agriculteurs. D'autres moteurs de changement existent chez 3 des 5 agriculteurs, dont le frein psychologique à appliquer des traitements herbicides.

Tableau 5 : Recensement des moteurs de changements chez les agriculteurs enquêtés

	Moteur de changement
Agriculteur 1	Incohérence entre les pratiques et les valeurs : "C'est vrai que si je pouvais mettre moins de désherbant." Difficultés techniques et économiques : "C'est compliqué comme je suis jeune installé. Je suis d'avis de travailler sur optimiser techniquement et économiquement."
Agriculteur 2	Difficultés de gestion des adventices sur la parcelle.
Agriculteur 3	Difficultés techniques : salissement en augmentation et apparition de résistances. Ouverture des possibles : de nouvelles cultures pourraient diminuer la pression adventice. Conversion vers l'agriculture de conservation des sols qui impose de revoir la stratégie de gestion des adventices.
Agriculteur 4	Pas d'expression des moteurs de changement.
Agriculteur 5	Incohérence entre les pratiques et les valeurs : "La chimie, je ne suis pas fan" Difficultés de gestion de la flore : "Je vais y arriver mais là ce n'est pas le cas."

3.5. Trajectoire de salissement

Pour chacune des parcelles diagnostiquées, l'agrégation des éléments issus des compartiments du diagnostic sociotechnique fournit une trajectoire de salissement. Ces trajectoires présentent des similitudes qui conduisent à formuler une trajectoire dominante du salissement parcellaire de l'échantillon étudié. Le levier principal mobilisé pour maîtriser la flore est le désherbage chimique. Une année donnée, celui-ci n'a pas été effectué à des stades permettant l'efficacité optimale des traitements herbicides. Les facteurs explicatifs diffèrent selon les parcelles : contraintes organisationnelles, météo défavorable, frein psychologique de l'agriculteur. Les leviers agronomiques préventifs et curatifs peu mobilisés n'ont pas permis de pallier la moindre efficacité des traitements herbicides. Il en a résulté un salissement post-désherbage et donc une réalimentation conséquente du stock semencier de la parcelle, rendant d'année en année la gestion des adventices sur la parcelle de plus en plus difficile. Sur certaines parcelles, le salissement post-désherbage important, ainsi que l'utilisation fréquente de

matières actives identifiées comme présentant des cas de résistance en région amènent à formuler l'hypothèse forte d'une flore résistante sur la parcelle.

4. Discussion

A l'exception d'un agriculteur, les autres ont tous fait part d'un intérêt pour les éléments présentés dans le diagnostic sociotechnique. Le premier intérêt se situait dans l'apport de connaissance sur les processus biologiques : émergence et persistance des adventices problématiques, mode d'action des leviers et processus d'apparition des résistances par mode d'action. Le deuxième intérêt était la confirmation de la pertinence de certains leviers de gestion, déjà mis en place par l'agriculteur. Citons ici le labour occasionnel. Le troisième était l'émergence de nouvelles pratiques (ou optimisation des pratiques) grâce à la compréhension des processus biologiques. L'implantation de protéagineux d'hiver (dates de semis plus tardives que les céréales) ou le semis avec un travail du sol au moins aussi superficiel que le dernier faux-semis sont deux nouvelles pratiques identifiées par les agriculteurs-pilotes. L'agriculteur qui n'a pas identifié d'intérêt au diagnostic, estime être déjà au fait des éléments présentés (*« Agriculteur : C'est que un résumé. Enquêtrice : Ce que vous dites, c'est que ce sont des éléments que vous connaissiez déjà et qui sont ici synthétisés. Agriculteur : Oui* »). Les facteurs organisationnels et exogènes sont vus par les agriculteurs comme un cadre de contraintes et n'ont pas suscité lors de leur restitution de changement de perspective (« *Enquêtrice : Est-ce que l'objectif n'est pas d'avoir un système plus robuste vis-à-vis des aléas climatiques ? Agriculteur : Oui, c'est pour ça qu'on a changé les pneus du tracteur* [pour intervenir dans les parcelles même en situation de portance non optimale des sols], *là on ne peut pas faire plus »*).

L'outil d'estimation du stock semencier, en construction lors du diagnostic, n'a pas pu être déployé auprès des agriculteurs. Un diagnostic des usages, réalisé auprès de 10 conseillers et 4 agriculteurs en 2023, confirmerait l'intérêt d'une estimation approximative du stock semencier pour avoir une meilleure connaissance de la parcelle, appuyer le choix des cultures et des pratiques. Cet intérêt théorique et la complémentarité de l'information avec les autres éléments du diagnostic sociotechnique nécessiterait néanmoins d'être validé auprès d'un échantillon d'agriculteurs. Une complémentarité plus aboutie est également envisagée entre le stock semencier approximatif et la pression adventice induite par les pratiques agronomiques (couplage OdESSA / OdERA). Il s'agirait d'ajuster la note de risque d'apparition adventice sur la parcelle fournie par OdERA en fonction du stock initial de la parcelle.

Le diagnostic est la première étape d'une démarche d'accompagnement dont l'objectif est de gérer la flore adventice en intégrant plus de leviers alternatifs aux herbicides. Le diagnostic outille le conseiller sur les éléments techniques sur lesquels réfléchir avec l'agriculteur (issus des volets stock semencier, pratiques agronomiques et pratiques chimiques), ainsi que sur l'acceptabilité d'une transition de stratégie (déterminée par l'analyse du cadre socio-organisationnel). Le conseiller identifie ainsi les ressorts sur lesquels s'appuyer ou l'absence de ressorts (peu de moteurs de changement ou facteurs exogènes très présents), ce qui dans ce cas l'incite à ne pas poursuivre l'accompagnement. Les acteurs en charge d'initier le changement de pratiques sont souvent confrontés à l'écueil d'un immobilisme une fois le plan d'action défini avec l'agriculteur. Sur les cinq agriculteurs qui ont bénéficié de l'établissement d'un plan d'action à partir de l'échange sur les résultats du diagnostic sociotechnique et le panel de leviers agronomiques mobilisables pour gérer la flore, quatre d'entre eux ont expérimenté de nouvelles pratiques. Il s'agit de pratiques à effet partiel (diversification de la succession culturale, modalités de travail du sol à l'interculture ou d'implantation), qui isolément sont insuffisantes à la gestion de la flore par la prévention agronomique. Elles contribuent néanmoins à la montée en compétence de l'agriculteur vis-à-vis de la pratique et l'identification des modalités permettant de maximiser son efficacité. Notons que le cadre d'expérimentation était celui du projet Adventurh pour trois agriculteurs. Le suivi des expérimentations étant pour partie réalisé par l'équipe projet. La question

reste, une fois le projet achevé, de savoir si la dynamique va se poursuivre au sein du binôme agriculteur – technicien ou pas.

5. Conclusion

Le diagnostic sociotechnique réalisé dans le cadre du projet Adventurh a testé plusieurs outils d'évaluation de la flore adventice en parcelle agricole dans l'objectif de comprendre les facteurs de salissement et in fine, d'adapter les pratiques agricoles sur la parcelle. Il intègre un nouvel élément, peu analysé jusqu'à présent faute de méthode facilement accessible pour le qualifier, le stock semencier présent dans l'horizon travaillé de la parcelle. Il recense également les motivations au changement de pratiques des agriculteurs, avec le postulat que si ces motivations sont absentes, les causes du salissement identifiées ne permettront pas l'introduction de nouvelles pratiques dans le système de culture. L'accroissement des problématiques de maîtrise des adventices dans les parcelles, ainsi que le retrait d'homologation plus ou moins avancé de certaines substances actives incitent à penser que les motivations au changement seront de plus en plus nombreuses.

Les causes de salissement des parcelles identifiées auprès de l'échantillon diagnostiqué sont : (1) une moindre efficacité des herbicides au sein de stratégies qui s'appuient fortement sur ce levier et peu sur les pratiques agronomiques, (2) un stock semencier au sein des parcelles qui s'est potentiellement accru progressivement ou brusquement en lien avec un accident de désherbage et qui rend la stratégie de maîtrise de la flore sous-dimensionnée par rapport à la pression adventice.

Ces premiers résultats nous confirment que le diagnostic sociotechnique pourrait être la première étape d'une démarche d'accompagnement individuel de gestion de la flore adventice avec peu ou pas d'herbicides, grâce à la montée en compétence pas-à-pas des agriculteurs vis-à-vis des leviers agronomiques.

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

Déclaration d'intérêt

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

Références bibliographiques

Agence de l'Eau Artois-Picardie., 2018. Bilan sur la présence des pesticides dans les cours d'eau du bassin Artois-Picardie – situation 2017. 5 pages.

Agreste, 2020. Recensement agricole 2020.

Boquet B., 2019. Etude sur les problèmes de gestion des adventices en Hauts-de-France – Synthèse Agro-Transfert Ressources et Territoires des résultats du diagnostic. 8 pages.

Chauvat S., Kling-Eveillard F., Servière G., Cournut S., Dufour A, Hostiou N., Machefer J., Sicard G., 2015. Banque de ressources pour analyser trois dimensions du travail des éleveurs. Idele. 39 pages.

Coquil X., Dedieu B., Béguin P., 2017. Professional transitions towards sustainable farming systems: The development of farmers' professional worlds. Work, 57 (3), 325-337.

Délye C., Colbach N., Le Corre V., 2020. Résistances aux herbicides : mécanismes, situation en France et bonnes pratiques. *Innovations agronomiques*, 81, 33-49.

Fried G., Chauvel B., Reboud X., 2008. Evolution de la flore adventice des champs cultivés au cours des dernières décennies : vers la sélection de groupes d'espèces répondant aux systèmes de culture. *Innovations agronomiques*, 3, 15-26.

Grundy A. C., Jones N. E., 2002. What is the weed seed bank? *In* Weed Management Handbook, 9th Edition. Robert E. L. Naylor (Editor). 432 pages.

Lewin, K., 1947. Frontiers in group dynamics: concept, method and reality in social science; social equilibria and social change. Human Relations, 1, 5-41.

Mawois M., Vidal A., Revoyron E., Casagrande M., Jeuffroy M.-H., Le Bail M., 2019. Transition to legume-based farming systems requires stable outlets, learning, and peer-networking. Agronomy for Sustainable Development, 39, 14.

Mahé I., Cordeau S., Bohan D. A., Derrouch D., Dessaint F., Millot D., Chauvel B., 2020. Soil seedbank : old methods for new challenges in agroecology ? Annals of Applied Biology, 178, 1, 23-38.

Moss S., 2019. Integrated weed management (IWM): why are farmers reluctant to adopt non-chemical alternatives to herbicides? Pest Management Science, 75, 5, 1205-121.

Munier-Jolain N., 2018. Leviers de la protection intégrée en grandes cultures : principes, modes d'action, efficacité. *In* Chauvel B., Damency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. Gestion durable de la flore adventice des cultures. Editions Quae. 354 pages.

Pasquier C., Angevin F., Le Bail M., 2020. Contribuer au diagnostic des obstacles à la réduction des herbicides dans les exploitations agricoles françaises. Enquêtes sur le plateau du Neubourg. *Innovations agronomiques*, 81, 151-171

Rogers, E.M., 1962. Diffusion of Innovations. The Free Press, New York, 367 pages.

Schwartz-Lazaro L.M., Copes J.T., 2019. A review of the soil seedbank from a weed scientists perspective. Agronomy, 9(7), 369.

Pour citer cet article : Marie Flament, Jérôme Pernel, Pierre-Yves Bernard. Diagnostic sociotechnique du salissement parcellaire en région Hauts-de-France. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.163-173. 10.17180/ciag-2025-vol101-art14

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

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

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

Apports d'outils d'évaluation dans des démarches de co-conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices

Nicolas CAVAN[1], Jeanne ALEXANDRE[1,2], Claire GOETZ[2], Alice NIDRICHE[1,2], Lucille TRINH-QUY[1], Nathalie COLBACH[1], Wilfried QUEYREL[1], Frédérique ANGEVIN[2]

[1] Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

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

Correspondance : nicolas.cavan@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art15

Résumé

La diminution de l'usage d'herbicides nécessite de multiples changements de pratiques culturales, raisonnés à l'échelle du système de culture. Ces combinaisons de changements ont des effets nombreux (qui peuvent limiter l'adoption de telles pratiques innovantes) et rendre difficile leur évaluation par expertise. Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé différents modèles (FLORSYS, DEXiPM) pour évaluer des systèmes de culture co-conçus dans des collectifs d'agriculteurs et d'agricultrices. Cela a permis d'élargir le point de vue (calcul de nouveaux indicateurs) et de considérer le temps long (e.g. résilience d'un système face à un pic de pression adventice). Nous avons également montré qu'il est possible d'utiliser, sous conditions (temps disponible, formation et support, simplicité) un outil d'aide à la conception (DECIFLORSYS) en cours d'atelier, ce qui permet de fournir plus rapidement des résultats d'évaluation, de préciser le système innovant co-conçu et/ou de stimuler la conception d'un nouveau système innovant pour améliorer les performances de gestion durable des adventices.

Mots-clés : système de culture, modèles, co-conception, gestion des adventices, durabilité

Abstract: Feedback from co-designing innovative, low-herbicide-use systems with farmers: the role of tools in support of facilitation

Reducing herbicide use requires multiple changes in agricultural practices, thought at the cropping system scale. These combined changes have numerous effects (which may limit the adoption of such innovative practices) and make it difficult to assess them by expert assessment. Hence, we used various models (FLORSYS, DEXiPM) to evaluate cropping systems co-designed by groups of farmers. The presentation of the assessment results allowed to broaden the perspective (calculation of new indicators) and to consider long term issues (e.g., resilience of a system in the face of a peak in weed pressure). We also showed that it is possible to use, under certain conditions (available time, training and support, simplicity) a design aid tool (DECIFLORSYS) during the workshop. Using it during the workshop makes it possible to provide evaluation results more quickly, to improve the description of the co-designed innovative system and/or to stimulate the design of a new system to improve sustainable weed management performances.

Keywords: cropping systems, models, co-design, weed management, sustainability

1. Introduction

Les adventices constituent un des ravageurs les plus dommageables dans les systèmes de grande culture (Oerke, 2006), tout en contribuant simultanément à la biodiversité (Marshall *et al.*, 2003). L'usage d'herbicide est la technique culturale la plus efficiente pour maîtriser ces adventices, mais les

conséquences de cet usage sur l'environnement et la santé conduisent à une réduction de cet usage (Chauvel *et al*., 2012).

Pour compenser la diminution ou la suppression de l'usage d'herbicides, il est nécessaire de combiner plusieurs autres techniques culturales, qui sont toutes individuellement moins efficaces. Cela entraine de nombreux changements à l'échelle du système de culture, ces changements et leurs effets sur d'autres aspects des systèmes limitant l'adoption d'une gestion plus durable des adventices (Bastiaans *et al*., 2008). En France, ce résultat a pu être observé au sein du réseau DEPHY Ferme du Plan Ecophyto. En effet, après 10 ans au sein du réseau, avec pour objectif une réduction de 50 % de l'usage des produits phytosanitaires, les systèmes des filières grande culture et polyculture élevage ont réduit en moyenne l'usage des produits phytosanitaires hors herbicides de 38 %, mais celui des herbicides de seulement 15 % (CAN DEPHY, 2023).

Par ailleurs, la problématique des adventices doit se gérer sur deux échelles de temps différentes, avec la nuisibilité primaire – qui concerne la culture de la campagne en cours – et la nuisibilité secondaire – via l'alimentation du stock semencier de la parcelle (Macé *et al*., 2007).

Comme il est très compliqué d'expertiser les effets de combinaisons de pratiques culturales sur du long terme, l'utilisation de modèles pour évaluer des systèmes de cultures innovants peut donner des indications pour choisir et/ou modifier des systèmes de culture.

De plus, pour lever certains freins à l'adoption de pratiques innovantes, la co-conception avec les agriculteurs et agricultrices peut permettre de prendre en compte leurs connaissances pratiques, les contraintes et les spécificités de leur activité (*activity-centered* design, présenté dans la typologie de Lacombe *et al*., 2018). Baastians *et al*. (2008) indiquaient également que la recherche de stratégies 'sur mesure' de gestion des adventices sur mesure devrait permettre de favoriser l'adoption de pratiques innovantes.

Partant de ces deux constats, nous avons testé une démarche de co-conception avec des groupes d'agriculteurs et agricultrices volontaires, en mobilisant des modèles d'évaluation de systèmes de culture et en testant un outil d'aide à la conception de système de culture utilisable lors d'ateliers de conception. Nous avons souhaité répondre aux questions suivantes : dans le cadre d'une conception de système pour une gestion durable des adventices, quels apports permet une évaluation par des modèles et outils d'aide à la conception par rapport à une évaluation par les personnes réalisant la co-conception ? Et quelles sont les conditions nécessaires à l'utilisation d'un outil d'évaluation lors d'un atelier de conception ?

2. Matériel et méthodes

2.1. Contexte de co-conception

Les différentes démarches de co-conception ont été réalisées pour trois agriculteurs, dans deux contextes différents :

- un Groupement de Développement Agricole (GDA) basé à Brienne-le-Château (Aube) : une quinzaine de membres ont participé à la définition de la cible de conception : *« maîtriser les adventices dans un système peu dépendant des herbicides, rentable et durable »*. Des contraintes ont été associées à cette cible : la limitation du travail du sol, la prise en compte du réchauffement climatique (qui a des conséquences mentionnées sur le choix des cultures, leur date de semis et l'implantation des couverts) et l'utilisation de la diversification des cultures comme levier. Les indicateurs évoqués pour évaluer l'atteinte de cet objectif sont la « rentabilité » (marge semi-nette), le coût / la quantité d'intrants utilisés (dans le contexte de la forte inflation de ces coûts début 2022), la charge de travail et sa répartition,

la maîtrise des adventices (particulièrement du ray-grass, le plus problématique dans le système de culture de l'agriculteur volontaire pour la démarche de reconception) ;

- le CIVAM (Centre d'initiatives pour valoriser l'agriculture et le milieu rural) de l'Oasis, à Châlons-en-Champagne (Marne), pour deux agriculteurs :
    - un agriculteur (A1) en conversion en agriculture biologique, avec deux cibles de conception liés à cette conversion : maintenir une bonne gestion des adventices en renonçant à l'usage d'herbicides et viser l'autonomie azotée, comme il ne peut plus utiliser d'engrais azotés de synthèse et que les engrais organiques certifiés pour l'agriculture biologique sont trop coûteux. Il a réalisé la conception de ses systèmes seul, avant d'en discuter avec ses collègues lors de la présentation des résultats d'évaluation par les outils (il n'y a donc pas eu d'évaluation préalable de son système par ses pairs),
    - Un second agriculteur (A2), déjà en agriculture biologique, souhaite quant à lui améliorer la maîtrise des adventices les plus problématiques pour son système (vulpin, ray-grass, chénopode et chardon) et la rentabilité de son système. Pour évaluer ces objectifs, en plus de la présence de ces différentes adventices, il souhaite observer les conséquences de la reconception sur l'« équilibre entre ses produits et ses charges » (là aussi estimé par la marge semi-nette), la demande en investissements et l'autonomie azotée de son système (pour la même raison que son collègue).

2.2. Démarche de co-conception

La démarche est décrite de manière plus complète dans l'article de Queyrel *et al*., (2024) dans ce numéro. Elle se décompose en trois étapes principales :

- la définition d'une problématique principale pour le groupe ou pour un agriculteur volontaire dans le groupe pour entrer dans la démarche de co-conception. Cette problématique peut-être plus ou moins précise (par exemple « un problème général de gestion des adventices » ou « gestion du ray-grass en agriculture biologique ») ;
- la co-conception d'au moins un système de culture innovant pour répondre à la problématique. Plusieurs systèmes peuvent être proposés et plusieurs outils peuvent être mobilisés pour faciliter cette conception (apport de connaissances spécifiques en amont, utilisation de la mallette Mission EcoPhyt'Eau) ;
- l'évaluation du système de référence et du (des) système(s) innovant(s) co-conçu(s). Dans notre cas, nous réalisons une évaluation avec deux modèles (voir les détails ci-dessous) : FLORSYS pour les performances des systèmes pour la gestion durable des adventices et DEXiPM pour l'évaluation de la durabilité de ces systèmes, comme plusieurs composantes sont susceptibles de varier avec les changements de pratiques imposés par la gestion des adventices.

Cette démarche est modulable : la durée des étapes peut varier, le nombre de participants à chaque étape également, et des allers-retours sont possibles entre les étapes si les personnes réalisant la co-conception en expriment le besoin.
Par ailleurs, les deux premières étapes peuvent être réalisées simultanément ; en fonction des préférences et contraintes organisationnelles de chaque groupe. La troisième et dernière étape (restitution des résultats) ne peut être faite en simultané dans notre étude car le temps d'évaluation des systèmes de culture avec FLORSYS et DEXiPM est trop important. Nous avons testé l'utilisation de DECIFLORSYS (un méta-modèle dérivé de FLORSYS, plus simple) en cours d'atelier pour avoir

directement des premiers résultats d'évaluation. Néanmoins, cela ne permet pas d'avoir accès à une évaluation de la durabilité ou de certaines de ces composantes en cours d'atelier.
Une description plus complète de la démarche est faite par Queyrel *et al*. (2023) et un guide pour faciliter cette démarche sera bientôt publié (Queyrel *et al*., 2024).

2.3. Outils d'évaluation des systèmes de culture utilisés

FLORSYS est un champ virtuel sur lequel de nombreux systèmes de culture contrastés peuvent être expérimentés, avec une large gamme de mesures modélisées sur les états des cultures, des adventices et du sol (Colbach *et al*., 2021). Les variables d'entrée de ce modèle comprennent (1) une description du champ simulé, avec la météo journalière (précipitation, évapotranspiration potentielle, rayonnement, températures minimale, moyenne et maximale), la latitude et le sol (texture, profondeur, ...), (2) toutes les cultures et opérations culturales dans le champ, avec les dates, outils et options et, (3) le stock semencier initial de la flore adventice estimé à partir de relevés floristiques régionaux. Le modèle est actuellement paramétré pour 32 espèces adventices annuelles et 30 espèces cultivées. À partir de la levée des plantes, le modèle représente le couvert en 3D, simulant chaque plante cultivée et adventice individuellement. Les processus de pré-levée sont simulés verticalement en 1D, à partir de la surface du sol. Le développement de chaque individu est dépendant de la compétition pour la lumière et pour l'azote.

Plusieurs indicateurs de nuisibilité des adventices (pertes de rendement dues aux adventices, manque de résilience face à des pics de pression adventice, pollution de récolte, problème de récolte) et de contribution des adventices à la biodiversité (richesse spécifique et équitabilité de la flore, contribution de la flore à l'offre trophique pour les abeilles, les oiseaux et les carabes) sont calculés par campagne culturale. Chaque système de culture est simulé pendant une durée de 30 ans, et avec 10 répétitions climatiques différentes (successions d'années météorologiques différentes).

Ce modèle n'est pas utilisable en cours de d'atelier de co-conception, car il faut trop de temps pour préparer une simulation et l'exécuter. Néanmoins, DECIFLORSYS, un méta-modèle créé à partir de milliers de simulations de systèmes de cultures faites avec FLORSYS, permet d'obtenir des résultats dans la durée d'un atelier (de 30 minutes – à une heure de saisie pour un système de culture, quelques secondes de simulations) (Colas *et al*., 2020). Il permet d'obtenir une estimation des indicateurs calculés avec FLORSYS avec une description un peu moins fine des pratiques culturales, mais ne permet pas de déterminer les causes d'un résultat précisément comme le modèle d'origine. La description complète de cet outil est disponible dans ce numéro (Colbach *et al*., 2024).

DEXiPM a été conçu pour évaluer la durabilité de systèmes de culture innovants ayant pour objectif de réduire significativement l'usage de produits phytosanitaires (Pelzer *et al*., 2012). La durabilité du système est évaluée de manière qualitative (5 classes de « très faible » à « très élevé »), à partir de 75 critères décrivant les pratiques culturales des systèmes de culture et son contexte, agrégés successivement pour atteindre ce dernier critère.

3. Résultats

3.1. Une évaluation différente par les personnes réalisant la co-conception et par les modèles

En plus de l'évaluation des systèmes de culture de référence et innovants par FLORSYS et DEXiPM, nous avons demandé aux personnes participant à la co-conception de réaliser leur propre évaluation des systèmes à l'issu du processus de co-conception. Les résultats de l'auto-évaluation portent sur des critères qui ont été cités par les membres du groupe de co-conception, qui leur permettent d'estimer par eux-mêmes si l'objectif de conception a été atteint ou non. C'est pour cette raison que l'on n'a pas tout

à fait les mêmes critères dans les deux groupes. La comparaison de l'auto-évaluation et de l'évaluation par les modèles est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Évolution des performances entre le système de référence et le système innovant co-conçu, auto-réalisée par le groupe de co-conception (attendue) et évaluée avec des modèles (FLORSYS pour la gestion durable des adventices et DEXiPM pour l'évaluation de la durabilité). Cette comparaison a été faite dans les deux cas impliquant des groupes (GDA Brienne et l'agriculteur A2 du CIVAM de l'Oasis). Les résultats sont présentés de manière qualitative : 1. Evolution défavorable ; 2. Tendance à évolution défavorable ; 2.5 : Aucune tendance ; 3. Tendance à une évolution favorable ; 4. Evolution favorable. Les autres notes à décimales dans le GDA Brienne sont dues à un calcul de la moyenne des réponses individuelles (alors qu'il y a eu une seule réponse par consensus dans le CIVAM de l'Oasis).

		GDA Brienne		**CIVAM Oasis (A2)**	
	Variable auto-évaluée ou évaluée	*Attendue*	*Evaluée*	*Attendue*	*Evaluée*
Gestion durable des adventices	Pertes de rendement dues aux adventices		4		3
	Manque de résilience face à des pics de pression adventice	3.6	1	3	2
	Pollution de récolte		4		1
	Problèmes de récolte		2		1
	Richesse spécifique de la flore		1		2
	Equitabilité de la flore		1		3
	Contribution à l'offre trophique pour :				
	• Les abeilles		2.5		2
	• Les oiseaux		4		4
	• Les carabes		4		3
Eléments de la durabilité	Rentabilité économique	3.2	4	2	4
	Autonomie de l'exploitation	3.4	2.5	2.5	4
	Durabilité sociale	3.4	4		4
	dont Organisation et temps de travail	3.25	3		2.5
	Durabilité environnementale		4		4

On peut constater, par ailleurs, que l'évaluation par le modèle permet d'introduire de nouveaux critères (contribution des adventices à la biodiversité, durabilité environnementale) et de préciser la « maîtrise des adventices » comme étant un bouquet d'indicateurs (pertes de rendement, problème et pollution de récolte et résilience face à des pics de pression adventice).

Si on compare l'auto-évaluation et l'évaluation, on constate qu'elles sont proches en ce qui concerne les pertes de rendement dues aux adventices (qui est le principal critère que l'on cherche à modifier ou maintenir, puis à évaluer). En revanche, la perception des autres composantes de la nuisibilité (notamment le manque de résilience face à des pics) est moindre sans le modèle, ce qui peut constituer un second intérêt pour réaliser l'évaluation. C'est d'ailleurs suite à la demande d'un groupe de co-conception que cet indicateur a été développé. Ces derniers cherchaient une réponse à la question : *« Si mon système fait face à un pic de pression adventice, est-ce qu'il va se résorber ou dois-je changer radicalement de système ? ».*

Enfin, les personnes ayant réalisé la co-conception sont globalement plus pessimistes que le modèle (DEXiPM) pour l'évaluation d'autres critères, importants pour identifier des potentiels compromis à faire pour obtenir une gestion plus durable des adventices. Est-ce que le modèle est trop optimiste ou les agriculteurs et agricultrices trop pessimistes par rapport à la réalité ? En fonction de la réponse à cette question, cela pourrait indiquer qu'il y a moins de compromis à réaliser que ce que pensent les personnes participantes.

3.2. Explorer des compromis et aider à la prise de décision

L'évaluation par des modèles des systèmes de culture de référence et innovant permet de les comparer sur des critères pour lesquels ce n'est pas fait habituellement (faute d'intérêt, par manque de données disponible ou les deux). Certains critères évalués permettent d'illustrer des compromis à réaliser dans la démarche de co-conception. Sans chercher à être exhaustifs, nous allons l'illustrer avec deux situations pour deux agriculteurs différents :

Compromis entre gestion des adventices et amélioration de l'autonomie azotée **:** l'agriculteur A1 souhaitait concilier ces deux objectifs de conception, cruciaux dans le cadre de sa conversion à l'agriculture biologique (suppression de l'usage des herbicides et accès coûteux/difficile à des fertilisants organiques biologiques). Cela l'a conduit à proposer des modifications de la rotation de son système de culture (ajout du chanvre pour la maîtrise des adventices et de légumineuses, dont le soja, pour augmenter les apports d'azote par fixation symbiotique).

Lors de la présentation du système reconçu, cet agriculteur nous a indiqué qu'il avait pensé à placer le soja après le chanvre, pour que le soja profite d'une parcelle « propre » grâce à la capacité concurrentielle du chanvre. Néanmoins, il a interverti ces deux cultures avant de nous présenter son système reconçu, comme il souhaitait bénéficier de l'apport d'azote des résidus du soja sur le chanvre (qui *« passe d'une culture extensive en [agriculture] conventionnel[le] à la culture la plus intensive en [agriculture] biologique, comme on ne doit vraiment pas la louper »*).

Les résultats de simulations avec FlorSYS ont illustré un compromis entre ces deux objectifs : lorsque le soja précède le chanvre, il est probable de provoquer un pic de pression adventice difficilement maîtrisable par le chanvre suivant. En revenant à l'ordre initialement envisagé (chanvre puis soja), la nuisibilité des adventices est moindre, mais l'azote des résidus de soja ne bénéficiera pas au chanvre, culture la plus « intensive » de la rotation en agriculture biologique (résultats non montrés ici). Ces résultats d'évaluation ont conduit l'agriculteur concerné à proposer un autre système innovant, modifiant en profondeur la rotation envisagée.

Compromis entre la maîtrise des adventices sans herbicide et l'impact du travail du sol sur la fertilité biologique du sol **:** pour l'agriculteur A2, la réintroduction du labour dans le système de culture constitue un levier important défini lors de la reconception pour augmenter la résilience de ce système face à des pics de pression adventice (labour occasionnel moins d'un an sur 3). Néanmoins, cet agriculteur craint une perte de fertilité du sol (fertilité physique et fertilité biologique). L'évaluation de ces systèmes avec DEXiPM indique que ces critères ne changent pas en passant du système de référence au système innovant. En regardant plus finement, l'effet négatif de la réintroduction du labour est limité (avec une fréquence inférieure à 1 an sur 2) et compensé par l'effet positif de l'arrêt de l'usage de produits phytosanitaires impactant la faune (insecticides et molluscicides).

3.3. Validation d'un usage de DECIFLORSYS en cours d'atelier de conception

Au cours du projet, nous avons testé l'outil DECIFLORSYS (première version) uniquement dans le groupe du GDA de Brienne. Ce test nous a permis de montrer qu'il est possible de l'utiliser pour obtenir une première évaluation du système de référence et du ou des systèmes innovants qui sont conçus. L'utilisation de DECIFLORSYS en cours d'atelier présente trois plus-values :

- **fournir des résultats d'évaluation à toutes les personnes participant à la conception :** en général, les évaluations de systèmes de culture sont réalisées au bureau, avec une restitution des résultats à une date ultérieure où certaines personnes du groupe peuvent être absentes. Dans le cas de l'usage de DECIFLORSYS, chaque personne ayant contribué à la conception est sûre de repartir avec une évaluation ;

- **préciser les pratiques culturales du système innovant co-conçu :** la personne chargée de la saisie du système de culture innovant est amenée à demander des précisions sur les pratiques du système de culture, afin de pouvoir le saisir dans l'outil. Ainsi, les agriculteurs et agricultrices réfléchissent collectivement à ces informations manquantes, plutôt que d'avoir une complétion par des valeurs par défaut ou discutées uniquement avec le conseiller ou la conseillère ;
- **stimuler la co-conception d'un nouveau système innovant (ou d'une variante) :** si les résultats du système innovant sont moins bons que prévus, les agriculteurs et agricultrices peuvent proposer des variantes dans le temps (contraint) de la fin d'atelier, voire proposer un nouveau système complet (plutôt par retour individuel) s'ils sont motivés par l'envie d'améliorer les performances du système innovant. Cette plus-value existe également avec des modèles non utilisables au cours d'un atelier (trop long à l'utilisation ou en calcul), mais cela nécessite d'organiser au moins un autre atelier pour présenter les résultats et une autre phase d'analyse après cet atelier, ce qui n'est pas toujours possible.

Cette utilisation de DECIFLORSYS est faisable (nous l'avons montré en faisant un test lors de l'atelier du GDA de Brienne, avec une saisie réalisée par l'animatrice de ce GDA), mais en respectant plusieurs conditions :

- il faut un ordinateur et une connexion internet stable (l'outil dans sa version actuelle est en ligne). Au cours du test en conditions avec le GDA de Brienne, il y a eu deux coupures, qui ont nécessité de recommencer, partiellement, la saisie du système de culture innovant.
- il faut au minimum deux personnes pour réaliser l'atelier de co-conception, dont une qui saisira le système en cours de conception, car il n'est pas possible de faire cette saisie et la facilitation du processus de conception simultanément.
- dans l'idéal, il faudrait que le système de culture de référence ait été saisi en amont dans l'outil : en général, il est connu assez précisément et cela fait gagner du temps pour la saisie du système de culture innovant. Ce temps gagné peut favoriser le temps d'interaction avec le groupe réalisant la conception ou augmenter le temps d'interprétation et de prise en main des résultats (cf. point suivant).
- la personne qui présente les résultats de l'évaluation par DECIFLORSYS (en général, la même que celle qui fait la saisie) doit être suffisamment à l'aise avec l'outil pour pouvoir prendre rapidement du recul pour l'interprétation des résultats. Dans l'idéal, il faudrait avoir déjà fait au moins une fois cet exercice de comparaison des performances de deux systèmes de culture en amont de l'atelier. Lors de l'atelier test, l'animatrice a obtenu les résultats des simulations seulement quelques minutes avant la restitution et a demandé à la personne l'accompagnant de faire la restitution à sa place.

4. Discussion

4.1. Des évaluations différentes et complémentaires entre l'expertise et la modélisation

Les personnes ayant participé aux ateliers de co-conception et les modèles arrivent à une estimation des pertes de rendement moyennes dues aux adventices assez similaires (c'était leur principal critère d'évaluation des performances des systèmes conçus).

L'évaluation par les pairs (les experts dans notre processus de co-conception) correspond mieux au contexte de travail du groupe que l'évaluation par modélisation (même si on peut s'en approcher avec un paramétrage plus fin des outils). Néanmoins, elle présente des limites, comme la difficulté à évaluer

un système dans un contexte de changement / transition. L'évaluation par des outils (notamment des modèles) peut compléter celle réalisée par les experts. La résilience du système de culture face à des pics de pression adventice est un indicateur de sortie de FLORSYS qui a été développé à la demande d'un groupe d'agriculteurs et agricultrices dans une étude antérieure, qui ne pouvaient répondre seuls à la question « *Si un pic de population adventice survient dans mon système, dois-je le changer ou bien est-il suffisamment robuste pour revenir à la normale ?* ». Dans cette étude, si les pertes de rendement moyennes dues aux adventices restent similaires, la résilience des systèmes innovants face à des pics de pression adventice diminue.

L'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes avec DEXiPM comble également un autre manque. En effet, il est complexe d'anticiper par expertise tous les changements impliqués par la reconception d'un système de culture, avec de potentiels antagonismes (comme celui entre la maîtrise des adventices et l'amélioration de l'autonomie azotée pour un des systèmes innovants testés). Ce manque d'informations constitue un frein dans l'adoption de pratiques innovantes pour la gestion des adventices (Bastiaans *et al*., 2008).

La comparaison des évaluations par la modélisation et par expertise est l'occasion d'un apport de connaissances qui peut aller dans les deux sens : c'est une nouvelle source d'information pour les concepteurs et conceptrices des systèmes innovants et cela permet également parfois d'améliorer le modèle lui-même (c'est le cas avec des améliorations en cours sur les processus de compétition pour l'azote, récemment ajoutés dans FLORSYS).

4.2. Un outil simple d'utilisation, répondant aux attentes et avec du temps pour l'utiliser

Dans leur brève histoire de la modélisation de systèmes agricoles, une des leçons tirées par Jones *et al*., (2017) est la nécessité d'avoir des données et des modèles axés sur l'utilisateur (« *user-driven* ») et pas seulement un outil d'aide à la décision associé à un modèle. C'était la volonté première lors de la création de DECIFLORSYS, qui a impliqué dès le début des personnes futures utilisatrices. Le test réalisé en cours d'atelier dans cette étude a conduit à une nouvelle simplification du parcours utilisateur mis en place dans la première version de l'outil (Colas *et al*., 2020).

L'usage de résultats de modélisation dans un processus de co-conception peut permettre d'avoir des boucles plus rapides de conception – évaluation et donc d'accélérer l'exploration des systèmes pouvant répondre à une ou plusieurs problématiques données. C'est ce qui s'est produit pour l'agriculteur A1 du CIVAM de l'Oasis avec l'utilisation de FLORSYS et des allers-retours par mails rapides et de nouvelles évaluations discutées individuellement puis en groupe. Cela a été également constaté dans plusieurs processus de conception de systèmes de culture accompagnés par des modèles (Martin *et al*., 2013). Le fait que notre outil soit utilisable au cours d'un atelier de co-conception peut permettre d'avoir une (ou plusieurs) boucle(s) au cours d'un même atelier. Par ailleurs, nous avons constaté que la saisie du système de culture dans l'outil en cours d'atelier de co-conception implique de décrire plus finement les pratiques et choix techniques de ce (ces) système(s) innovant(s), collectivement au cours de l'atelier, plutôt qu'en plus petit comité après l'atelier (une des phases du suivi post-atelier décrit par Jeuffroy *et al*., (2022)).

Néanmoins, d'autres conditions sont nécessaires à l'utilisation future de DECIFLORSYS dans des ateliers de co-conception. On peut citer l'existence d'une formation à son usage (une première co-construction de formation a été réalisée par Pleux (2021)), mais également celle d'un support utilisateur et d'une maintenance pérenne, éléments qui font souvent défaut aux outils créés dans des projets dès la fin de ces derniers. Enfin, même sans utiliser d'outils d'évaluation, il faut du temps afin de mettre en place un conseil stratégique, ainsi que bien souvent des collaborations entre conseillers d'une même organisation ou d'organisations différentes (Gagneur and Thiery, 2020).

4.3. Perspectives de recherche

La durée d'un projet ne permet pas d'observer les effets de long terme de cette démarche de co-conception, pour les agriculteurs et agricultrices dont le système de culture de référence a servi de base à la co-conception d'un système innovant, mais également pour les autres personnes ayant participé au processus. Les changements de pratiques culturales profonds (e.g. diversification de la rotation) dans ce cadre de conception peuvent nécessiter plusieurs années et plusieurs boucles de conception – évaluation (Cavan *et al*., 2023). Il existe quelques exemples d'études de trajectoires de changement de pratiques (e.g. Chantre *et al*., 2015), mais cela fait partie des défis listés par Prost *et al*., (2023) pour accompagner la transition des exploitations agricoles vers l'agroécologie.

Enfin, les démarches de co-conception ont été réalisées en prenant en compte certaines contraintes des agriculteurs et agricultrices, notamment l'existence de débouchés pour les cultures de diversification de la rotation. Cela permet d'aboutir à des systèmes innovants plus facilement mis en œuvre, mais contraint l'usage de ce levier. Aller plus loin sur ce dernier impliquerait d'adresser la question du verrouillage socio-technique (Meynard *et al*., 2018), en impliquant d'autres acteurs des filières dans les démarches de conception et, potentiellement, en étudiant les effets de l'adoption d'un nouveau système de culture aux échelles de la ferme et du territoire.

4.4. Perspectives de développement pour les outils

DECIFLORSYS a été utilisé en conditions réelles dans un groupe et les systèmes de culture des deux groupes ont été évalués avec cet outil, pour comparaison avec les résultats obtenus avec FLORSYS. L'évolution entre la référence et le (ou les) système(s) innovant(s) est similaire dans 8 cas sur 10 (résultats non montrés dans cet article). Néanmoins, cette expérience a confirmé qu'il y avait des éléments à revoir, y compris le cheminement utilisateur dans l'application. La version 2 de DECIFLORSYS, prenant en compte ces retours, n'a pas encore pu être testée au sein d'un autre collectif, ce qu'il conviendrait de faire pour confirmer ces résultats. De plus, un des groupes dans lequel a été effectuée la démarche de co-conception était spécifiquement intéressé par les résultats plus précis, obtenables uniquement avec FLORSYS.

La démarche de co-conception peut se faire avec différents outils concernant l'évaluation des performances de gestion des adventices dont le choix dépend des objectifs et contraintes du groupe s'engageant dans la démarche. Une comparaison de tels outils est disponible dans ce numéro (Colbach *et al*., 2024). Un guide méthodologique, présentant différentes options, sera proposé à l'issue du projet et est présenté par Queyrel *et al*. (2024) dans ce même numéro.

Enfin, malgré la prise en compte des retours utilisateurs pour simplifier et/ou rendre plus ergonomique DECIFLORSYS, il reste un inconvénient à la démarche : l'obligation de saisir les données d'un système de culture une nouvelle fois dans un nouvel outil. Le manque d'interopérabilité entre modèles fait partie des leçons tirées pour le futur par Jones *et al*. (2017). L'interopérabilité avec le système d'information Agrosyst (Jolys *et al*., 2016), contenant, entre autres, les données des réseaux DEPHY Ferme et Expé, fait partie des perspectives de développement, tout comme l'utilisation de l'interface de DECIFLORSYS (en R Shiny) pour la saisie de systèmes de culture à évaluer aussi avec FLORSYS.

5. Conclusion

Chaque situation de co-conception a mené à au moins un système innovant permettant d'atteindre ou de s'approcher de la cible de conception des agriculteurs volontaires pour la démarche (d'après l'évaluation par les pairs ou celle réalisée par les outils mobilisés).

L'utilisation d'outils d'évaluation des performances de gestion des adventices (comme FLORSYS) ou de la durabilité (comme DEXiPM) permet de classer les systèmes selon leurs effets sur le temps long (par

exemple, la résilience des systèmes de culture face à des pics de pression adventice) et / ou d'avoir une vision plus complète des systèmes conçus (par ex. prise en compte de l'apport des adventices à la biodiversité). Cela peut faciliter le changement de pratiques culturales, en contribuant à répondre à ces interrogations difficiles à appréhender uniquement en ayant recours à l'expertise.

Ces résultats, lorsqu'ils sont présentés, conduisent notamment à discuter de compromis entre objectifs et peuvent mener à un nouveau cycle de conception – évaluation en cas de résultats encore améliorables. Ces boucles de conception – évaluation peuvent être rendues plus faciles (et plus rapides) grâce à des outils plus simples d'utilisation (DECIFLORSYS dans nos ateliers), à condition qu'ils correspondent au(x) besoin(s) identifié(s), que les conditions matérielles soient suffisantes (ordinateur, connexion internet, etc.) et qu'un support utilisateur existe (guide utilisateur, formation initiale, aide ponctuelle à l'interprétation des sorties).

Pour que cette démarche de conception puisse, au-delà du projet, contribuer à une gestion plus durable des adventices, un guide a été réalisé pour accompagner la démarche de co-conception de systèmes innovants, en s'adaptant notamment aux conditions dans lesquelles la démarche est envisagée (Queyrel *et al*., 2024). Enfin, d'autres outils peuvent être mobilisés pour évaluer les systèmes conçus vis-à-vis de la gestion des adventices, un article dans ce numéro en présente une comparaison (Colbach *et al*., 2024).

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 ont utilisé des technologies assistées par intelligence artificielle pour la réalisation de la traduction initiale de l'abstract du français à l'anglais.

ORCIDs des auteurs

Frédérique ANGEVIN : https://orcid.org/0000-0002-1555-9160 ;

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X ;

Wilfried QUEYREL : https://orcid.org/0000-0002-0901-2425.

Contributions des auteurs

Conceptualisation : Frédérique Angevin, Nicolas Cavan, Alice Nidriche, Wilfried Queyrel ; Analyses : Alice Nidriche, Nicolas Cavan ; Collecte, saisie, mise en forme des données : Jeanne Alexandre, Claire Goetz, Alice Nidriche, Lucille Trinh-Quy ; Supervision : Frédérique Angevin, Wilfried Queyrel ; Administration du projet : Nathalie Colbach ; Ecriture : Nicolas Cavan.

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.

Remerciements

Nous souhaitons remercier les participants et participantes aux ateliers de co-conception de systèmes de culture organisés lors de ce projet (les membres et les personnes animant les différents groupes), sans qui ce travail n'aurait pu être réalisé. Nous remercions également les personnes qui ont bien voulu nous aider lors des différents ateliers, en étant observateur ou observatrice de ces derniers : Aurélie Baquet, Morgane Bieslin, Pierre Lebreton et Anne-Sophie Voisin.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été financé par le projet COPRAA, 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.

Références bibliographiques

Bastiaans, L., Paolini, R., Baumann, D.T., 2008. Focus on ecological weed management: what is hindering adoption? Weed Research 48, 481–491.

Cavan, N., Omon, B., Dubois, S., Toqué, C., Van Inghelandt, B., Queyrel, W., Colbach, N., Angevin, F., 2023. Model-based evaluation in terms of weed management and overall sustainability of cropping systems designed with three different approaches. Agricultural Systems 208, 103637. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103637

Chantre, E., Cerf, M., Le Bail, M., 2015. Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms. International Journal of Agricultural Sustainability 13, 69–86. https://doi.org/10.1080/14735903.2014.945316

Chauvel, B., Guillemin, J.-P., Gasquez, J., Gauvrit, C., 2012. History of chemical weeding from 1944 to 2011 in France: Changes and evolution of herbicide molecules. Crop Protection 42, 320–326. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.07.011

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. https://doi.org/10.15454/TCSZ-9A31

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. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006

Gagneur, C.-A., Thiery, O., 2020. Le conseil stratégique aux agriculteurs : outils, pratiques et perspectives. Analyse, Centre d'études et de prospectives, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 4.

Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Lefeuvre, T., Valantin-Morison, M., Colnenne-David, C., Gauffreteau, A., Médiène, S., Pelzer, E., Reau, R., Salembier, C., Meynard, J.-M., 2022. Design workshops for innovative cropping systems and decision-support tools: Learning from 12 case studies. European Journal of Agronomy 139, 126573. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126573

Jolys, O., Dubuc, M., Ancelet, E., Munier-Jolain, N., 2016. Agrosyst: Guide de l'utilisateur. Décembre 2016, version 2.1 121.

Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R., 2017. Brief history of agricultural systems modeling. Agricultural Systems 155, 240–254. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014

Lacombe, C., Couix, N., Hazard, L., 2018. Designing agroecological farming systems with farmers: A review. Agricultural Systems 165, 208–220. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.014

Macé, K., Morlon, P., Munier-Jolain, N., Quéré, L., 2007. Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. Agricultural Systems 93, 115–142. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.04.007

Marshall, E.J.P., Brown, V.K., Boatman, N.D., Lutman, P.J.W., Squire, G.R., Ward, L.K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields*. Weed Research 43, 77–89. https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x

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. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0075-4

Meynard, J.-M., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Charlier, A., Messéan, A., 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. Agron. Sustain. Dev. 38, 54. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1

Oerke, E.-C., 2006. Crop losses to pests. The Journal of Agricultural Science 144, 31–43. https://doi.org/10.1017/S0021859605005708

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. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.019

Pleux, M., 2021. Co-construction d'une formation-action à un outil d'aide à la conception de systèmes de culture agroécologiques avec les futurs utilisateurs, l'exemple de DéciFlorSys. Rapport de stage de fin d'étude, formation ingénieur Agrosup Dijon (Mémoire de fin d'étude). AgroSup Dijon.

Prost, L., Martin, G., Ballot, R., Benoit, M., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Cerf, M., Deytieux, V., Hossard, L., Jeuffroy, M.-H., Leclère, M., Le Bail, M., Le Gal, P.-Y., Loyce, C., Merot, A., Meynard, J.-M., Mignolet, C., Munier-Jolain, N., Novak, S., Parnaudeau, V., Poux, X., Sabatier, R., Salembier, C., Scopel, E., Simon, S., Tchamitchian, M., Toffolini, Q., Van Der Werf, H., 2023. Key research challenges to supporting farm transitions to agroecology in advanced economies. A review. Agron. Sustain. Dev. 43, 11. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00855-8

Queyrel, W., Van Inghelandt, B., Colas, F., Cavan, N., Granger, S., Guyot, B., Reau, R., Derrouch, D., Chauvel, B., Maillot, T., Colbach, N., 2023. Combining expert knowledge and models in participatory workshops with farmers to design sustainable weed management strategies. Agricultural Systems 208, 103645. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103645

Pour citer cet article : Nicolas Cavan, Jeanne Alexandre, Claire Goetz, Alice Nidriche, Lucille Trinh-Quy, *et al*.. Apports d'outils d'évaluation dans des démarches de co-conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.174-185. 10.17180/ciag-2025-vol101-art15

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

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

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

Elaboration d'un guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice

Wilfried QUEYREL[1], Alice NIDRICHE[1,3], Thibault LEFEUVRE[2], Nathalie COLBACH[1], Nicolas CAVAN[1], Frédérique ANGEVIN[3]

[1] UMR Agroécologie INRAE, Institut Agro Dijon, Université de Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

[2] AgroParisTech Innovation, Plateforme IDEAS, France

[3] INRAE, Info&Sols, 45000 Orléans, France

Correspondance : wilfried.queyrel@institut-agro.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art16

Résumé

La gestion à long terme de la flore adventice appelle à un changement de paradigme afin d'évoluer d'une vision tactique, ponctuelle, vers une vision systémique pluriannuelle. Cette transition nécessite de mobiliser différents cadres méthodologiques et outils spécifiques pour accompagner les acteurs du monde agricoles, dont les agriculteurs, dans leurs changements de pratiques. Un guide méthodologique a été développé pour accompagner la mise en action des changements de pratiques de gestion de la flore adventice sur le long terme. Ce guide a été construit à partir de différentes expériences de mise en œuvre d'une démarche de co-conception de systèmes de culture mobilisant différents modèles experts. Il est destiné aux conseillers, animateurs ou expérimentateurs désireux de repenser leurs systèmes de culture. Il décrit l'ensemble de la méthode, les outils mobilisés et les principales connaissances associées nécessaires à la démarche. Il a pour originalité de proposer différentes déclinaisons de la démarche pour s'adapter aux situations d'usages des futurs utilisateurs : parcours Expert, Intermédiaire et Rapide. Les grandes étapes de la construction du guide sont présentées ainsi que les réflexions sur son mode de diffusion et les modalités de traçages des usages envisagés.

Mots-clés : Guide méthodologique, accompagnement, acteurs, co-conception, gestion des adventices

Abstract: Development of a methodological handbook to co-design cropping systems for sustainable weed management

A new paradigm is needed for long-term weed management to shift from a tactical, one-off vision to a systemic, multi-year one. This transition requires the mobilization of various methodological frameworks and specific tools to support agricultural stakeholders, including farmers, in their changes of practice. A methodological guide has been developed to support the implementation of changes in weed management practices over the long term. The guide is based on different experiences of implementing a co-design approach for cropping systems, using various expert models. It is intended for advisors, organizers and experimenters wishing to rethink their cropping systems. It describes the entire method, the tools used and the main associated knowledge required for the process. It is unique in that it offers different versions of the approach, to suit the different situations of future users: Expert, Intermediate and Fast. The main stages in the construction of the guide are presented, along with thoughts on how it will be disseminated and how it will be used.

Keywords: methodological handbook, support, stakeholders, co-design, weed management

1. Introduction

L'usage de produits phytopharmaceutiques est confronté à l'augmentation d'impasses techniques liées au développement de résistances (Reboud, 2017) et aux différents impacts sur la santé et l'environnement (Wilson et Tisdell, 2001). La prise en compte de ces enjeux nécessite de reconcevoir la façon de conduire les productions végétales sur les parcelles des agriculteurs. Inventer de nouvelles façons de cultiver en réduisant ou éliminant les produits phytopharmaceutiques (Martin 2015 ; Meynard *et al*. 2017). La gestion à long terme de la flore adventice appelle à un changement de paradigme en évoluant d'une vision tactique basée sur la densité d'individus et des seuils de nuisibilité (Walker 1983 ; J.P. Caussanel 1989) vers une vision systémique de l'impact global d'une communauté de différentes espèces qui composent la flore (Munier-Jolain, Chauvel, et Gasquez, 2002). Cet impact peut se traduire par des disservices écosystémiques comme la perte de rendement, le salissement de la récolte ou de la parcelle mais également par des services écosystémiques rendus par la flore comme source de nourriture ou d'habitat pour des auxiliaires des cultures. La combinaison de leviers agronomiques à effets partiels et pluriannuels peut limiter les disservices liés à la flore adventice. Cette approche amène à changer la temporalité de la gestion de la flore en passant d'une gestion d'évènements ponctuels à l'échelle de l'itinéraire technique à une vision pluriannuelle intégrant l'ensemble du système de culture. Cette évolution ne se positionne pas en opposition à une gestion tactique, mais invite à penser chaque opération technique dans un cadre de gestion pluriannuel et systémique. Ce changement nécessite le développement de nouveaux repères méthodologiques et d'outils associés pour aider à se projeter sur le moyen et long terme pour une gestion plus durable de la flore adventice.

2. Des méthodes et des outils pour repenser la gestion de la flore adventice

2.1. Des cadres méthodologiques pour penser ce changement

L'évolution et le changement de pratiques varient fortement en fonction des agriculteurs et de leur contexte de production. Ces changements peuvent être appréhendés selon le modèle ESR proposé par Hill et Mc Rae (1996) qui permet d'analyser différents niveaux de ruptures dans une dynamique de transition. Le plus faible niveau, l'Efficience, consiste à l'optimisation de l'existant et repose souvent sur une réponse technologique telle que le désherbage localisé. Le niveau de rupture intermédiaire, la Substitution, se caractérise par le remplacement d'une technique ou d'un intrant par un autre, comme la substitution d'une matière active par une autre, ou d'un passage d'herbicide par un désherbage mécanique. Le niveau de rupture le plus élevé est la re-conception qui amène à penser les changements sur l'ensemble du système. Ce besoin de reconcevoir est souvent impulsé par différents moteurs du changement tels que i) l'impact de l'agriculture sur l'environnement, ii) l'évolution de la demande en produits alimentaires et non alimentaires, iii) le travail et le revenu des agriculteurs, iv) l'évolution et la place de l'agriculture dans les territoires (Meynard, Dedieu, et Bos, 2012). Différentes approches méthodologiques peuvent être mobilisées pour accompagner ce changement et concevoir des systèmes de cultures innovants : la conception pas-à-pas et la conception de novo (Meynard, Dedieu, et Bos, 2012 ; Lacombe, Couix, et Hazard, 2018).

Les deux approches débutent généralement par une étape de diagnostic initial qui permet de comprendre pourquoi les systèmes existants ne sont pas satisfaisants au regard des performances attendus. La méthode de conception pas-à-pas se caractérise par une approche itérative, située, de la conception permettant une construction progressive de l'inconnu désirable (l'objectif). Cette démarche est favorisée par les échanges et l'apprentissage entre acteurs. Chaque boucle de conception est organisée par étapes successives : diagnostic, exploration, mise en œuvre et évaluation. Cette démarche permet aux acteurs d'adapter « chemin faisant » leurs pratiques pour surmonter plus facilement les risques et difficultés rencontrés (Meynard, Dedieu, et Bos, 2012 ; Meynard *et al*., 2023). L'approche *de novo* se distingue de la précédente par une conception de système de cultures plus en

rupture avec l'existant. Les modes opératoires utilisées peuvent mobiliser des modèles experts ou des ateliers participatifs de prototypage. Le processus *de novo* a une cinétique de rupture plus rapide que la démarche pas-à-pas, mais les solutions proposées peuvent être plus généralistes et nécessiter par la suite une adaptation spécifique à un contexte donné pour être mise en œuvre. Les prototypes issus de la méthode *de novo* n'intègrent pas toujours l'ensemble des contraintes rencontrées par les acteurs de terrain contrairement à l'approche pas à pas (Jeuffroy *et al*., 2022 ; Meynard *et al*., 2023 ; Meynard *et al*., 2012). Le processus de re-conception des systèmes de culture nécessite également de repenser les évolutions en intégrant d'autres acteurs de la filière de l'amont et de l'aval dans le cadre d'un processus d'innovation couplées (Meynard *et al*, 2017). La complexité de la démarche et la diversité des acteurs implique de développer un accompagnement et des outils adaptés aux besoins des parties prenantes.

2.2. Des outils pour accompagner ce changement

La conception de nouveaux systèmes de culture requiert la mobilisation de différents outils pour concevoir et évaluer la multiperformance de ces derniers. L'évaluation joue un rôle important dans le processus de conception tant dans le diagnostic initial que dans l'évaluation *ex ante* des différents prototypes en cours de construction, que dans l'évaluation *ex post* des systèmes de cultures testés. Elle participe, dans le cadre de boucle de rétroactions, aux allers-retours entre le prototype conçu et les niveaux de performance attendus vis-à-vis des objectifs fixés (Perrin *et al*., 2023). L'évaluation de la performance de systèmes conçus pour une meilleure gestion de la flore adventice est complexe et nécessite la mobilisation de différents outils.

Le modèle FlorSys

FlorSys (Colbach *et al*., 2019 ; Colbach *et al*., 2021 ; Perthame *et al*., 2023) (florsys.hub.inrae.fr/modeles-et-oad/florsys) est un modèle issu de la recherche simulant une parcelle cultivée virtuelle à un pas de temps journalier sur plusieurs années. Il permet d'évaluer les performances de systèmes agricoles en termes de contrôle de la flore adventice, de maintien de la production agricole et de préservation de la biodiversité fonctionnelle. Ce modèle permet de simuler l'ensemble des systèmes agricoles en grandes cultures des différentes régions françaises. Florsys est actuellement paramétré pour 33 espèces de grandes cultures (et plusieurs variétés de blé et pois), 32 espèces adventices annuelles fréquentes et avec des caractéristiques biologiques variées. L'intégration des adventices vivaces est en cours (Skorupinski *et al*., 2024). Florsys permet ainsi d'identifier des combinaisons de leviers agronomiques pertinents et d'analyser sur le long terme la trajectoire d'évolution des adventices (Cavan *et al*., 2023). Ce modèle est complexe et difficilement mobilisable par des acteurs de terrains. Un nouvel outil plus facile à mettre en œuvre a été développé à partir de ce dernier : DECIFLORSYS (Colas *et al*., 2020).

L'outil DeciFlorSys

DECIFLORSYS (Colas *et al*., 2020) est un outil d'aide à la conception de stratégies de gestion agroécologiques de la flore adventice. L'outil est constitué d'un calculateur permettant d'évaluer la performance des systèmes de culture proposés par l'utilisateur, en termes de services (biodiversité, nourriture pour des auxiliaires) et dysservices (ex. perte de rendement) fournis par les adventices. DECIFLORSYS a été construit sur la base de simulations faites avec le modèle mécaniste, FlorSys. Il permet d'accompagner la conception d'une gestion stratégique de la flore adventice. Il est destiné à un public divers (conseillers, animateurs, enseignants) voulant évaluer l'impact des adventices dans les agrosystèmes pour accompagner le changement de pratiques et la reconception de leurs systèmes de culture. Il peut être utilisé en groupe ou en individuel selon le niveau d'autonomisation de l'utilisateur.

Une gestion plus durable des adventices, implique de nombreux changements de pratiques à l'échelle du système (reconception), et entraîne des effets (positifs et négatifs) sur d'autres composantes du

système, qui peuvent par ailleurs constituer des freins à l'adoption de ces pratiques (Bastiaans *et al*., 2008). Il est donc important de pouvoir évaluer l'ensemble des trois piliers de la durabilité des systèmes de cultures conçus à l'aide d'outils d'évaluation multicritère.

Le modèle DEXiPM

DEXiPM (Pelzer *et al*. 2012) est un modèle d'évaluation multicritère de la durabilité de systèmes de culture, basé sur le logiciel DEXi (Bohanec, 2015). Il a été conçu pour évaluer des systèmes de culture innovants ayant pour objectif la réduction de l'usage de produits phytosanitaires, avant leur mise en application ou expérimentation (*ex ante*). Pour évaluer les trois composantes de la durabilité (économique, sociale, environnementale), 75 critères qualitatifs sont à renseigner (descripteurs de pratiques culturales ou des conditions pédoclimatiques du systèmes de culture), puis agrégés par le modèle pour aboutir à une note de durabilité des systèmes en 5 classes (de *très faible* à *très élevée*). La présentation des résultats sous la forme de tableaux synoptiques permet de donner une vue globale de l'évaluation et/ou de creuser les thématiques intéressant le plus les utilisateurs. Ces résultats sont importants pour servir de pistes d'améliorations de prototypes conçus et d'une aide pour choisir entre différentes options techniques possibles.

L'accompagnement du processus de conception fait appel à une diversité d'outils qui nécessitent d'être mobilisés de façon coordonnée et pertinente pour faciliter la mise en action par le collectif d'acteurs impliqué.

2.3. Des guides méthodologiques pour faciliter la mise en action

Les outils développés pour accompagner le processus de conception (modèles experts, outils d'aide à la décision ou outils d'évaluation) ne sont pas toujours mobilisés par les utilisateurs ciblés par les concepteurs initiaux (Prost *et al*., 2012 ; Prost *et al*., 2018). Afin de favoriser l'utilisation de ces outils, il est nécessaire pour les concepteurs d'impliquer les utilisateurs et d'évaluer le contexte de l'aide à la décision en amont de la conception de l'outil et de la réalisation de supports utilisateurs (Rose *et al*., 2018). De nouveaux besoins ont également émergé pour outiller et accompagner la mise en œuvre de ces outils par le développement d'un environnement utilisateur. Ce dernier peut être élaboré à partir de l'analyse des situations d'usages des futurs utilisateurs ciblés (Cerf *et al*., 2012 ; Lefeuvre *et al*., 2023). Cet environnement utilisateur permet d'adapter l'usage de l'outil aux situations rencontrées dans son activité. Parmi la diversité des supports qui peuvent composer un environnement utilisateur, les guides méthodologiques accompagnants les démarches de conception ou re-conception de systèmes de culture ont un rôle majeur. Cet article a pour objectif de présenter la méthode développée et mise en œuvre pour élaborer le guide méthodologique sur la co-conception de systèmes de culture pour une gestion durable de la flore adventice. Les différentes étapes de création seront présentées et illustrées à partir d'exemples issus du guide.

3. Matériel et méthode

3.1. Ressources mobilisées pour l'élaboration du guide

Le guide conçu par Nidriche *et al*. (2024) s'inspire d'ouvrages existants présentés dans le tableau 1. Des adaptations méthodologiques et des outils d'évaluation ont été nécessaires pour développer une approche spécifique à la flore adventice. Le cadre méthodologique mobilisé pour la construction de ce guide est centré d'une part sur les futurs utilisateurs et d'autre part sur les objets conçus : les systèmes de culture en interaction avec la flore adventice. Ce guide est la résultante d'une série de travaux de recherche qui ont permis de développer des outils (Colas *et al*., 2020 ; Colbach *et al*., 2014 ; Pelzer *et al*., 2012) et différentes situations d'usages coordonnés de ces derniers (Cavan *et al*., 2023 ; Queyrel *et al*., 2023). Le contenu du guide est issu de résultats de différentes expériences participatives des

projets ANR COSAC, Plant2Pro DeciFlorSys et COPRAA). La nature de ces données et leur mobilisation pour la rédaction du guide sont détaillées dans la partie résultats.

Tableau 1 : Panorama des principaux guides consultés pour inspirer la construction du guide méthodologique

Type de guide *Objet central du guide*	**Guides de mise en œuvre de démarches de conception** *Méthode*	**Guides de mise en œuvre d'une démarche de conception outillée** *Méthode + outils d'évaluation*	**Guide utilisateur d'outil d'évaluation** *(Outils d'évaluation)*
Exemples de guides pratiques	Guide pratique : Piloter un processus de conception innovante, (Berthet *et al*., 2020) Ateliers de conception de systèmes de culture : guide pour leur réalisation avec des agriculteurs (Reau *et al*., 2018) Guide pratique de Co-conception Friendly Fruit, (Chieze, Casagrande, *et al*aphilippe, 2021)	Guide STEPHY pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires : Application aux systèmes de polyculture (ATTOUMANI-RONCEUX *et al*., 2011), Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques (Launais *et al*., 2014)	Guide utilisateur Criter 5.4 (Hirschy *et al*., 2015) Guide utilisateur MASC 2.0 (Craheix *et al*., 2011)

3.2. Définition du cahier des charges du guide

La définition du cahier des charges du guide a été réalisée avec l'appui du réseau IDEAS. La méthodologie de construction du guide est adaptée du diagnostic des usages (Cerf *et al*. 2012, Lefeuvre *et al*., 2020 ; Lefeuvre *et al*., 2023) ; Les étapes de l'élaboration du guide, les questions associées et les choix stratégiques pris par l'équipe de recherche chargée de la conception du guide sont présentés dans le Tableau 2. Ces différentes étapes montrent la nécessité de penser la construction du guide en impliquant les futurs utilisateurs tant dans la définition des futures situations d'usages que dans la diffusion et le suivi de son utilisation dans le cadre d'une communauté de pratique. Le développement d'un tel outil implique d'imaginer l'environnement d'utilisation du guide tels que les ressources complémentaires à mobiliser ou le développement de formation spécifiques.

Tableau 2 : Grille d'élaboration du cahier des charge du guide méthodologique

Etapes de l'élaboration du guide	Question(s) associée(s)
Contexte d'émergence du guide	Quelle est l'origine de ce guide ?
Objectif du guide	Pour quoi faire ? Pour répondre à quel(s) besoin(s) ?
Usage(s) envisagé(s) par les concepteurs du guide	Dans quelle(s) situation(s) utiliser le guide ?
Public ciblé pour l'usage du guide	Pour qui ?
La transmission du guide	Comment envisager la transmission du guide ? Est-ce que le guide est associé à d'autres ressources ?
Les ressources actionnables mobilisées	Quels types de données et d'informations mobilisées pour la construction du guide ?
Les acteurs impliqués dans la démarche décrite dans le guide	Avec qui élaborer et tester le guide ?
Description de la démarche proposée dans le guide	Quelle est la démarche présentée ? Comment présenter les concepts clés ? Comment organiser le guide ? Est-ce que différents niveaux de lecture sont envisagés ?
Suivi de l'usage du guide	Comment suivre l'usage du guide ?

Les réponses aux différentes questions du tableau 2 sont présentées dans la partie résultats.

4. Résultats

4.1. Origine et objectifs de ce guide

Ce guide a pour origine différents projets de recherche (ANR COSAC, Plant2Pro DeciFlorSys et COPRAA) qui ont permis de mettre au point une méthode de co-conception de systèmes de cultures pour une gestion plus durable de la flore adventice et les différents outils associés. Ces multiples expériences ont mis en lumière le bien-fondé de la méthode, la pertinence des résultats obtenus ainsi que l'engagement et l'intérêt des acteurs pour cette démarche. Ces travaux ont également permis de constater que la méthode et les outils de se suffisent pas à eux même et qu'il est nécessaire de développer un environnement utilisateur pour favoriser leur appropriation. Le projet de guide est donc né de cette volonté d'expliciter et de formaliser ces connaissances pour faciliter leur mise en action par les acteurs intéressés.

L'élaboration de ce guide répond à quatre principaux objectifs. Le premier est de transmettre et diffuser la démarche développée. Ce dernier implique de décrire de façon explicite la démarche et les conditions nécessaires à sa mise en œuvre. Le second est d'aider les conseillers et animateurs à accompagner les agriculteurs dans une démarche de reconception de la gestion de la flore adventice. Cet objectif nécessite d'impliquer les acteurs ciblés dès le départ pour définir avec eux les futurs usages du guide. Le troisième est de compléter l'environnement utilisateur de la démarche et des outils associés. Le quatrième est de sensibiliser les utilisateurs à une démarche systémique long terme de la gestion de la flore adventice à partir de combinaisons de leviers agronomiques à effets partiels.

4.2. Usagers et usages imaginés par les concepteurs du guide

Dans la mise en œuvre d'une démarche centrée utilisateurs, le choix des acteurs ciblés pour le guide a été une étape primordiale. Il a été effectué par l'équipe en charge de la rédaction du guide à partir des acteurs impliqués dans la mise œuvre de la méthode de co-conception et des ateliers de co-développement de l'outil DECIFLORSYS. Le public ciblé par ce guide comprend : les conseilleurs, les animateurs, les ingénieurs réseaux d'instituts techniques et les enseignants (de l'enseignement technique et supérieur agricole).

De la même manière que pour le public cible du guide les différents usages imaginés par les concepteurs en interactions avec les futurs utilisateurs sont issus d'ateliers participatifs. Ces situations sont présentées dans le tableau 3. Parmi les usages proposés, seuls les ateliers de co-conception avec des agriculteurs et en situation d'enseignement avec des apprenants ont pu être testées. Les autres usages ont été imaginés par les acteurs lors des ateliers. La diversité des usages proposés implique des adaptations spécifiques dans la construction et l'organisation du guide en ajustant la méthode et les moyens associés en fonction des utilisations ciblées.

Tableau 3 : Ensemble des situations d'usages imaginées pour le guide méthodologique issu d'expériences en ateliers avec des conseillers ou agriculteurs ou ingénieurs réseau

Acteurs ciblés	Activité de co-conception et d'accompagnement collectif ou individuel	Formation	Expérimentation
Conseiller ou animateur	Conception de systèmes de culture en rupture forte avec un collectif d'agriculteur Conception de systèmes de culture en faible rupture Accompagnement au changement d'un agriculteur par un conseiller	Support de discussion et de sensibilisation des agriculteurs Support pour un apport de connaissance à un collectif d'agriculteurs	Conception et évaluation d'expérimentation chez les agriculteurs
Ingénieur	Conception d'un système en	Support de discussion et de	Conception et évaluation d'une

réseau	rupture en vue de la mise en œuvre d'essais	sensibilisation des agriculteurs ou conseillers Support pour un apport de connaissance à un collectif d'agriculteurs ou de conseillers	expérimentation en station expérimentale
Enseignant	Mise en situation d'apprenants pour les former à une démarche de co-conception	Support de discussion de combinaisons de leviers agronomiques Pour des apports de connaissances à des apprenants	Pour travailler sur l'élaboration d'une expérimentation

La diversité des usages imaginés pour le guide a nécessité de mobiliser une pluralité de ressources (méthodologiques, techniques et organisationnelles) pour sa création.

4.3. Les ressources actionables mobilisées pour le contenu du guide

Une diversité de ressources a été mobilisée pour la rédaction du guide. Les articles scientifiques issus des différents projets ont servi de socle méthodologique à la rédaction de du guide en particulier (Cavan *et al*., 2023 ; Queyrel *et al*., 2023). Ils ont permis de décrire la méthode et la manière de mobiliser les différents outils pour évaluer les prototypes conçus. Les protocoles conçus pour l'organisation des différents ateliers ont aidé à structurer en détail la préparation, l'animation, mais également la façon de tracer et de capitaliser les différents échanges lors des ateliers. Les différents supports et livrables tels que les apports de connaissances, les synthèses des ateliers incluant les évaluations des prototypes conçus ont été remobilisées pour expliciter leur mise en œuvre et servir d'illustrations dans le guide. Les fiches d'observations ainsi que les différents debriefs des participants aux ateliers (agriculteurs et conseillers) et de l'équipe de recherche chargée de l'animation ont été remobilisés. Ces ressources ont contribué à l'élaboration de parties du guide consacrées aux postures à adopter pendant les ateliers. Les fiches d'évaluation des ateliers développées par l'équipe de recherche ont été inclues dans le guide. D'autres ressources comme une formation-action élaborée dans le cadre du développement de l'outil DECIFLORSYS (Pleux, 2021) ont également été utilisées pour alimenter le contenu du guide. L'équipe de recherche en charge de la rédaction a également mobilisés les guides utilisateurs des outils FlorSys et DECIFLORSYS. De façon plus générale, les retours d'expériences de l'équipe ont permis de définir les prérequis, les conditions favorables à la mise en œuvre de la méthode et les limites de cette dernière.

4.4. Description de la démarche proposée

La démarche générale

Le guide méthodologique décrit en détail la mise en œuvre de la démarche issue des travaux de Queyrel *et al*. (2023). Cette démarche nécessite différents prérequis en lien avec des concepts et connaissances agronomiques, mais également en termes d'environnement favorable à la démarche. Les prérequis agronomiques comprennent une connaissance de l'agronomie systémique, de la biologie des adventices, une sensibilisation à la protection intégrée et la formation aux différents outils mobilisés pour l'évaluation des prototypes. L'environnement favorable implique : i) l'expression d'un besoin de la part d'un collectif d'agriculteur, ii) des interactions en amont entre l'équipe d'animation en charge de mettre en œuvre la démarche et les conseillers/animateurs, iii) des agriculteurs et conseillers motivés par une démarche collective iv) une connaissance précise du contexte de production des agriculteurs.

La démarche globale illustrée Figure 1 repose sur 5 étapes : 1) Un diagnostic initial de la situation ; 2) La définition de la cible, du cadre de conception et des critères à évaluer ; 3) La co-conception par le groupe d'agriculteur ; 4) L'évaluation des prototypes ; 5) La restitution de l'évaluation au groupe d'agriculteur. La spécificité de cette démarche se caractérise tout d'abord par une définition collective

de la cible, du cadre de conception et des critères d'intérêt pour l'évaluation. Elle est ensuite complétée par une utilisation combinée de modèles pour effectuer une évaluation qui porte à la fois sur les spécificités de la flore adventice tout en ayant une visio de la durabilité globale des prototypes conçus. Cette évaluation est confrontée à l'auto-évaluation des agriculteurs et permet des regards croisés entre expertise de terrain et connaissances scientifiques. Enfin l'organisation de la restitution finale permet d'explorer de nouvelles pistes d'évolution des prototypes. La démarche globale nécessite une bonne coordination entre l'équipe d'animation, les animateurs ou conseillers, les agriculteurs, les outils mobilisés ainsi que les moyens matériels nécessaires (Figure 1).

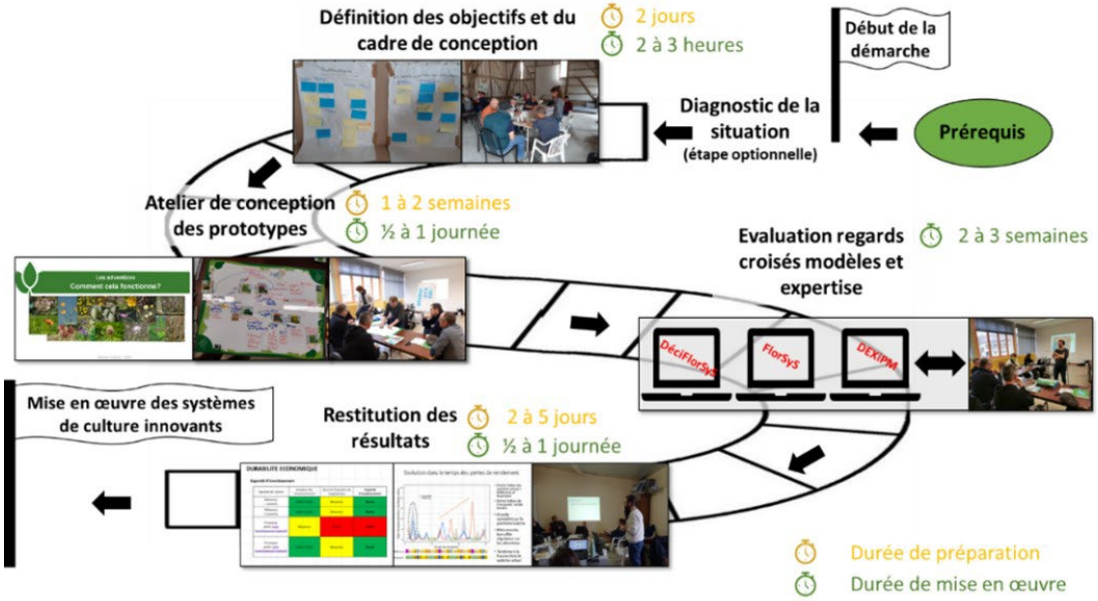


Figure 1 : Illustration de la mise en œuvre de la démarche globale de co-conception de systèmes de culture pour une gestion durable de la flore adventice

Organisation générale du guide

En préambule du guide est présenté le cadre méthodologique ainsi que les prérequis nécessaires à la mise en œuvre et les limites de la méthode. Par la suite, chaque étape est décrite en détail en incluant les moyens matériel et humain nécessaires. La description de chaque étape s'appuie sur un ensemble de schémas et de tableaux qui permettent au lecteur de se repérer dans le séquençage des différentes actions. Des indications de durée permettent également au lecteur de se représenter le temps nécessaire pour la préparation, la réalisation et le traitement des informations issues des ateliers. Cette temporalité a été calibrée à partir des différents retours d'expériences de l'équipe d'animation. Des points de vigilances sont donnés afin de limiter les écueils lors de la mise ne pratique de la démarche. Chaque étape se termine par une rubrique retour d'expérience qui repose sur un ou plusieurs cas d'étude rencontrés dans les différents projets de recherche. Ces expériences partagées permettent d'illustrer la séquence et facilitent la projection du lecteur dans une situation concrète. Les concepts clés associés au guide sont présentés dans la partie prérequis. Par ailleurs des liens sont proposés vers d'autres ressources qui décrivent la biologie des adventices et l'approche systémique de la gestion de la flore adventices. Ces apports de connaissances sont majoritairement issus d'une formation développée pour l'outil DECIFLORSYS (Pleux, 2021)

Adaptation de la démarche aux besoins et contraintes de futurs utilisateurs

Dans une volonté de réponde à la diversité d'usages imaginés (Tableau 3), le guide a été construit pour différents niveaux de lecture, afin d'adapter la démarche en fonction des besoins des utilisateurs. Le guide est organisé en trois parcours : « Expert », « Intermédiaire » et « Rapide ».

L'appropriation des différents parcours par les futurs utilisateurs implique un accompagnement adapté. Ce dernier est essentiel pour garantir un usage approprié de la méthode et des outils.

Le parcours « Expert » retrace en détail l'ensemble de la démarche développée par l'équipe de recherche présentée Figure 2. La mise en œuvre de ce parcours suppose de maîtriser les concepts de l'agronomie systémique, d'avoir une connaissance de la biologie des adventices et de savoir mobiliser les 3 modèles FlorSys, DeciFloSys et DEXiPM. Cette démarche a l'avantage de fournir des outils qui permettent d'évaluer de façon exhaustive l'impact des pratiques sur la flore adventice à une échelle pluriannuelle et les performances des systèmes selon les 3 piliers de la durabilité. Ce parcours a été imaginé pour une équipe d'animation de 3 à 4 personnes qui souhaitent travailler dans un contexte de recherche et développement.

Le parcours « Intermédiaire » se distingue du parcours « Expert » et mobilise pour l'essentiel l'outil DeCiFlorSys ainsi que l'expertise des participants. La mise en œuvre du parcours suppose de maîtriser également les concepts de l'agronomie systémique, d'avoir une connaissance de la biologie des adventices ou de faire appel à une expertise extérieure dans ce domaine et de savoir utiliser l'outil DeciForSys. Cette démarche a l'avantage d'être facilement adaptable aux conditions du cas d'étude et de fournir des pistes de réflexion sur l'impact de leviers agronomiques sur la gestion de la flore adventice. DeciFlorSys est utilisé comme un support de discussion et d'évaluation dynamiques des propositions issues des échanges entre pairs. Ce parcours peut être décliné lors d'ateliers collectifs ou en accompagnement individuel d'un agriculteur par un conseiller/animateur. Il a été imaginé pour une équipe d'animation plus restreinte de 2 personnes pour un travail en groupe et une seule personne pour l'activité d'accompagnement.

Le parcours « Rapide » nécessite moins de prérequis que les deux premiers. Il a pour objectif de sensibiliser à une approche systémique de la gestion durable de la flore adventice. Il repose pour l'essentiel sur l'utilisation de grilles qui fournissent une synthèse de l'effet des opérations culturales sur la dynamique de la flore adventice. Cet outil permet de connaitre l'effet des pratiques sur la biologie des adventices afin de choisir les leviers agronomiques et leurs combinaisons les plus adaptés au contexte de production des agriculteurs. Ces grilles sont issues de synthèses de simulations réalisées à l'aide du modèle FlorSys. Cet outil peut être utilisé de différentes façons pour un accompagnement collectif ou individuel d'agriculteurs. Ce parcours a été imaginé pour un travail d'accompagnement réalisé par un seul conseiller.

4.5. Transmission et suivi des usages

La transmission du guide et le traçage des usages est une étape importante dans le cycle de vie d'un guide méthodologique. Un dilemme peut alors apparaître entre une large diffusion et le traçage des différentes manières de mobiliser le guide par les utilisateurs. Un compromis existe avec un modèle de diffusion semi-libre sous conditions à l'aide d'un formulaire utilisateur ou la création d'un compte pour accéder aux informations. Ces solutions ont été mises en œuvre dans le cadre du réseau IDEAS ou par certains instituts techniques comme Terre Inovia. La diffusion peut être accompagnée de différents supports (vidéo, article, webinaire) et formations afin de garantir un usage adapté du guide. Dans le cadre du guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice (Nidriche *et al*., 2024), la diffusion va être réalisée à partir de différents sites comme celui du projet COPRAA et du modèle FlorSys. Cette diffusion peut également être favorisée par des liens établis avec d'autres guides méthodologiques et d'autres cites ou plateformes en ligne telle que GECO ou EcophytoPIC. Le traçage de l'usage va s'inscrire dans la durée, afin d'identifier l'évolution de son utilisation « chemin faisant », par les utilisateurs. Il peut ainsi contribuer à la maintenance et l'évolution de l'outil. Ce suivi est intéressant pour faire vivre et évoluer le guide mais il pose cependant la question des moyens nécessaires à mobiliser pour cette tâche. La création et l'animation d'une communauté de pratique peut être l'opportunité de faire vivre le guide et les outils

associés. Cette communauté peut fournir un cadre de partage d'expériences et d'approches réflexives sur les usages dans différents contextes d'accompagnement de groupes d'agriculteurs ou de recherches participatives.

5. Discussion

5.1. Mise en œuvre de la démarche proposée dans le guide et de ses déclinaisons

La démarche de co-conception outillée de systèmes de culture pour une gestion durable de la flore adventice a pu être testée dans une diversité de situations ; Groupe de Développement Agricole (GDA), d'un groupe DEPHY, en individuel conseiller/agriculteur et dans le cadre d'un groupe d'agriculteurs du réseau des Centres d'initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural (CIVAM) (Cavan *et al*., 2023; 2024; Queyrel *et al*., 2023). Les retours des agriculteurs lors des différents ateliers montrent leur intérêt pour les outils et la méthode : « Les ateliers donnent des points de réflexion auxquels je n'avais pas pensé ». « C'est très intéressant de pouvoir échanger sur des problèmes similaires ». Ces retours sont à nuancer avec la limite d'utilisation des outils : « les modèles manquent de précision dans le chiffrage des pertes de rendements » ou dans la mise en œuvre concrète par la suite « Les solutions techniques proposées peuvent être intéressantes à condition d'avoir les débouchés ». Ces différents cas d'études ont amené les concepteurs du guide à proposer les différents parcours d'utilisation : « Expert », « Intermédiaire » et « Rapide ». Les deux premiers parcours ont pu être expérimentés et améliorés en fonction des mises en situations rencontrées. En revanche, le parcours rapide a été imaginé à partir de propositions des futurs utilisateurs, sans pouvoir le tester en condition réelle. Il n'a donc pas pu bénéficier du même retour d'expérience que les deux autres.

5.2. Le rôle important des conseillers animateurs ou techniciens dans l'usage des outils

Les différents retours d'expériences ont mis en lumière le rôle déterminant des conseillers/animateurs dans la dynamique de fonctionnement des groupes et des modalités de mise en œuvre des outils dans le processus de co-conception (Faure *et al*., 2018). En effet, le rôle des conseillers/animateurs est essentiel dans le bon déroulé des échanges entre pairs (Duhamel, 2019) pour accompagner le processus collectif afin de repenser les systèmes de cultures. Par ailleurs, la posture du conseiller/animateur joue un rôle considérable, tant dans les échanges (Jorro, 2016), que dans le niveau d'autonomie dans l'utilisation des outils d'évaluation comme DECIFLORSYS. Un gradient d'autonomisation dans l'usage des outils a été constaté. Il se caractérise par l'externalisation complète de la mise en œuvre des outils par l'équipe de recherche, suivi par une situation intermédiaire de réappropriation des résultats des outils par le conseiller/animateur (Cavan *et al*., 2020) et enfin une utilisation en quasi autonomie des outils par le conseiller/animateur. L'objectif d'autonomisation des futurs utilisateurs implique un accompagnement adapté par le développement de formations *ad hoc* et de supports tels que des guides méthodologiques (Auricoste *et al*. 2013 ; Pleux, 2021). Cette montée en compétence des conseillers/animateurs peut également être accompagnée par le développement d'arènes de discussions et de partage d'expériences entre pairs telles, que les communautés de pratiques (Duhamel, 2019 ; Omon *et al*. 2019).

5.3. Accompagnement et autonomisation des utilisateurs

L'appropriation des différents parcours par les futurs utilisateurs implique un accompagnement adapté incluant le guide méthodologique. Cet accompanement est essentiel pour garantir un usage approprié de la méthode et des outils afin de favoriser l'autonomisation des futurs utilisateurs. Cette démarche d'accompagnement a été engagée en amont dès la construction de l'interface de l'outil DECIFLORSYS en impliquant de futurs utilisateurs. Cette réflexion s'est poursuivie lors de la création d'une formation-action à l'outil DECIFLORSYS (Pleux, 2021). Ces différentes expériences ont amené l'équipe de

recherche à imaginer différents niveaux de formation en fonction de la complexité du parcours. En effet, plus le parcours est complexe, plus l'autonomisation des utilisateurs est difficile à atteindre. Dans le cadre du parcours « Expert », l'usage des outils est fréquemment réalisé par l'équipe de recherche ayant développée la méthode. La maîtrise de l'ensemble des outils nécessite plusieurs formations spécifiques pour un collectif d'animation (une équipe de 3 à 4 personnes). Dans le contexte du parcours « Intermédiaire », le niveau d'autonomisation de l'utilisateur dépend de sa capacité à mobiliser DECIFLORSYS. Il apparaît indispensable de suivre une formation à l'outil DECIFLORSYS, afin faciliter la mise en œuvre en condition réelle. Le parcours « Rapide » a été conçus pour se suffire à lui-même sans accompagnement spécifique. Il peut être complété par des apports de connaissances externes (tutoriel, fiche GECO). Fort de ces différents constats, le guide méthodologique est destiné à compléter la palette de cette environnement utilisateurs des différents outils mobilisés. Afin d'améliorer l'accompagnement et favoriser l'autonomisation, une évaluation du guide utilisateur va être proposée pour tracer le devenir et l'usage du guide. Cette évaluation sera effectuée par l'intermédiaire d'un questionnaire utilisateur en ligne.

6. Conclusion

Le développement du « Guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice » (Nidriche *et al*., 2024) a permis de fournir à de futurs utilisateurs le cadre méthodologique et matériel d'une mise en œuvre adaptée d'une démarche de co-conception de systèmes de culture. Cette démarche a nécessité la capitalisation de différentes expériences : des ateliers de conception de systèmes de cultures, des ateliers de développement d'interface de l'outil DECIFLORSYS et la construction d'une formation action à l'usage de l'outil DECIFLORSYS. Ce guide permet de compléter cet environnement utilisateur d'outils déjà existants comprenant des guides utilisateurs des outils et différentes formations. Il a pour originalité d'avoir mobilisé de futurs utilisateurs en amont de la sa création. Cette implication des différents acteurs s'est traduite par la création des parcours, la mobilisation de fiches retour d'expériences et le développement de différents supports spécifiques comme les grilles synthèses du parcours rapide. Ce guide constitue un premier prototype qui nécessite par la suite d'être testé et éprouvé par une plus large gamme d'utilisateurs dans une diversité de situations d'usages.

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

Frédérique ANGEVIN : https://orcid.org/0000-0002-1555-9160 ;

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X ;

Wilfried QUEYREL : https://orcid.org/0000-0002-0901-2425.

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont participé à l'écriture et la relecture de l'article.

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.

Remerciements

Nous souhaitons remercier les participant·e·s aux ateliers de co-conception de systèmes de culture organisés lors de ce projet (les membres et les personnes animant les différents groupes), sans qui ce travail n'aurait pu être réalisé. Nous remercions également les personnes qui ont bien voulu nous aider lors des différents ateliers, en étant observateur·rice de ces derniers : Aurélie Baquet, Morgane Bieslin, Pierre Lebreton et Anne-Sophie Voisin.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été financé par le projet COPRAA, 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.

Références bibliographiques

Attoumani-Ronceux, A., JN. Aubertot, L. Guichard, L. Jouy, P. Mischler, B. Omon, E. Pleyber, et A. Seiler. 2011. « Guide pratiquepour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires: Guide pratiquepour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires Application aux systèmes de polyculture ».

Auricoste C C., M. Cerf, T. Doré, et P. Olry. 2013. « Accompagner le changement de pratiques des conseillers agricoles en mobilisant un dispositif de conception-évaluation de formation : l'exemple de la formation conseiller demain en agronomie ». Agronomie, Environnement & Sociétés 3 (2): 93-100.

Bastiaans, L., R. Paolini, et D. T. Baumann. 2008. « Focus on ecological weed management: what is hindering adoption? » Weed Research 48 (6): 481-91.

Berthet E., G. Vourc'h, V. Athès, J. Brun, JM. Meynard, L. Prost, et C. Salembier. 2020. « Guide pratique : Piloter un processus collectif de conception innovante ». https://hal.inrae.fr/hal-02965972.

Bohanec, M. 2015. « Program for multi-criteria decision making, user's manual, Version 4.01 ». Ljubljana: Jožef Stefan. http://kt.ijs.si/MarkoBohanec/pub/DEXiManual401.pdf.

Cavan N., J. Alexandre, C. Goetz, A. Nidriche, L. Trinh-Quy, W. Queyrel, N. Colbach, et F. Angevin. 2024. « Retour d'expériences de co-conception de systèmes innovants peu consommateurs d'herbicides avec des agriculteurs : rôle des outils dans l'appui à l'animation », 11.

Cavan N., B. Omon, A. Tailleur, S. Dubois, W. Queyrel, B. van Inghelandt, N. Colbach, et Frédérique Angevin. 2020. « Comparaison de méthodes de conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices ». *Innovations agronomiques*, CoSAC, un projet pour la Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement (climat, pratiques agricoles, biodiversité), 81 (décembre):189-200. https://doi.org/10.15454/gas3-1w19.

Cavan, N., B. Omon, S. Dubois, C. Toqué, B. Van Inghelandt, W. Queyrel, N. Colbach, et F. Angevin. 2023. « Model-based evaluation in terms of weed management and overall sustainability of cropping systems designed

with three different approaches ». Agricultural Systems 208 (mai):103637. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103637.

Chieze B., M. Casagrande, et A. Alaphilippe. 2021. « Guide pratique de Co-conception ». Technical Report. INRAE ; Danone ; Materne. https://doi.org/10.15454/hzw1-aa02.

Colas, F., S. Cordeau, S. Granger, M.-H. Jeuffroy, O. Pointurier, W. Queyrel, A. Rodriguez, J. Villerd, et N. Colbach. 2020. « Co-development of a decision support system for integrated weed management: Contribution from future users ». European Journal of Agronomy 114 (mars):126010. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126010.

Colbach, N, L Biju-Duval, A Gardarin, S Granger, S H M Guyot, D Mézière, N M Munier-Jolain, et S Petit. 2014. « The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds ». Weed Research 54 (6): 541-55. https://doi.org/10.1111/wre.12112.

Colbach, N, F Colas, S Cordeau, T Maillot, W Queyrel, J Villerd, et D Moreau. 2021. « The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management ». FIELD CROPS RESEARCH 261 (février). https://doi.org/10.1016/j.fer.2020.108006.

Colbach, N, A Gardarin, et D Moreau. 2019. « The response of weed and crop species to shading: Which parameters explain weed impacts on crop production? » FIELD CROPS RESEARCH 238 (mai):45-55. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.008.

Caussanel. J.P. 1989. « Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique ». Agronomie 9 (3): 219-40. https://doi.org/10.1051/agro:19890301.

Craheix D., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Sadok W., Doré T (2011). MASC 2.0, Un outil pour l'analyse de la contribution des systèmes de culture au développement durable. Présentation & principes d'utilisation. INRA – AgroParisTech – GIS GC HP2E, 49 p

Duhamel, S., 2019. « Les effets développementaux du couplage entre activités et situations de conseil : Analyse d'un dispositif d'échange entre conseillers agricoles accompagnant la transition agro-écologique des agriculteurs. » http://www.theses.fr/2019IAVF0022/document.

Faure, Guy, Aurélie Toillier, Michel Havard, Pierre Rebuffel, Ismaïl M. Moumouni, Pierre Gasselin, et Hélène Tallon. 2018. « Le conseil aux exploitations agricoles pour faciliter l'innovation : entre encadrement et accompagnement ». In Innovation et développement dans les systèmes agricoles *et al*imentaires, 259 p. Synthèses (Quae). Editions Quae. https://hal.inrae.fr/hal-02791613.

Jeuffroy M-H, C. Loyce, T. Lefeuvre, M. Valantin-Morison, C. Colnenne-David, A. Gauffreteau, S. Médiène, *et al*. 2022. « Design Workshops for Innovative Cropping Systems and Decision-Support Tools: Learning from 12 Case Studies ». European Journal of Agronomy 139 (septembre):126573. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126573.

Lacombe C., N. Couix, et L. Hazard. 2018. « Designing Agroecological Farming Systems with Farmers: A Review ». Agricultural Systems 165 (septembre):208-20. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.014.

Launais, M., L. Bezdrenga, V. Estorgues, V. Faloya, B. Jeannequin, S. Lheureux, L. Nivet, *et al*. 2014. « Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques »,. Ministère chargé de l'agriculture, Onema, GIS PIClég,.

Lefeuvre, Thibault, Marie Hélène Jeuffroy, et Jean-Marc Meynard. 2020. « Guide pratique diagnostic des usage :la conception innovante dans les systèmes agri-alimentaires ». Guide méthodologique.

Lefeuvre T., L. Prost, A. Alaphilippe, F. Angevin, N. Colbach, C. Pasquier, W. Queyrel, J.Villerd, et M. Cerf. 2023. « Mieux apprehender les situations d'usages d'outils et indicateurs agronomiques pour mieux les concevoir: retour d'expériences menées avec l'appui d'IDEAS » AE&S, 2 (13): 11p.

Martin, G. 2015. « A conceptual framework to support adaptation of farming systems – Development and application with Forage Rummy ». Agricultural Systems 132 (janvier):52-61. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.08.013.

Meynard, JM, M. Cerf, X. Coquil, D. Durant, M. Le Bail, A. Lefèvre, M. Navarrete, *et al*. 2023. « Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition ». European Journal of Agronomy 150 (octobre):126948. https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126948.

Meynard, JM., B. Dedieu, et A. P.B. Bos. 2012. « Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices ». In Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic, édité par Ika Darnhofer, David Gibbon, et Benoît Dedieu, 405-29. Dordrecht: Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2_18.

Meynard JM., MH. Jeuffroy, M. Le Bail, A. Lefèvre, MB. Magrini, et C. Michon. 2017. « Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems ». Agricultural Systems 157 (octobre):330-39. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.08.002.

Munier-Jolain, N M, B Chavvel, et J Gasquez. 2002. « Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities ». Weed Research 42 (2): 107-22. https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2002.00267.x.

Nidriche A., N. Cavan, T. Lefeuvre, N. Colbach, F. Angevin, et W. Queyrel. 2024. « Guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice ». Guide méthodologique.

Omon B., M. Cerf, C. Auricoste, P. Olry, MS. Petit, et S. Duhamel. 2019. « CHANGER-Échanger entre conseillers sur les situations de travail pour accompagner les agriculteurs dans leurs transitions vers l'agroécologie ». *Innovations agronomiques* 71:367-83. https://doi.org/10.15454/RZKXFZ.

Pelzer, E., G. Fortino, C. Bockstaller, F. Angevin, C. Lamine, C. Moonen, V. Vasileiadis, *et al*. 2012. « Assessing Innovative Cropping Systems with DEXiPM, a Qualitative Multi-Criteria Assessment Tool Derived from DEXi ». Ecological Indicators 18 (juillet):171-82. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.019.

Perrin A., G. Yannou-Le Bris, F. Angevin, et C. Pénicaud. 2023. « Sustainability assessment in innovation design processes: place, role, and conditions of use in agrifood systems. A review ». Agronomy for Sustainable Development 43 (1): 10. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00860-x.

Perthame, L, S Petit, et N Colbach. 2023. « Modelling weed seed predation by carabids and its effects on crop production under contrasted farming systems ». EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY 151 (novembre). https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126953.

Pleux, M.. 2021. « Co-construction d'une formation-action à un outil d'aide à la conception de systèmes de culture agroécologiques avec les futurs utilisateurs ». Mémoire de fin d'étide d'ingénieur. Dijon.

Prost L., M. Cerf, et MH Jeuffroy. 2012. « Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review ». Agronomy for Sustainable Development 32 (2): 581-94. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0059-4.

Prost L., R. Reau, L. Paravano, M. Cerf, et MH. Jeuffroy. 2018. « Designing Agricultural Systems from Invention to Implementation: The Contribution of Agronomy. Lessons from a Case Study ». Agricultural Systems 164 (juillet):122-32. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.009.

Queyrel, W., B. Van Inghelandt, F. Colas, N. Cavan, S. Granger, B. Guyot, R. Reau, *et al*. 2023. « Combining expert knowledge and models in participatory workshops with farmers to design sustainable weed management strategies ». Agricultural Systems 208 (mai):103645. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103645.

Reau R., M. Cerf, C. Cros, C. Ferrané, M. Géloen, V. Lefèvre, C. Pasquier, MS. Petit, et A. Schaub. 2018. « Atelier de conception de systèmes de culture: Guide pour leur réalisation avec des agriculteurs ». Guide méthodologique.

Reboud, X. 2017. « Usages *et al*ternatives au glyphosate dans l'agriculture française ». Rapport Inra à la saisine Ref TR50702. INRAE.

Rose D., C., C. Parker, J. Fodery, C. Park, W. J. Sutherland, et L. V. Dicks. 2018. « Involving stakeholders in agricultural decision support systems: Improving user-centred design ». International Journal of Agricultural Management, International Journal of Agricultural Management, 6 (3-4). https://doi.org/10.22004/ag.econ.287292.

Skorupinski, S, H Busset, J Caneill, D Moreau, B Mosa, E Motton, et N Colbach. 2024. « Combining a field experiment and literature to model the regrowth probability of perennial storage organs fragmented by tillage: Case study Cirsium arvense (L.) Scop ». SOIL & TILLAGE RESEARCH 244 (décembre). https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106279.

Walker, P.T. 1983. « Crop losses: The need to quantify the effects of pests, diseases and weeds on agricultural production ». Pesticides 9 (2): 119-58. https://doi.org/10.1016/0167-8809(83)90038-5.

Wilson, Clevo, et Clem Tisdell. 2001. « Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs ». Ecological Economics 39 (3): 449-62. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00238-5.

Pour citer cet article : Wilfried Queyrel, Alice Nidriche, Thibault Lefeuvre, Nathalie Colbach, Nicolas Cavan, *et al*.. Elaboration d'un guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.186-200. 10.17180/ciag-2025-vol101-art16

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

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

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

Mobilisation de la connaissance, pour accompagner la transition vers des systèmes de culture gérant les adventices avec moins d'herbicides

Bertrand OMON[1], Nicolas CAVAN[2], Nathalie COLBACH[2], Frédérique ANGEVIN[3]

[1] Chambre d'Agriculture de Normandie, rue des Rocquemonts, 14000 CAEN, France

[2] Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

[3] INRAE, Info&Sols, 45075 Orléans, France

Correspondance : bertrand.omon@normandie.chambagri.fr ; bertrand.omon@wanadoo.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art17

Résumé

Cet article est le témoignage d'un agronome du conseil et relate les interactions entre développement et recherche autour de trois thèmes présentés lors du séminaire de fin de projet Ecophyto COPRAA : la production de connaissances sur la régulation des adventices, le développement et l'utilisation d'outils d'aide à la décision, ainsi que la conception participative de systèmes peu ou pas consommateurs d'herbicides. Ce témoignage montre les résultats des échanges entre l'activité d'agronome de l'accompagnement et celle de recherche de l'équipe de INRAE Dijon. Trois axes sont particulièrement abordés : la mobilisation du produit des interactions dans la durée, l'utilisation du modèle mécaniste de « parcelle virtuelle » FLORSYS pour évaluer les évolutions potentielles de la flore adventice dans le temps, et la conception d'un outil accessible pour les agriculteurs grâce à l'appropriation des connaissances fournies et leur transfert. Enfin, l'article propose une réflexion sur la co-innovation, à partir de l'expérience vécue lors du projet COPRAA et met en avant les implications pour les acteurs accompagnant les agriculteurs.

Mots-clés : adventices, système de culture, gestion agroécologique, accompagnement, co-innovation, intermédiation

Abstract: Supporting the transition to cropping systems that manage weeds with fewer herbicides: how can knowledge, tools and models be mobilised?

This article is a testimonial from an agronomist advising farmers, describing the interactions between development and research around three themes presented at the end-of-project seminar of the Ecophyto COPRAA project: the production of knowledge on weed control, the development and use of decision-support tools, and the participative design of low- or no-herbicide-use systems. This testimonial shows the results of exchanges between the agronomist activity and the research activity of INRAE Dijon team. Three topics in particular are addressed: the mobilization of the product of interactions over time, the use of the FLORSYS mechanistic "virtual-field" model to assess potential changes in weed flora over time, and the design of a tool accessible to farmers through the appropriation and transfer of the knowledge provided. Finally, the article reflects on co-innovation based on the experience of the COPRAA project and highlights the implications for the actors accompanying farmers.

Keywords: weeds, cropping system, agroecological management, support, co-innovation, intermediation

1. Introduction

Cet article relate le témoignage d'un agronome du conseil[5] et la manière dont il a mobilisé trois types de résultats issus de travaux de recherche sur les adventices : les connaissances produites, des outils d'aide à la décision (OAD) et les processus de conception participative. Ce récit montre les interactions à double sens entre l'activité d'agronome de l'accompagnement et les travaux de recherche de l'équipe INRAE Dijon, l'une et l'autre des activités s'alimentant mutuellement. Trois thèmes sont abordés :

- interactions entre conseiller et chercheurs, et mobilisation de leurs productions dans la durée ;
- mobilisation du modèle mécaniste « parcelle virtuelle » FLORSYS dans la construction du conseil ;
- un exemple de proposition d'outil accessible aux agriculteurs conçu par le conseiller à partir de l'appropriation de la connaissance, de sa « digestion » et « traduction ».

Enfin, l'article propose une réflexion sur le processus de co-innovation à partir de l'expérience vécue lors du projet Ecophyto-OFB COPRAA[6] et, en particulier, sur l'implication de l'acteur accompagnateur des agriculteurs.

2. Intégration de la connaissance dans les processus de conception : un historique illustré de pratiques dans le conseil

2.1. Début de la collaboration avec la recherche

Les deux premières périodes (1995 et début des années 2000) s'articulent autour du groupe Plan de Développement Durable (PDD) de la vallée d'Eure. Puis suivent des travaux centrés sur la protection intégrée des cultures (Tableau 1). Nous avons surtout travaillé à l'échelle du système de culture (SdC) et du système d'exploitation, sans nous focaliser spécifiquement sur la gestion des adventices, mais plutôt sur des itinéraires de type « intégré, moins d'intrants ».

La question plus générale du rapport à la recherche et de la mobilisation de la connaissance s'est rapidement posée et a déjà orienté la façon de travailler avec les agriculteurs. Force était de constater que la structuration « descendante » de la R&D à l'époque ne facilitait pas ce type d'échanges et peu de choses étaient alors mobilisables pour la démarche mise en œuvre dans l'Eure comme ailleurs en grande culture. Cependant, la rencontre avec un ingénieur de l'ITCF[7], Philippe Viaux[8], qui contribuait à l'animation nationale des PDD en grande culture a représenté une exception et a été déterminante pour les débuts des démarches de co-innovation auxquelles j'ai pu prendre part.

Ce manque de ressources adaptées, ainsi que le constat que les agriculteurs pouvaient également se montrer intéressés par la compréhension des processus sous-jacents aux techniques, m'a alors orienté vers le partenariat avec la recherche pour accompagner les changements vers des systèmes intégrés bas intrants. Mon goût pour la connaissance des processus et la biologie ont aussi été moteurs. Cela s'est déjà traduit par des activités de compréhension, d'appropriation des connaissances, puis de traduction à destination des agriculteurs que j'accompagnais. Ensuite je n'avais pas d'autre choix que de les accompagner aussi dans l'usage, dans la mise en œuvre de pratiques et d'itinéraires, reposant sur certains processus identifiés, mais qui s'avéraient encore très peu décrits et validés par la R&D.

[5] D'où l'utilisation de la première personne du singulier dans le texte
[6] https://projet-copraa.hub.inrae.fr/
[7] Institut Technique des Céréales et des Fourrages, devenu depuis Arvalis
[8] https://www.academie-agriculture.fr/membres/annuaire/philippe-viaux

Nous étions dans les premières boucles d'une conception pas à pas. À la fin du plan développement durable et de cette seconde action, le groupe a souhaité poursuivre sur cette voie et il s'est élargi.

Tableau 1 : Focus sur la première période de collaboration avec la recherche

Productions issues de co-innovation	La « panne du schéma vertical » Pas encore vraiment de la co-innovation → Mobiliser l'agronomie clinique et collective pour palier cette panne	Fiches Itinéraire Techniques (ITK) pour blé et colza en Production intégrée
Acteurs (autres que agriculteurs) et réseaux	Réseaux des PDD	Réseau Blés rustiques Réseau Colza puis Picoble
Type de connaissance mobilisée	« 9 principes de Protection intégrée » Rotation et dates de semis/adventices *Les Fermes pilotes de Boigneville et les fermes réseau PDD grande culture*	Les combinaisons à effet partiels : Echelle itinéraire annuel Bioagresseur et azote (hors adventices) *Les Fermes pilotes de Boigneville et les fermes réseau PDD grande culture*
	1995	→ 2000
Public accompagné	Groupe agriculteurs PDD	Groupes agriculteurs « Agriculture intégrée » Post PDD
Ce qui fait collectif/public	Projet échelle exploitation et SdC Intégrés	Les SdC Intégrés bas intrants
Quelle mobilisation de la connaissance en co-innovation ?	Accès et compréhension Appropriation Traduction Appui à l'usage : mise en œuvre/ Champs Premières boucles du pas à pas	Idem + questions à la reconception Première véritables co-innovation / ITK intégrés, bas intrants

2.2. Une frise pour représenter les collaborations sur le temps long

Les interactions avec la recherche ont marqué l'activité d'accompagnement dans la durée. Elle fournit une vision panoramique sur sept périodes marquées par des jalons et des éléments-clés sur quelques dimensions déterminantes (Tableau 2). Le focus est mis sur le thème de la gestion des adventices qui n'a cependant pas été le seul abordé grâce à un processus de co-innovation, notamment au début de la mise en place des collaborations entre conseiller et chercheurs. Des travaux antérieurs ont ainsi porté sur les variétés rustiques de blé (Meynard *et al.*, 2009) ou sur la formation des conseillers (Cerf *et al.*, 2013).

Les jalons, décrivant ces différentes périodes ou époques ou saisons, sont liés à des missions ou à des activités spécifiques. Ce sont les suivants :

D 'abord, les acteurs concernés, ceci incluant les agriculteurs (en précisant le cadre de l'intervention) mais aussi tous ceux impliqués dans la co-innovation.

Une autre dimension importante est ce qui définit ce qui fait collectif pour le public cible, ce qui fait principe commun entre eux.

Le type de connaissance sur la gestion des adventices qui a été mobilisé.

La mobilisation dans l'activité de conseiller dans celle de co-innovation avec la recherche.

Les « traces » éventuelles de cette co-innovation.

Tableau 2 : Frise illustrant les étapes d'une histoire vécue de co-innovation sur le thème de la gestion des adventices sur le temps long de l'activité professionnelle.

Productions							

issues de co-innovation							
Acteurs (autres que agriculteurs) et réseaux	Réseaux des PDD	Réseau Blés rustiques Réseau Colza	RMT SdCi Groupe Stephy PIC-INRAE Dijon	RMT SdCi PIC-INRAE Dijon Réseau informel	**INRAE Projets COSAC puis COPRAA**		
Type de connaissance mobilisée							
	→ 1995	→ 2000	→ 2006	→ 2010	→ 2017-18	→ 2020	→ 2024
Public accompagné	Groupe agriculteurs	Groupe agriculteurs « Agriculture intégrée » Post PDD	Groupe agriculteurs « Agriculture intégrée » Post PDD	Groupe DEPHY Autres groupes	Groupe DEPHY	Groupe DEPHY BACs enjeu eau	Groupe DEPHY BACs enjeu eau
Ce qui fait collectif/public							
Quelle mobilisation de la connaissance en co-innovation ?	Re-questionnement de la connaissance appropriée et traduite, et mise à l'épreuve de l'activité clinique de l'agronome du conseil qui contient l'évaluation agronomique (bilan agronomique). Une activité de désinstallation d'une « connaissance alternative », tout en en réalisant une « traque aux pratiques innovantes », et une activité d'évitement du « verrouillage technique ».						

Dès 2006, la question de la maîtrise des adventices avec moins d'herbicides s'est posée avec plus d'acuité. Les travaux de R&D successifs, sur les itinéraires techniques annuels de blé et colza notamment, ne permettaient pas de raisonner à une échelle longue de la rotation voire à une échelle pluriannuelle. Les relations avec INRAE Dijon démarrent et des relations assez solides avec les responsables de l'expérimentation systèmes de culture PIC (Protection Intégrée des Cultures) sont établies (Cordeau *et al.*, 2019).

C'est aussi l'époque du démarrage du Réseau Mixte Technologique Systèmes de Culture Innovants[9] (RMT SdCi) qui ambitionnait de travailler à l'échelle des systèmes et non plus à l'échelle des itinéraires empilés. Cette échelle système était bien sûr la seule pertinente pour traiter la question de la gestion des adventices avec moins d'herbicides. Le partenariat avec la recherche se fait alors essentiellement à propos de l'activité de co-conception de systèmes de culture avec les agriculteurs dans le cadre du RMT mais aussi grâce à fortes interactions avec l'équipe de l'expérimentation PIC-INRAE et avec Philipe Viaux dès la mise en place des « micro-fermes » de Boigneville[10]. Ces collaborations m'ont permis d'être formé à des protocoles de descriptionà des méthodes pour mener et animer des ateliers de conception avec les agriculteurs. Sur cette période, je fais annuellement le voyage à Dijon pour aller visiter l'expérimentation PIC et échanger aussi bien avec le chercheur agronome responsable de l'expérimentation qu'avec le pilote technique de l'essai. J'ai aussi l'occasion d'échanger avec Philippe Viaux sur la gestion des adventices dans les « micro fermes ». Vivre des questions assez proches dans la même temporalité chez les agriculteurs et sur ces stations expérimentales à l'échelle système est un très bon exemple de ce que peut représenter la co-innovation pour tous les acteurs : agriculteurs, chercheurs et accompagnateurs. A ce propos, il faut souligner à quel point les pilotes de la mise en

9 https://ecophytopic.fr/recherche-innovation/concevoir-son-systeme/rmt-sdci-systemes-de-culture-innovants-puis-champs-et

10 Essais système de culture menés sur la station expérimentale d'Arvalis à Boigneville (91) de 1990 jusqu'à 2015. Ce sont 5 micro-fermes qui ont été testées : production intégrée, production monoculture de blé, production raisonnée, augmentation de la productivité du travail, Agriculture Biologique (mise en place en 2008). Des indicateurs sur les performances de ces micro-fermes ont été calculés.

œuvre ce type d'expérimentations systémiques et donc pluriannuelles sont des maillons très importants de la réussite. Et aussi, dans mon cas, des acteurs essentiels du partenariat de la co-innovation.

En 2010 débute le plan Ecophyto et le réseau DEPHY dans lequel je suis impliqué dès sa préfiguration (FERMECOPHYTO) pour accompagner ceux qui auront la mission, le métier « d'ingénieur réseau » en m'appuyant toujours sur ma propre activité avec le groupe de l'Eure qui deviendra naturellement un groupe DEPHY.

La gestion des adventices avec moins de dépendance aux herbicides est au cœur du projet du groupe DEPHY 27 et elle s'impose bien sûr aussi à l'échelle du réseau national pour les groupes en grande culture et polyculture-élevage en particulier. Mon implication dans la co-innovation en général, mais aussi ce focus sur cette thématique, sont les bienvenues et me rendent encore plus légitime pour confirmer cette activité, la renforcer si besoin. Je poursuis donc mes échanges avec l'INRAE de Dijon mais aussi un réseau d'essai porté par le RMT SDCi au titre de DEPHY EXPE. C'est une collaboration qui me permet de suivre un essai système dans l'Eure, en parallèle des systèmes des agriculteurs du groupe DEPHY FERME 27[11]. M'appuyant sur ces implications diverses, je deviens aussi, dans le cadre de ma mission d'accompagnement, beaucoup plus un intermédiaire de transfert vers d'autres groupes, d'autres collègues.

Pendant cette période d'une dizaine d'années mes relations, mes interactions avec la recherche sur la gestion des adventices ont été finalement beaucoup plus sous le signe du double sens de la co-innovation que je ne l'imaginais alors. C'est-à-dire que mes retours, mes observations et diagnostics agronomiques propres pouvaient alimenter mes contributions, de telle sorte qu'elles soient également une plus-value pour la recherche. Cela même si ma perception dominante demeurait alors que mon seul enrichissement était permis par mes interactions avec la recherche, et me permettait de développer ma compétence.

Mais la co-innovation est donc bien un partenariat à double sens très intimement liés et peu distinguables l'un de l'autre, de mon point de vue actuel. Mes interactions et partenariats avec la recherche m'ont plusieurs fois amené à créer des outils et des méthodes « intermédiaires » adaptées à une activité d'accompagnement, soit auprès des agriculteurs, soit auprès d'accompagnateurs eux-mêmes. Ce besoin m'est apparu lorsque certains concepts qui me semblaient tout à fait importants et intéressants se sont avérés pertinents pour accompagner les agriculteurs.

2.3. Adaptation du concept Dégât-Dommage-Perte dans le cas de la gestion adventices

La déclinaison du concept Dégât-Dommage-Perte (Zadoks, 1985 ; Savary, 1991) s'est avérée tout à fait opérationnelle avec les agriculteurs dans le cas des maladies et ravageurs. Ceci à la fois en termes d'expression de leur niveau de tolérance aux bioagresseurs mais également dans un usage de diagnostic clinique lors de bilans de campagne. Par contre il s'est rapidement avéré non opérationnel dans le cas des adventices. Or, au début du réseau DEPHY, il s'agissait de partager au sein d'une communauté d'ingénieurs réseaux, des méthodes pour décrire les systèmes de culture notamment pour les aspects décisionnels ainsi que du point de vue de la maîtrise des bioagresseurs dont les adventices. Je propose alors à plusieurs acteurs de la recherche mon adaptation de « Dégât-Dommage-Perte », testée dans un premier temps avec le groupe d'agriculteurs DEPHY 27.

Cette déclinaison est basée sur des niveaux de présence (biomasse plutôt que dénombrement) et de compétition avant récolte. Ces niveaux s'échelonnent entre *0 présence, une présence d'adventice sous couvert de la culture* ; *l'apparition de zones de domination des adventices au-dessus de la culture* (forme de compétition inversée), puis un niveau de *généralisation de cette domination des adventices*

11 https://normandie.chambres-agriculture.fr/conseils-et-services/preserver-lenvironnement/ecophyto/dephy-fermes-pilotes/

sur la parcelle. Enfin, un dernier niveau a été proposé par les agriculteurs eux-mêmes : une gêne significative à la récolte par la présence d'adventices, un critère très opérationnel pour eux.

Si j'analyse comment cela s'est produit, c'est d'abord mon activité d'agronome clinicien de l'accompagnement en interaction avec la recherche qui m'a permis d'identifier l'intérêt du concept Dégât-Dommage-Perte (Figure 1), lors de la co-production du guide STEPHY (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011), pour lequel mes co-auteurs et moi avons retenu des fondamentaux agronomiques de la gestion des bioagresseurs par la voie agroécologique. Puis cette activité d'agronome clinicien auprès des agriculteurs m'a incité à proposer une version opérationnelle pour le cas des adventices. J'ai découvert que ma légitimité d'accompagnateur se confrontant à l'usage d'un concept était grande. La trace de l'évolution de la tolérance des agriculteurs à la présence d'adventices dans leurs champs peut être considérée comme un effet de l'utilisation de cette méthode adaptée d'un concept (Figure 2).

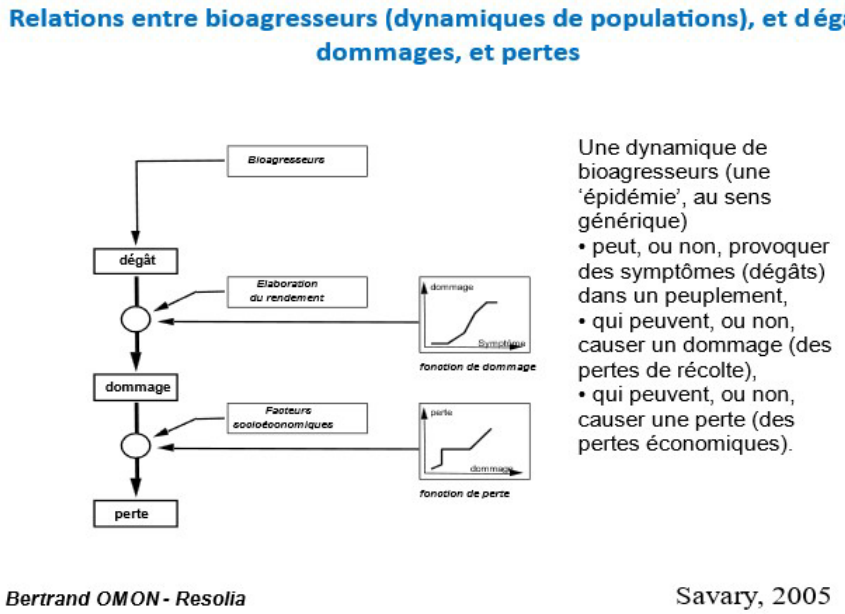


Figure 1 : Concept Dégât - Dommage - Pertes (Savary, 2005)

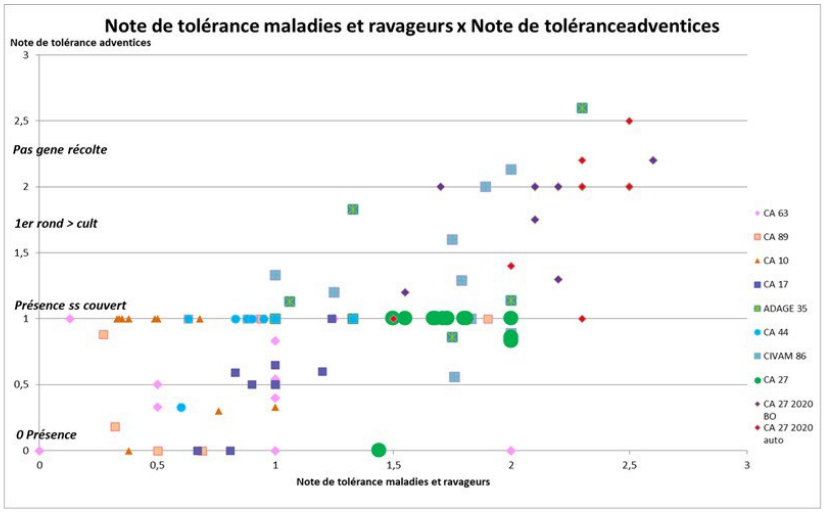


Figure 2 : Niveau de tolérance des agriculteurs de groupes DEPHY à la présence d'adventices dans leurs champs en 2010 et 2020

3. Mobilisation du modèle FloSys dans les processus de conception

À partir de 2017-2018, je continue d'accompagner le groupe DEPHY sur la gestion des adventices, même si les progrès sont intéressants et importants, car nous n'en avons jamais fini avec cette thématique-là. Je vis alors comme une très bonne chose ma participation au projet ANR COSAC[12] (Colbach *et al.*, 2020) mené par l'équipe de l'UMR Agroécologie de INRAE Dijon et dans lequel le modèle mécaniste FLORSYS de « parcelle virtuelle » (Colbach *et al.*, 2019 ; 2021) a été utilisé pour évaluer les systèmes de culture de mon groupe. Ce projet visait à : (1) comprendre et quantifier par l'expérimentation les effets des nouvelles pratiques agricoles sur la flore adventice et sur le fonctionnement de l'agroécosystème, (2) concevoir des outils prédisant les effets des pratiques agricoles et du pédoclimat sur la flore adventice, (3) utiliser ces outils pour concevoir des stratégies de gestion des adventices et évaluer leur performance dans différents contextes de changement des pratiques agricoles, du climat et de la biodiversité, (4) faciliter l'adoption des nouvelles stratégies de gestion des adventices par les agriculteurs.

C'est d'abord pour moi la possibilité d'être au fait des avancées des connaissances sur le sujet, pour en faire usage sans délai dans mon activité d'accompagnement. Alors, que cela change-t-il dans mon activité et notamment par rapport au type de connaissances modélisées ? Je le vis d'abord comme une forme enrichie d'accès et de partage de l'ensemble des connaissances disponibles sur la gestion des adventices. En quelque sorte, c'est ce que nous faisions déjà avec l'approche systémique qui visait à prendre en compte l'ensemble des grandes fonctions de gestion connues, mais à dire d'experts. FLORSYS permet d'accéder à la plus-value d'une modélisation prenant en charge encore plus de connaissances en simultané et sur le temps long (accéder aux résultats, dans mon cas, se fait uniquement par l'intermédiaire des chercheurs qui réalisent les simulations). Très vite, je perçois que le modèle FLORSYS nous permettra un regard complémentaire, plus puissant sur les co-conceptions de systèmes de culture avec les agriculteurs : soit pour les valider, soit pour en relativiser les impacts, soit pour mieux percevoir leurs effets sur le temps long. Je comprends dans le même temps que cela ne va pas m'affranchir de poursuivre la co-conception à dire d'expert.

Cette période a été l'occasion d'interactions très fructueuses avec les chercheurs. L'accès à des articles de façon privilégiée m'a permis d'être un intermédiaire plus enrichi et plus en mesure de partager ces connaissances avec mon groupe habituel d'agriculteurs comme étant le « premier groupe test », puis avec d'autres groupes ou d'autres accompagnateurs au cours de cette période.

Ainsi, le partenariat avec Nicolas Cavan (INRAE Dijon) pour la réalisation de simulations avec FLORSYS sur une douzaine de systèmes de culture du groupe a aussi été l'occasion d'une réelle co-innovation. Dans la mesure où le test de FLORSYS a été une façon de pouvoir confirmer, enrichir et élargir, d'avoir un regard plus perçant et un plus grand angle sur nos co-conceptions à dire d'experts. A ce stade, je perçois cela plutôt dans un sens un peu unique. Mais cela a été l'occasion, dans un autre sens, de proposer une forme d'invention avec, par exemple, le test de ce que nous avons appelé alors avec Nicolas Cavan, « *des pics de pression adventices* » (Figure 3). Et nous avons évaluer dans le temps, la régulation des adventices par système de culture grâce aux résultats de simulations du modèle FLORSYS. Cela a été aussi l'occasion de susciter, accélérer peut-être, la prise en compte du ray-grass dans FLORSYS. Cette adventice était déjà dominante dans les systèmes de culture aussi bien normands que des Hauts-de-France et s'est depuis développée sur une zone beaucoup plus large en France et en Europe. Et l'intégration du ray-grass au sein de la liste d'espèces pris en charge par le modèle était nécessaire. En effet le ray-grass n'étant pas juste une espèce sœur du vulpin, beaucoup plus rencontré encore dans les années 2010 en Bourgogne, un paramétrage spécifique était nécessaire.

[12] https://www.projet-cosac.fr/presentation

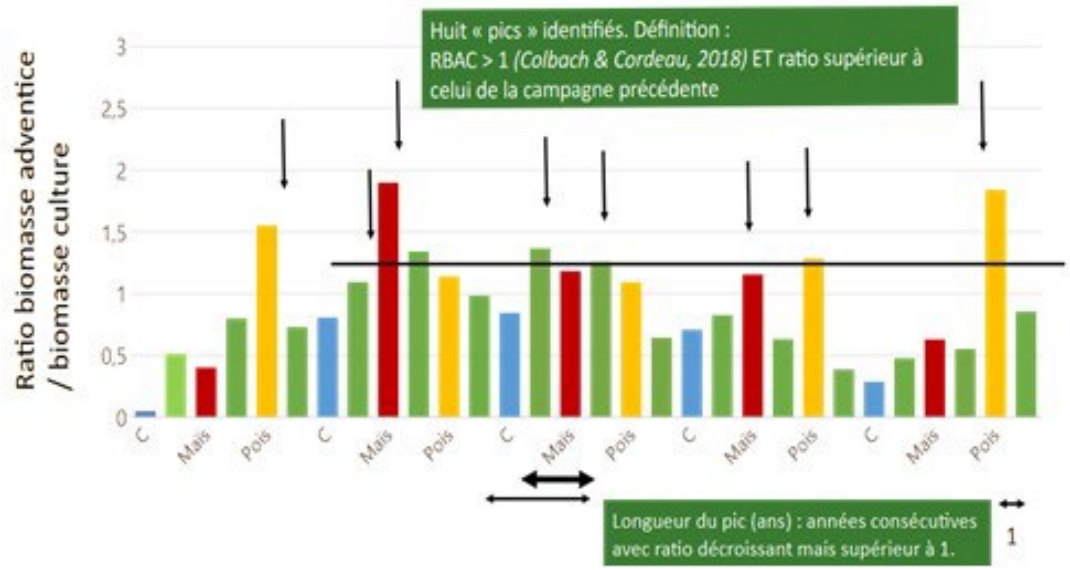


Figure 3 : Evaluation de la résilience d'un système de culture à l'aide du modèle FLORSYS. Les simulations se font sur une durée de 30 ans. Le ratio biomasse adventice/biomasse culture au stade floraison de la culture est un estimateur des pertes de rendement dues aux adventices. Un système résiliant subit peu de pics de pression adventice et des pics de courte durée (se rapprocher de nombre de pics * longueur de pics = 0).

Pendant cette période et grâce aux contacts privilégiés que j'ai pu avoir, j'ai eu une autre occasion de combiner mes observations d'agronome avec les travaux de recherche en cours. Par exemple, avec la question de l'effet de la fertilisation azotée sur la compétition des graminées adventices.

En travaillant sur un autre sujet agronomique, celui d'un pilotage dynamique de la fertilisation azotée du blé (Méthode APPI-N ; Ravier *et al.*, 2017), nous avions observé et vérifié avec des pesées de biomasse, des effets assez marqués de ce pilotage innovant sur la compétition cultures/adventices. Dans la même temporalité, grâce à mes interactions avec l'équipe de INRAE Dijon pour le projet COPRAA, j'ai pu entrer en contact avec Laurène Perthame dont la thèse portait justement sur l'intégration d'un module de fertilisation azotée dans le modèle FLORSYS (Perthame, 2020). Il s'avère aujourd'hui que les premières sorties et l'ajustement de ce module azote dans FLORSYS dans la période très récente pointent la nécessité de poursuivre le paramétrage et les tests. Ce constat aurait pu procurer un sentiment de frustration : il n'en n'ait rien. En effet il me semble plutôt que mon activité d'agronomie clinique peut, sur cet exemple, également illustrer la plus-value d'une co-innovation réelle sur l'évolution du modèle FLORSYS lui-même. Quitte à attendre encore pour pouvoir utiliser ce module et en montrer les intérêts grâce aux résultats des simulations. En attendant, il reste possible de partager la connaissance sur l'interaction « azote et la gestion des adventices » dans les groupes d'agriculteurs et avec leurs accompagnateurs. Sans être juste dans un mode « consommateur » de recherche.

Pour référence : même si une connaissance existait sur le rôle de l'azote sur les adventices, notamment les plus nitrophiles, avant ces travaux et ces interactions nous n'incluions pas le pilotage de la fertilisation azotée comme contribution à la fonction d'atténuation de la compétition des adventices dans les description et conception de systèmes de culture (cf. guide STEPHY). Alors que nous le faisions dans le cas de la gestion des maladies (Réf « réseau blé rustique »). Nous intégrons désormais cette pratique dans la fonction d'atténuation de la compétition.

4. La co-innovation à l'origine de la proposition de méthode et d'outil directement accessibles aux agriculteurs et leurs accompagnateurs : une grille de notation/diagnostic agronomique pour les territoires à enjeux qualité de l'eau

Ce focus illustre comment la co-innovation permet aussi la production « d'outils intermédiaires » par un accompagnateur lorsque le besoin apparaît dans sa propre activité. Reprenons pour cela l'adaptation du concept Dégât-Dommage-Perte dans le cas des adventices et le constat de son opérationnalité auprès des agriculteurs.

Nous pratiquons depuis quelques années un premier bilan de campagne agronomique avant les récoltes. Celui-ci a lieu en juin, une fois que l'action de l'agriculteur est terminée et avant que les effets biotiques et abiotiques, peu facilement diagnosticables, ne s'expriment complètement dans le rendement. Il s'agit d'établir un diagnostic clinique en visant à identifier ce qui est de l'ordre de l'effet des pratiques et ce qui résulte de stress abiotiques observés depuis les implantations (Figure 4). L'expérience m'a montré pendant des années que cet exercice devient difficile à faire une fois que les rendements sont connus, qu'ils soient satisfaisants ou non. L'exercice n'est alors plus aussi « clinique ». Nous visons même à faire ce bilan agronomique des cultures en continu, de façon à ce que, même en juin, il soit possible de mobiliser des diagnostics agronomiques par période depuis le semis.

Dans le cas des adventices, le stock semencier présent dans la parcelle est difficile voire impossible à évaluer, même grossièrement. Il en va de même pour la pression de levée dans la culture. Ceci empêche de faire une interprétation correcte de la situation constatée en juin avant récolte et d'analyser comment elle s'est construite au cours de la campagne quand un « point d'entrée » a été évalué.

Dans la même période, nous avons voulu, au sein du groupe adventices du GIS Grandes Cultures que je co-animais, faire le point sur le stock de semences et, si possible, proposer une méthode d'estimation simplifiée et opérationnelle, mais restant pertinente, pour accompagner les agriculteurs. Le travail réalisé par Inès Mahé (chargée de mission GIS Grandes Cultures) nous a amené à conclure qu'il n'était pas possible de proposer une version opérationnelle peu gourmande en ressources telle que nous l'imaginions. Les relevés de flore sont apparus comme étant les plus appropriés pour obtenir une caractérisation suffisante de la flore adventice sur des dispositifs de suivi de courte durée (Mahé *et al*., 2019). J'ai continué à mobiliser cette connaissance dans mon accompagnement sans pouvoir utiliser de mesures, pourtant très didactiques pour les agriculteurs.

J'ai alors proposé à mon groupe de se servir des notes « dites de Tolérance de DEPHY 2010 », cette fois pour un usage diagnostique (Figure 4). Le bilan du mois de juin est devenu le point d'entrée du bilan de la campagne suivante. Par la même occasion, cette grille simplifiée pouvait aussi devenir une clé pour la décision d'ajustement d'une rotation ou de sa poursuite, en considérant de la maîtrise des adventices avec peu d'herbicides.

Puis, dans mon activité d'appui agronomique direct dans un Bassin d'Alimentation de Captage (BAC), je l'ai proposé comme une aide à la décision d'ajustement de rotation, dans un document écrit dans le cadre d'une messagerie régulière pour ce public d'agriculteurs. Dans le cadre de l'appui aux animateurs d'autres BAC de la région, j'ai été incité à proposer une aide à la décision basée sur cette notation avant récolte en l'incluant dans un arbre de décision. D'une façon générale, j'éprouve une certaine réserve vis-à-vis de ce type d'outil qui peut avoir l'inconvénient d'avoir trop vite un statut de « vérité » ou de « bonne réponse immédiate ». Je leur préfère, au sein de mes groupes, des aides à la réflexion et des éclairages pour décider. Cependant, c'est en raison de la nécessité d'un accompagnement indirect que j'ai proposé cet arbre de décision.

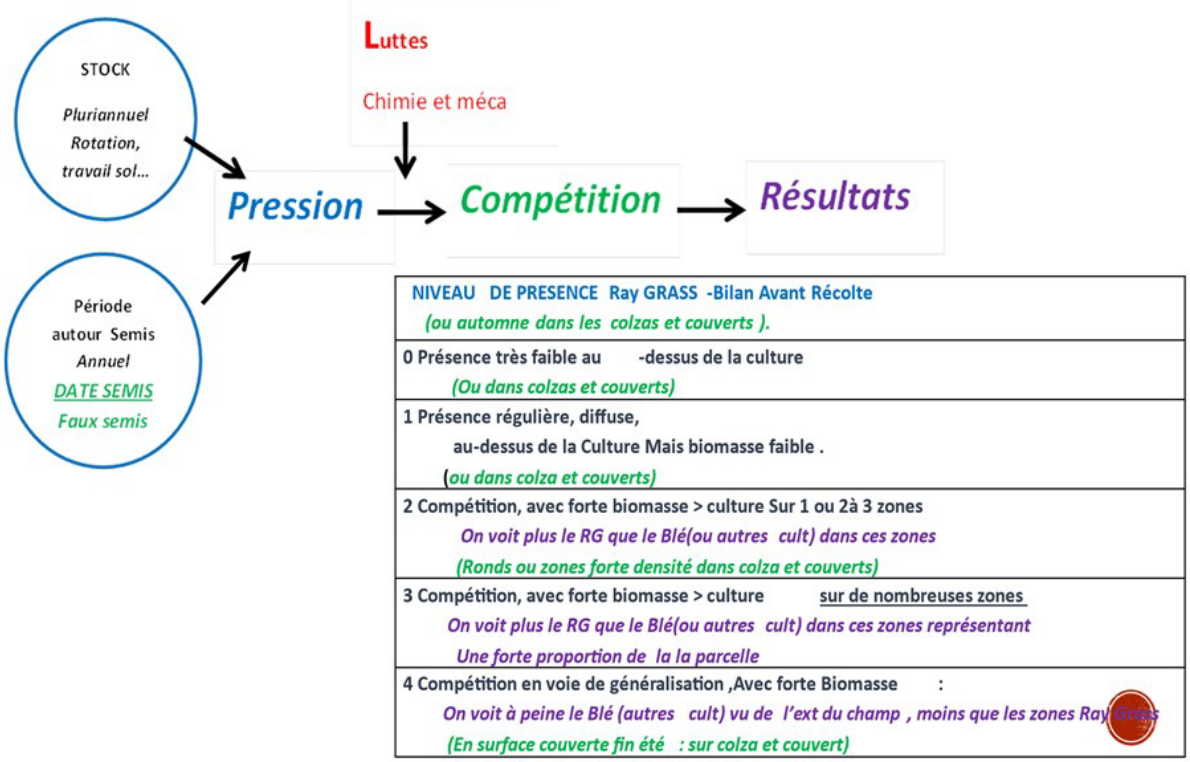


Figure 4 : Bilan annuel pour la gestion adventices, grille de notation de la présence d'adventices avant récolte.

Enfin, la question de comment mobiliser ces notes avant récolte à l'échelle d'un territoire s'est posée. En 2024, sur le BAC où je suis impliqué directement dans l'animation, faute de moyens humains suffisants, il n'a pas été possible de réaliser les notations sur les parcelles. Fort de l'expérience de la capacité des agriculteurs à faire l'exercice par eux-mêmes et convaincu de la plus-value que cela apporte, je me suis appuyé sur le partage régulier avec eux de cette méthode pendant deux ans. Puis je les ai préparés collectivement sur le terrain lors d'un tour de plaine en juin suivi d'une communication par écrit. Un groupe de quinze agriculteurs a fait l'exercice pour plus de 84 parcelles. La double entrée « niveau de salissement/usage des herbicides à l'échelle du territoire » a ainsi pu être tracée. Nous avons fait le choix ne pas rester sur les seules molécules actuellement visées pour la qualité de l'eau, mais sur l'ensemble de l'usage herbicide en utilisant l'IFT (Indice de Fréquence de Traitement herbicide, Tableau 3).

Tableau 3 : Diagnostic « niveau de salissement/usage des herbicides à l'échelle du territoire », BAC de Gisors (Eure), juin 2024

Nombre Parcelles BAC	Champ sale, ray-grass généralisé NOTE 4	Nombreux ronds et denses NOTE 3	Ronds ou zone (1 à 3) dans le champ dont bordure NOTE 2	Champ propre, ray-grass diffus sans forte biomasse NOTE 1	Champ propre NOTE 0		
IFT H < 1,75	1	2	15	9	1		25 « Champs propres/Eau plus propre »
1,75 < IFT H < 2,2		4	15	9	4		13 » Champs propres/Eau pas plus propre »
IFT H > 2,2		4	6	7	6		17 « Champ et/ou eau à

							améliorer »
	1	10	36	25	11		28 « Champs et/ou eau situation critique »
	83						**83 parcelles blé 2024**

5. Plus-value de cette forme de co-innovation dans le cas de la gestion des adventices

Afin de présenter de manière complète ce que représente une véritable co-innovation, trois points de vue sont considérés : celui d'un ingénieur de recherche avec qui les interactions ont été fortes dans le projet COPRAA, celui de la coordinatrice de ce projet et enfin celui de l'agronome clinicien en charge du conseil de terrain.

5.1. La co-innovation vue par un ingénieur de recherche INRAE

La réflexivité sur son activité de co-conception de systèmes de culture dans le projet COPRAA lui fait proposer qu'une co-innovation effective repose sur certaines conditions :

- un collectif d'agriculteurs ayant une activité sur les systèmes de culture, avec au moins une réflexion sur la gestion des adventices à l'échelle des systèmes ;
- un accompagnateur agronome des systèmes de culture ou avec de l'expérience dans l'animation d'ateliers de co-conception (voire si possible les deux) ;
- et du coté recherche : un « évaluateur » maîtrisant l'usage du modèle FLORSYS et ayant suffisamment de temps à consacrer à la réalisation des simulations (dont la durée est importante) mais aussi aux boucles de progrès suite au traitement des sorties du modèle et leur utilisation dans les groupes d'agriculteurs.

Ces conditions ne sont pas toujours réunies sur des territoires candidats ou intéressés.

Dans la perspective du modèle FLORSYS comme « outil de dialogue », cette façon de collaborer fait partie intégrante du processus de conception et d'évolution constante du modèle lui-même. En effet, les allers-retours entre les concepteurs/utilisateurs du modèle et les usagers des sorties de simulations permettent de proposer de nouvelles fonctionnalités et d'améliorer le modèle mais aussi de la gamme d'outils associée et destinée au travail avec les acteurs de terrain (par exemple : DECIFLORSYS , Colas *et al.*, 2020 ; Cavan *et al.*, dans ce numéro).

Il s'agit de susciter l'intérêt pour le modèle et la démarche de co-conception de systèmes de culture innovants en répondant aux attentes des utilisateurs avec des sorties présentant une plus-value (évolution de la flore sur plusieurs années, test de scénarios climatiques…). C'est une fois cette étape de mise en confiance franchie que la co-innovation peut se produire, favorisant ainsi l'amélioration continue du modèle.

5.2. La co-innovation vue par la cheffe de projet

La co-innovation et la co-construction sont au cœur du projet Ecophyto-OFB COPRAA, plus encore que dans le projet ANR COSAC :

- pour produire certaines des avancées de connaissance. En effet, certaines ont été co-produites avec les agriculteurs et leurs accompagnateurs puis intégrées dans le modèle mécaniste FLORSYS. Ce type de modélisation permet de synthétiser des connaissances de natures diverses ;

- pour identifier des lacunes de connaissances et formuler de nouvelles questions de recherche. Plusieurs exemples peuvent illustrer cela et en premier lieu, l'accélération de la prise en compte dans FLORSYS du ray-grass et de ses différences de traits par rapport au vulpin. Des observations de terrain réalisées dans un projet sur le pilotage de la fertilisation azotée ont aussi permis de mieux modéliser l'effet de l'azote dans la compétition blé/graminées adventices (et ray-grass en particulier). Les observations régionales sur certains stades comme les dates de levée et de floraison des adventices ont aussi alimenté le modèle ;
- pour mobiliser des données de terrain. L'intégration de l'écimage dans FLORSYS est basée principalement sur les résultats d'un petit réseau de tests (voir § 3) organisé dans la tâche de COPRAA dédiée aux acteurs de terrain ;
- pour mieux prendre en compte les besoins des utilisateurs des outils. Cela a beaucoup consisté en la mobilisation de collectifs d'agriculteurs et de leurs accompagnateurs pour les tests et retours d'usagers des différents outils de la « gamme FLORSYS », dont DECIFLORSYS. L'objectif a été d'éliciter la connaissance des utilisateurs pour la « traduire » dans FLORSYS et d'autres modèles. Cela s'est montré très important notamment pour intégrer dans DECIFLORSYS la décision de l'agriculteur (Colbach *et al.*, 2024 dans ce numéro).

Cela a été rendu possible grâce à FLORSYS, qui se révèle également être un modèle servant « d'outil de dialogue » avec les utilisateurs et les acteurs du changement.

5.3. La co-innovation du point de vue de l'agronome de l'accompagnement

La co-construction et la co-innovation dans les projets COSAC puis COPRAA ont permis, de mon point de vue d'agronome de l'accompagnement clinicien :

- *suivre l'acquisition de la connaissance sur la gestion des adventices,* notamment avec moins d'herbicides afin de pouvoir la partager avec les acteurs de l'activité de production agricole. C'est une veille privilégiée, qui peut commencer par l'accès à un article très récent, mais aussi la possibilité d'interactions avec les auteurs, ce qui amorce la fonction suivante de « traduction » puis de partage de connaissance avec les agriculteurs. C'est aussi ce qui rend possible, selon les sujets, d'apporter à l'acteur de la recherche le retour de l'agronome clinicien devenu lecteur éclairé : soit sur le fond du sujet, soit sur son partage possible, soit les deux. De nombreux acteurs de la recherche sont intéressés par connaître l'usage que les accompagnateurs font de leurs travaux ;
- *pouvoir participer à cette production de connaissances ;*
- *contribuer à la conception d'outils et de méthodes* initiés par la recherche, en aidant à la définition de leurs conditions d'usage mais aussi en identifiant des modules (sur la compétition avec l'azote) ou des paramétrages (introduction du ray-grass) qui seraient utiles dans les modèles ;
- *transférer la connaissance acquise en concevant un outil d'accompagnement des agriculteurs*. Cela est rendu possible grâce aux tests et ajustement des outils et méthodes initiés par la recherche, par les travaux de co-conception de systèmes avec les agriculteurs, l'analyse de leurs besoins et la capacité de l'accompagnateur à traduire ses acquis sous une forme opérationnelle.

6. Conclusion

Je propose dans cette conclusion de marquer un temps de réflexivité et d'analyse sur ce que cela a pu signifier en terme, non seulement de qualité d'interrelation, mais aussi de processus affichés de co-

innovation entre acteurs. J'avais eu une première expérience de ce type lors de la rédaction du guide STEPHY (Attoumani-Ronceux *et al.*, 2011) qui avait permis à l'acteur du développement que je suis de se sentir légitime non seulement dans le domaine du transfert, mais aussi pour proposer des versions ajustées d'usage de concept, d'outils et de méthodes. Cela était notable car, à l'époque, le schéma dominant de la R&D agricole était encore très vertical (*top-down*).

Je me permets aussi de pointer les conditions favorables pour une co-innovation effective. Ce type de collaboration nécessite d'être choisi et mis en place par l'ensemble des acteurs autour de la table et non subi. Une autre condition requise est la légitimité d'une activité réelle d'agronomie clinique reconnue par les acteurs de la recherche. Même après trente ans de partenariat avec la recherche, dont environ quinze sur les adventices, je redécouvre à chaque fois avec surprise et satisfaction que je peux participer à la co-innovation. Je mesure ainsi la difficulté pour mes pairs de l'accompagnement à en avoir l'occasion mais aussi le sentiment de légitimité qu'ils doivent ressentir pour y participer.

La co-innovation n'est pas la production de connaissance ou d'outils et méthodes où tous les acteurs adopteraient une même posture vis-à-vis de la question posée. Je reste un agronome de terrain et je ne deviens pas un chercheur. C'est bien la rencontre et l'échange entre des individus dont les métiers sont différents qui sont utiles et fructueux. Enfin dans une telle co-innovation, il faut mentionner aussi la nécessaire interdisciplinarité entre sciences. Je vois deux dimensions de cette interdisciplinarité dans mon vécu. Les deux nécessitent le dialogue entre les sciences du vivant et les sciences humaines.

La première dimension, qui me semble devenir ces dernières années une pratique habituelle, consiste dans un projet visant le partage de connaissances, via une méthode ou un outil, à adopter une démarche de test d'usage dans une boucle de co-conception de l'outil ou de la méthode. C'est un progrès incontestable qui s'illustre bien dans le cas du projet COPRAA (Colbach *et al.*, 2024, ce numéro).

La seconde dimension de cette participation des sciences humaines à la co-innovation agronomique intervient dans l'appui à la réflexion sur les différentes activités des acteurs. Je resterai ici centré sur l'appui des sciences humaines à l'activité des accompagnateurs. Cette interdisciplinarité permet la réflexivité de l'accompagnateur agronomique sur son activité auprès des agriculteurs à propos de la gestion des adventices. En effet, ces derniers, dans leur activité « pivot », doivent dans cette co-innovation non seulement s'emparer et contribuer à la production de connaissances mais aussi imaginer, penser la façon dont ils vont pouvoir la mobiliser avec les acteurs que sont les agriculteurs. Il peut s'agir de la mobilisation de la connaissance via différentes fonctions, dont la traduction opérationnelle pour les agriculteurs, ou alors de celle d'un modèle comme FLORSYS et la gamme d'outils associée. Mais il s'agit aussi de la réflexion sur l'agencement, l'articulation des situations d'accompagnement est nécessaire pour guider dans la durée et faire percevoir aux agriculteurs la cohérence de l'ensemble de ce qui est proposé.

J'ai pu développer, depuis des années, cette autre dimension du développement de compétence qu'est la réflexion sur son activité en situation de travail. C'est probablement pour cette raison que j'ai pu concevoir mon activité d'accompagnement de leur changement fondé sur les avancées de connaissances, dans le cas de la gestion des adventices, en mobilisant la plus-value de ma participation au projet COPRAA.

Les sciences humaines proposent pour rendre compte de cette activité « d'acteur pivot » dans la transition agroécologique, avec la figure de « l'intermédiateur ». En effet, lorsque de nombreux acteurs ont une activité qui déborde le cadre de leur mission de « conseil » ou ont une mission qui les met directement ou indirectement en relation avec l'action publique, on parle alors d'activité d'**intermédiation** de l'accompagnement au changement par des acteurs « Intermédiaires » (Cerf *et al.*, 2017a, Cerf *et al.*, 2017 b, Coen *et al.*, 2017).

Il ressort de cette réflexion sur la co-innovation dans le cas de la gestion des adventices qu'il est maintenant possible d'aider les accompagnateurs à penser un « parcours d'accompagnement » sur la gestion des adventices.

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

Frédérique ANGEVIN : https://orcid.org/0000-0002-1555-9160 ;

Nathalie COLBACH : https://orcid.org/0000-0002-3791-037X.

Contributions des auteurs

Données de terrain : BO, Simulations : NCa, NCo, Conceptualisation : BO, FA, Financement : NCo, FA, Rédaction : tous.

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.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les groupes d'agriculteurs ayant participé aux différentes activités sur la période considérée. Ils remercient aussi Zouzou Angevin, pour ses nombreuses et actives participations aux réunions du projet COPRAA.

Déclaration de soutien financier

Ces travaux ont été réalisés avec le soutien financier de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) dans le cadre du Programme national 2014 « Sécurité alimentaire et défi démographique », axe « productions durables », projet " ANR-14-CE18-0007, COSAC " et dans le cadre du projet COPRAA, 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.

Références bibliographiques

Attoumani-Ronceux A., Aubertot J-N., Guichard L., Jouy L., Mischler P., Omon B., Petit M-S., Pleyber E., Reau R., Seiler A., 2011. Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires. Application aux systèmes de polyculture. Ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement, RMT Systèmes de culture innovants, 116p + annexes, https://agriculture.gouv.fr/guide-pratique-pour-la-conception-de-systemes-de-culture-plus-economes-en-produits-phytosanitaires

Cavan N., Alexandre J., Goetz C., Nidriche A., Trinh-Quy L., Queyrel W., Colbach N., Angevin F., 2025. Retour d'expériences de co-conception de systèmes innovants peu consommateurs d'herbicides avec des agriculteurs : rôle des outils dans l'appui à l'animation, *Innovations agronomiques*,101, pp.175-186.

Cerf M., Guillot M.-N., Olry P., Omon B., Marie Sophie Petit M.-S., 2013. Développer la capacité des conseillers à agir face à la diversité des situations de conseil en grande culture. *Économie rurale*, 2013, 337, pp.59-74. (hal-01019539)

Cerf M., Jeuffroy M-H., Cardona A., Barbier M., Guichard L., *et al*., 2017. Rapport Scientifique du projet Pestimute-Gen. Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques., 25 p. + annexes. (hal-02290688)

Coen A., Barbier M., Cerf M., Le Bail M., Prost L, 2017. Acteurs du changement intermédiaire, logiciel, ⟨hal-02787266⟩

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. https://doi.org/10.15454/TCSZ-9A31

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, https://agronomie.asso.fr/aes-9-2-14.

Colbach N., Moreau D., Angevin F., Rodriguez A., Volan S., Vuillemin F., 2020. Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement : le projet CoSAC. *Phloème 2020*, Jan 2020, Paris, France. pp.50-60. ⟨hal-02887204⟩

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, https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006.

Colbach N., Flament M., Maillot T., Pernel J., Queyrel W., Villerd J., 2025 La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices. *Innovations agronomiques*, 101, pp.119-134

Cordeau S., Adeux G., Chamoy P., Farcy P., Nicolas Munier-Jolain N., 2019 On a les adventices qu'on mérite, mais ce n'est pas toujours mauvais signe ! Retour sur 17 ans d'essai INRA sur la réduction des herbicides. *TCS. Techniques Culturales Simplifiées*, 2019, 101 (101), pp.11-16. ⟨hal-03347185⟩

Mahé I., Derrouch D., Vieren E., Chauvel B., 2019. Le stock de semences adventices peut-il être utilisé dans les études de terrain sur l'effet des systèmes de culture ? *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 2019, 9 (2), pp.154-161. ⟨hal-02628363⟩

Meynard J.M., Rolland B., Loyce C., Félix I., Lonnet P., 2009. Quelles combi- naisons variétés/conduites pour améliorer les performances économiques et environnementales de la culture de blé tendre ? *Innovations agronomiques*, 2009, 7, pp.29-47. DOI : 10.17180/bwb6-xd48. (hal- 01173147)

Perthame L., 2020. Analyse et modélisation du rôle de la compétition pour l'azote dans la régulation des adventices. Thèse d'Agronomie. Université Bourgogne Franche-Comté ⟨NNT : 2020UBFCK049⟩. ⟨tel-03134045⟩, 251p

Ravier C., 2017. Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation. Thèse en Sciences agricoles. Université Paris Saclay, (COmUE), ⟨NNT : 2017SACLA005⟩. ⟨tel-02059334⟩, 211 p.

Savary S., 1991. Approches de la pathologie des cultures tropicales, L'exemple de l'arachide en Afrique de l'Ouest. Paris : Editions Orstom et Karthala, 293 p.

Zadoks J. C., 1985. On the conceptual basis of crop loss assessment: the threshold theory, *Annual Review of phytopathology* 23: 455-473. DOI : 10.1146/annurev.py.23.090185.002323

Pour citer cet article : Bertrand Omon, Nicolas Cavan, Nathalie Colbach, Frédérique Angevin. Mobilisation de la connaissance, pour accompagner la transition vers des systèmes de culture gérant les adventices avec moins d'herbicides. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.201-216. 10.17180/ciag-2025-vol101-art17

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

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

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

Conclusions du séminaire Copraa

Christian HUYGHE[1]

[1] INRAE, Direction Scientifique Agriculture, 147 rue de l'université, 75007 Paris

Correspondance : christian.huyghe@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art18

Résumé

En conclusion d'un séminaire axé sur la protection des cultures et la gestion de la flore adventice, dans un contexte de remise en question des modèles agricoles *et al*imentaires en France et en Europe, il convient de souligner l'impérieuse nécessité de produire de façon économiquement performante tout en réduisant l'impact sur la santé et l'environnement. Il faut également anticiper le retrait des substances actives ou la perte de leur efficacité, ce qui requiert de corriger des biais cognitifs concernant les pesticides.

Le séminaire Copraa a mis en lumière l'importance de dépasser les situations de crise liées à des impasses pour se concentrer sur la prévention et la prophylaxie. La modélisation reposant sur le modèle FlorSys est un outil pertinent, dans lequel il convient d'intégrer des approches disruptives comme la diversification des cultures et l'agroécologie. L'intégration de l'animal et la complexification des systèmes sont également des pistes à poursuivre et à alimenter.

Différents sujets abordés au cours du séminaire doivent être poursuivis et approfondis, tels que l'application des enseignements à divers cultures et contextes, la prise en compte des autres moyens de production comme la nutrition azotée, et le rôle crucial des sciences humaines et sociales. Il faut développer une réelle ingénierie agroécologique impliquant une large gamme d'acteurs et explorant des solutions novatrices, y compris en matière de machinisme. Enfin, il est crucial de considérer les coûts cachés de l'usage des pesticides pour une transition économique viable. Le colloque a démontré la richesse des pistes et la nécessité d'un accompagnement politique pour l'évolution des pratiques.

Mots-clés : protection des cultures, désherbage, pesticides, transition agroécologique, innovations

Abstract: Conclusions of the COPRAA seminar

In conclusion to a seminar focused on crop protection and weed management, in a context of questioning agricultural and food models in France and Europe, it is worth emphasizing the urgent need to produce in an economically efficient manner while reducing the impact on health and the environment. It is also necessary to anticipate the withdrawal of active substances or the loss of their effectiveness, which requires correcting cognitive biases regarding pesticides.

The Copraa seminar highlighted the importance of moving beyond crisis situations linked to impasses to focus on prevention and prophylaxis. Modeling based on the FlorSys model is a relevant tool, into which disruptive approaches such as crop diversification and agroecology should be integrated. The integration of animals and the increasing complexity of systems are also avenues to pursue and develop.

Various topics addressed during the seminar must be pursued and explored in greater depth, such as the application of lessons learned to diverse crops and contexts, consideration of other means of production such as nitrogen nutrition, and the crucial role of the human and social sciences. It is necessary to develop genuine agroecological engineering involving a wide range of stakeholders and exploring innovative solutions, including in terms of machinery. Finally, it is crucial to consider the hidden costs of pesticide use for a viable economic transition. The conference demonstrated the wealth of avenues and the need for political support for the evolution of practices.

Keywords: crop protection, weeding, pesticides, agroecological transition, innovations

Au terme de ces deux jours d'échanges intenses et de fortes implications de l'ensemble des intervenants et des auditeurs, il me revient de tirer quelques enseignements transversaux, au-delà des remerciements de rigueur, et amplement mérités pour une organisation parfaite, une grande qualité de la programmation, et une grande qualité des présentations et des débats, dans et en dehors de l'amphithéâtre. Ma conclusion sera structurée en trois parties.

1. L'extrême acuité et pertinence de la question posée

Au moment où se tient ce colloque, la France et l'Europe traversent une période délicate d'interrogation sur leurs modèles agricoles *et al*imentaires, et ceci a conduit à une remise en question de la stratégie Farm to Fork à l'échelle européenne, au retrait du projet de règlement SUR devant prendre la place de la directive SUD et à des reculs sur les objectifs environnementaux, se traduisant par une évolution significative du projet de loi d'orientation agricole, la LOSAA, en cours de discussion au Sénat au moment où ce colloque se tient.

Mais ces atermoiements ne changent strictement rien à l'ampleur de la question qu'il convient de traiter, à savoir une capacité à produire, de façon économiquement viable et en réduisant massivement l'incidence sur la santé des Hommes et de l'environnement.

Les moyens engagés dans le plan national Parsada (Plan d'Anticipation du Retrait des Substances Actives et Développement d'Alternatives), qui est une composante d'Ecophyto2030 démontre le maintien de l'engagement public. Ce plan complète et enrichit le plan national via une approche où on passe d'une réduction globale d'usage et d'impact des pesticides à l'anticipation du retrait de molécules en évitant les impasses susceptibles de surgir. On est donc dans une logique de problem-solving, en mobilisant tous les leviers et les combinaisons de leviers. Ce que faisant, la finalité reste exactement la même et les incitations pour les différents acteurs sont réaffirmés. En anticipant le retrait des substances actives, on travaille aussi la question, trop souvent écartée, de la perte d'efficacité des substances actives par émergence de populations de bioagresseurs résistantes aux substances actives.

Dans le même temps, pour la recherche académique, le 0-pesticides est le scénario disruptif non-prescriptif reste la norme, forçant ainsi la recherche académique à explorer les fronts de connaissances les plus ambitieux, comme ceci est fait dans le cadre du programme prioritaire de recherche 'Cultiver et Protéger Autrement'.

Pour progresser, il me semble indispensable de corriger des biais cognitifs, qui sont au nombre de 3 :

- les pesticides sont un intrant. Au sens de l'économie des exploitations, les pesticides sont effectivement un intrant. Mais au sens de la pratique et du fonctionnement des couvert et des cultures, les pesticides ne sont pas un intrant, car il n'existe pas de courbe de réponse à la dose. Ceci peut facilement être illustré par le fait que dans la plage d'efficacité, la protection n'augmente pas quand on augmente la dose. Pire encore, s'il n'y a pas de bioagresseurs, l'application d'un pesticide ne sert à rien et n'induit aucune réponse. Evident, me direz-vous ! Et pourtant c'est toujours l'entrée première ;
- les pesticides seront toujours présents. Là encore, c'est faux. Les retrait des substances actives sont le fruit d'une décision humaine. Les pertes d'efficacité (voir weedscience.org pour l'émergence de résistances aux différentes classes d'herbicides, voir les travaux du réseau R4P sur la situation en France) sont un fait biologique et se multiplient. Les deux combinés conduisent à des pertes de substances actives ;
- il y aura toujours de nouvelles substances actives. Ici encore c'est faux. Au niveau de l'Union Européenne, il n'y a eu aucune nouvelle substance active homologuée en 2022 et 2023. D'aucuns diront que ceci est le fruit d'une réglementation trop exigeante qui limite les ardeurs des compagnies et qui rejette les quelques propositions. Mais c'est oublier une réalité beaucoup plus préoccupante : le nombre de modes d'actions, qui correspond au nombre de cibles métaboliques qu'un pesticide peut viser, est très limité, qu'il s'agisse des herbicides, des fongicides ou des insecticides.

Nous sommes donc en train de vivre un triple mouvement. D'une part, il y a une baisse d'usage et d'efficacité des substances. Il est d'autre part indispensable d'éviter les impasses en matière de protection, et donc de développer des leviers et combinaisons de leviers alternatives aux approches actuelles. Mais pour parvenir à une réelle durabilité, il est absolument indispensable de mobiliser le premier principe de la protection des cultures qui consiste à maximiser la prévention et la prophylaxie. Une prophylaxie généralisée, combinée à de nouveaux modes d'action comme par exemple le biocontrôle ou les interventions mécaniques doit conduire à revisiter les seuils de nuisibilité et d'interventions, mais en ayant toujours une attention aux risques à long terme. Ces risques sont de deux ordres. D'une part des risques d'explosion de populations de bioagresseurs au cours des années ultérieures si on les laisse proliférer aujourd'hui. D'autre part un risque de pertes de régulation naturelle si on intervient de façon inappropriée en perturbant les possibilités de régulation biologique.

Pour penser cela, il est indispensable d'avoir une vision globale et donc de ne pas se tromper sur le périmètre de la réflexion. Prenons le cas, souvent mentionné en 2024, du retour de l'ergot du seigle, *Claviceps purpurea*, dans les récoltes de céréales. Il est légitime de s'en préoccuper, tant ce champignon peut avoir des incidences sur la santé humaine. Le mal des ardents est la trace historique des incidences de la présence de champignon. Mais revenons à la situation de 2024 : pourquoi ces ergots dans les récoltes de céréales ? Ces ergots ne sont pas issus des céréales, mais des graminées adventices, notamment le ray-grass, dont des populations résistantes aux herbicides et notamment aux sulfonylurées ont été sélectionnées du fait d'un usage excessif de cette classe d'herbicides. S'il convient à court terme de solutionner les situations délicates et potentiellement dangereuses, il faut absolument en faire une base de réflexion pour que cette situation ne se reproduise pas, pour le ray-grass et pour d'autres adventices potentiellement à problème. Je pense en particulier au Datura, qui se généralise dans beaucoup de systèmes de cultures, et où la maîtrise doit passer par l'arrachage des toutes premières plantes qui s'installent dans une parcelle. A raison de plusieurs milliers de graines par plante arrivant à maturité, et d'une durée de vie dans le sol de plus de 10 ans, il faut intervenir en prévention. En prenant des gants pour l'arrachage, sachant la toxicité de la plante !

Au travers de cette problématisation, on voit que l'on doit réfléchir en même temps les biens privés (production, économie des filières) et les biens publics (biodiversité, eau, santé humaine). On doit aussi réfléchir en même temps le court terme et le long terme. La situation actuelle, reposant sur les pesticides, a conduit à rechercher des compromis (gagner sur une dimension, mais en acceptant de perdre sur une autre). Mais cette situation n'est pas tenable, et elle n'est même pas éthiquement acceptable quand on considère la tension entre aujourd'hui et demain. Il faut donc passer d'une situation de compromis, ou de conflit selon le terme utilisé par Juliette Young, à une situation de conciliation, ce qui impose d'aller au-delà des seules recherches d'efficience ou de substitution, pour aborder le terrain plus délicat de la reconception. Ce qui apparaît évident en matière de protection des cultures, c'est que le statu quo n'est pas une option.

2. La richesse et l'originalité des présentations

La durée du colloque était un pari, en matière de participation, avec les risques d'hémorragie du public. Il n'en fut rien. La durée a permis de donner de la longueur aux sessions, du temps aux présentations, une place importante aux échanges et a permis l'émergence de réflexivité. Le temps et la grande qualité pédagogique des interventions ont marqué ce colloque.

Je souhaite ici revenir sur trois dimensions particulières des présentations.

2.1. Jouer les pompiers

Plusieurs présentations ont porté sur des situations où la démarche expérimentale et le travail avec les acteurs ont été qualifiés de 'pompiers'. Il s'agit alors d'intervenir sur des situations dégradées, de flores qui sont devenues non maîtrisables dans le système précédent reposant sur un usage massif de pesticides. Ceci rejoint un point déjà mentionné plus haut dans ce papier. Il faut évidemment traiter de ces configurations, mais il faut se méfier de deux dérives possibles.

La première dérive serait d'abord de faire de ces configurations la situation pour le futur, où on démontrerait la difficulté à gérer avec moins de ressources phytopharmaceutiques des impasses générées par ces mêmes produits phytopharmaceutiques, et en estimant les coûts économiques en la comparant par rapport à un témoin sans impasse.

La seconde dérive serait d'oublier les situations de départ et les trajectoires qui ont conduit à devoir intervenir en pompier. Très souvent, il est difficile de déconvoluer les différents processus ayant conduit à ces impasses, d'identifier les différents facteurs et combinaisons de facteurs, de déterminer ce qui relève de dépendance aux conditions locales. Dès lors, il devient difficile d'extraire des éléments de généricité de ces situations d'interventions en pompiers.

2.2. La modélisation comme ressource

Au long de ce colloque, il a été souligné la pertinence et la puissance de disposer d'un outil de modélisation. Cet outil de modélisation a été utilisé et valorisé dans différentes situations, depuis la prédiction d'une évolution de flore, à la prise de décision d'interventions, jusqu'à une utilisation en support de médiation.

Il faut poursuivre bien évidement l'effort dans ce sens *et al*er jusqu'à l'évolution que laisse entrevoir les avancées considérables et rapide de l'IA (Intelligence Artificielle) et l'IA Générative. Les développements en reconnaissance, en agrégation de données, en capacité de pilotage des machines sont autant de secteurs où l'IA peut venir renforcer les avancées que les approches de modélisation vont permettre.

Mais on peut aussi s'interroger sur une sérendipité d'avoir un outil de modélisation aussi puissant. En effet, comment éviter que cet outil ne génère ses propres effets de fixation ? En effet, le modèle repose sur les processus qui ont été décrits et donc sur les situations qui ont été observés. Le risque serait alors que ce qui n'a jamais été décrit et mesuré soit simplement impossible. Et comme par construction du modèle, les systèmes disruptifs ne sont pas intégrés, ils sont exclus du champ des possibles.

Un outil tel que FlorSys (et ses enfants) oblige au formalisme. Il est à ce titre un agrégateur de connaissances. Cela nourrit le champ des usages possibles.

2.3. L'importance des approches disruptives

Au-delà du point d'attention sur les modèles, les approches et systèmes disruptifs testés et présentés au cours de ce colloque jouent un rôle majeur pour imaginer les possibilités de concilier biens publics et biens privés. Une grande diversité de disruptions pour la gestion des adventices a été évoquée.

Au premier titre, il a beaucoup été question de diversification. En effet, et cela a été clairement démontré, il faut oser revendiquer que l'agroécologie et l'augmentation de la diversité fonctionnelle qui la fonde sont sources de solutions. La diversification a beaucoup été vue à l'échelle de la rotation, et dans une moindre mesure du paysage. Mais il faut aussi l'explorer de façon très volontariste au niveau de la culture elle-même, via les mélanges d'espèces, ou via des itinéraires techniques plus complexes comme le relay-cropping, où on explore la possibilité de cultures chevauchantes.

L'utilisation des animaux a également été évoquée. La diversité des productions végétales est fortement impactée par la présence d'animaux sur l'exploitation et la présence d'herbivores induit la présence presque systématique de prairies, et souvent de prairies temporaires. Ces cultures vont peser fortement sur la protection des cultures et offrir des ressources pour les auxiliaires des cultures. Elles vont aussi modifier la banque de graines du sol et donc venir moduler les besoins en matière de désherbage et d'usage des pesticides. Au-delà de cet effet indirect, le colloque a montré comment l'animal pouvait offrir des options en matière de gestion de la flore adventice. Les moutons dans les vignes, les volailles dans les vergers ouvrent des possibilités et induisent des questions nouvelles. Mais tout comme la diversification des cultures, il faut un aval capable de transformer les productions animales pour envisager à grande échelle de telles pratiques.

Enfin, a été illustrée la possibilité d'un changement majeur d'utilisation des couverts via la production d'ensilages en cas de flore adventice très mal maîtrisée. Ceci permet de corriger drastiquement une situation très détériorée, sans qu'elle ne conduise à un enrichissement de la banque de graines du sol.

Cette complexification des rotations, des couverts et de leurs utilisations engendre bien d'autres questions que les seules questions biologiques. Elle pose des questions en matière d'équipements pour l'implantation, la conduite et la récolte des couverts cultivés ; elle interroge sur les débouchés, les marchés et donc l'ensemble des organisations afférentes. Elle pose enfin la question de son acceptabilité pour les agriculteurs et les praticiens, question qu'il nous convient d'adresser en recherche en se demandant comment éviter que la complexité ne devienne complication !

3. Aller plus loin encore ?

Au terme d'un tel colloque, on se pose inévitablement la question des suites à donner à une dynamique telle que celle qui a été induite par le projet COPRAA et qui est traduite dans ce colloque de deux jours. Le sujet de la protection des cultures et de la gestion de la flore adventice ne s'est pas éteint avec le projet COPRAA et l'ampleur des projets aujourd'hui portés dans le cadre du programme PARSADA témoigne de l'acuité de cette problématique, pour toutes les filières végétales et tout particulièrement pour les grandes cultures annuelles. En répondant positivement à cette nécessité de suite, cela ouvre sur différentes dimensions.

3.1. Approfondissements

Certains sujets ont été abordés dans COPRAA, qui mériteraient approfondissements. J'en identifie trois au seuil de ce colloque :

- **le champ d'application et de validité des enseignements issus de ces importants travaux de recherche**. En effet, la réflexion de COPRAA porte sur les systèmes de cultures annuelles, mais se focalise surtout sur les principales espèces que l'on rencontre dans ces rotations. Quand on analyse ce champ, on croise alors assez rapidement une difficulté qui vient de ce que les petites espèces, indispensables au titre de la diversification, sont souvent les premières à rencontrer des difficultés, voire des impasses lors de la réduction de la palette d'herbicides disponibles. Ceci peut alors rapidement se transformer en situations de blocage. On peut évoquer l'exemple de l'endive et de la chicorée, dont le désherbage reposait essentiellement sur deux molécules dont la benfluraline au profil tox/écotox particulièrement délicat. C'est aussi le cas du lin évoqué lors de ce colloque, dont le désherbage a toujours été un sujet préoccupant, et qui avant l'émergence de la protection par produits phytopharmaceutiques représentait un défi en termes de travail humain. Réussir à penser sur des cultures en difficulté est essentiel car on fait peu de développement pour les cultures sur de petites surfaces. A ces situations de cultures potentiellement en impasses, il faut ajouter les configurations de sol et de climat qui pourraient invalider les conclusions de ce colloque. Les variations interannuelles nous le rappellent régulièrement. Mais la trajectoire dessinée par le changement climatique pourrait être plus contraignante encore, avec des hivers plus humides, des sécheresses estivales plus marquées et plus précoces, et donc des périodes d'intervention plus courtes. Cette trajectoire climatique pourrait aussi venir modifier la gamme d'espèces adventices à maîtriser, voire modifier leur phénologie ;
- **comment la maîtrise des adventices se fait en prenant en compte les autres moyens de production ?** Il s'agit en particulier ici de mentionner la nutrition azotée des végétaux et des cultures. La nutrition azotée vient modifier l'interaction entre les espèces cultivées à protéger, seules ou en mélanges, et la flore adventice. La modulation de la nutrition azotée doit donc prendre en compte la gestion de la flore adventice. Si on prend une acception large de la nutrition des végétaux, dans le cadre conceptuel proposé par l'agroécologie, il faut alors étendre cette question jusqu'à la biostimulation et la mobilisation du microbiote racinaire des végétaux ;

- le dernier item qu'il convient d'approfondir est celui **des sciences humaines et sociales**. Certaines illustrations riches nous en ont été données au long de ce colloque. Les sciences humaines et sociales peuvent et doivent être convoquées à plusieurs titres. D'abord au titre de l'économie des filières et de la performance économique des exploitations, dans les systèmes actuels et dans les systèmes futures (cf infra). Ensuite au titre de la sociologie des acteurs et en particulier de l'acceptabilité par les agriculteurs des pratiques et systèmes nouveaux. Les sciences de gestion ont beaucoup à apporter sur les possibilités de transformer des systèmes largement en équilibre et verrouillés autour d'une utilisation importante des produits phytopharmaceutiques. Enfin, les sciences politiques et le droit de l'environnement sont indispensables ici pour penser le futur, en le traduisant dans des textes à fort pouvoir d'orientation favorisant l'accompagnement des agriculteurs dans une inéluctable transition. Le travail conduit dans le projet COPRAA est de nature à alimenter des évolutions en matière de politique publique.

3.2. Vers une ingénierie agroécologique au service de la maîtrise de la flore adventice

La co-conception et l'déation sont indispensables pour concevoir les systèmes de demain et c'est que Ideas a aider à faire. Il faut évidemment poursuivre ce travail, mais aussi identifier les leviers d'actions dont on manque encore, en ne prétendant pas que tout est déjà disponibles ou que tout est déjà connu. Il faut donc stimuler la créativité et passer des commandes ambitieuses qui seraient de nature à lever les effets de fixation. Ceci revient à être clair et ambitieux sur la cible comme le soulignait Bertrand Omon dans son intervention.

L'essentiel des actions de co-conception de Copraa semblent avoir été confinées aux agriculteurs et aux conseillers. C'est indispensable dans la mesure où c'est eux qui vont mettre en œuvre la protection des cultures. Mais il faut associer plus large et notamment les industries agro-alimentaires, les coopératives, les interprofessions, voire les acteurs de politiques publiques. Ainsi il s'agit d'aller vers une démarche de type Living Labs qui est particulièrement bien adaptée aux champs d'action où biens privés et biens communs sont en tension.

L'ingénierie agroécologique doit avoir pour finalité de combiner des effets à leviers partiels, d'une façon qui soit adaptée aux conditions locales et avec des marges de sécurité dans la mise en œuvre. Il faudrait sans doute alors évoquer la mobilisation de leviers redondants à des fins de sécurité et au risque d'une incidence économique forte.

Ceci conduit alors à s'interroger sur notre capacité à explorer la déformation de nos systèmes de production. Jusqu'où aller ? Je m'interroge quand je vois aucun projet sur la gestion du désherbage dans le PPR 'Cultiver et Protéger Autrement' et donc la clé d'entrée était l'absence d'usage des pesticides, afin d'explorer de nouveaux fronts de sciences. Peur du 0-Pesticides ou le sentiment qu'il n'y a pas de rupture à l'horizon ? Il ne faut surtout jamais écrire que le traitement 0-Pesticides x 0-travail du sol du dispositif Casys est un échec ! En effet, il est de notre responsabilité d'explorer les possibilités extrêmes et de les tester. L'échec serait de ne pas les tester. Si on n'explore jamais quelque chose qui ne marche pas, alors c'est qu'on n'est jamais allé assez loin !

Pour alimenter le champ de l'ingénierie, il faut utiliser tous les leviers, ceux des systèmes de culture et des pratiques culturales, du biocontrôle, de la génétique. Et il faut aussi envisager les ruptures en lien avec le machinisme. En regardant les 5 photos d'outils de travail du sol d'une intervention de la première matinée, j'ai été frappé par leur côté incroyablement conventionnel. L'innovation machinisme participe du niveau de reconception que l'on accepte (va accepter/peut accepter). Il nous faut donc l'inviter à bord de nos travaux. Nous disposons pour cela, aujourd'hui d'espaces particulièrement fertiles avec cet univers de la machine-outils et des compétences spécifiques. Il s'agit d'une part de l'AgroTechnoPole composé de bancs de recherche et d'expérimentation coconçus entre la recherche académique et les entreprises de l'agroéquipement. Il s'agit d'autre part du Grand Défi Robotique Agricole.

3.3. Les coûts visibles et les coûts cachés

L'analyse de la performance économique des systèmes dits alternatifs se heurte toujours à la réalité économique. On veut imaginer un futur et une trajectoire pour y parvenir qui reste viable à tout moment de la

trajectoire de transformation. Le mot de rentabilité a été un des plus utilisés au long de ce colloque. Mais la rentabilité est mal définie, et souvent la réalité du témoin est peu explicitée. Ainsi, si le témoin est la performance économique d'une culture protégée par un arsenal de pesticides, cette comparaison reste-t-elle pertinente si la molécule est susceptible de retrait, ou si une flore adventice récalcitrante s'est développée ou risque de le faire. Le terme de rentabilité conduit également à ne pas illustrer les autres performances, comme par exemple la préservation de la biodiversité. Toutefois, l'outil Dexi est précieux pour parvenir à éclairer toutes les dimensions.

Outre l'ensemble des performances, il est indispensable aussi de se pencher sur les coûts cachés de l'usage des pesticides. Il sera difficile d'avoir une vraie et réelle transition aussi longtemps que tout ou partie des coûts cachés restent invisibles. De quel coût parlons-nous ? Dans un rapport de Novembre 2023, la FAO a évalué les coûts cachés engendrés par l'agriculture, en identifiant des coûts sociaux, des coûts de santé et des coûts pour l'environnement. Evidemment, leur estimation est toujours délicate. Regardons uniquement les coûts pour l'environnement et limitons-nous à la question de l'eau et de son épuration pour produire une eau potable en dessous de la norme en matière de nitrates et sans présence de pesticides et de xénobiotiques ! Ces pollutions sont massivement, pour ne pas dire exclusivement, d'origine agricole. Les coûts de la purification de l'eau en France sont estimés entre 50 et 90 Milliards d'euros (M.A. Selosse, sur LinkedIn en 2024). Il faudrait bien sûr préciser ces valeurs, allouer ces montants au secteur agricole et identifier la part qui peut être réduite, sachant qu'il y a une portion qui est incompressible. Mais dès lors que l'on a un tel montant d'économie possible, peut-on envisager d'en utiliser une fraction pour soutenir les agriculteurs dans des agricultures reconçues, productives et avec une incidence plus faible, et aussi pour accompagner la transition avec couverture du risque inhérent au changement et conseil adapté ?

4. Conclusions

Un colloque qui conclut un grand projet est toujours un intense moment de partage et de mise en débat. Le pari fait de le tenir sur deux journées s'est avéré un pari gagnant par la qualité des présentations, la densité des débats et la richesse des échanges.

Le sujet de la gestion des adventices est un sujet fertile, et qui est majeur pour l'agriculture. La bonne gestion, c'est la garantie de la production et de la qualité aujourd'hui et la garantie de la capacité à agir au cours des années futures. Mais elle ne peut plus reposer aujourd'hui exclusivement sur les pesticides.

Ce colloque a montré l'étendue des travaux conduits, et l'étendue du champ des possibles. Le futur est fertile, les options et les systèmes alternatifs existent. La poursuite de la recherche et de l'innovation, la formation des futurs agriculteurs et de tous les acteurs de l'écosystème, l'accompagnement à la transition, la mobilisation de l'aval permet d'y parvenir. Il faudra aussi que l'environnement des politiques publiques et de la réglementation accompagne ce changement, et ne privilégie pas le statu quo, qui ne fera que repousser un besoin d'agir, au titre de notre responsabilité pour la génération actuelle et pour les générations futures.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction : les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Déclaration d'intérêt : les auteurs déclarent ne pas travailler, ne 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.

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.

L'introduction d'animaux en vergers et en vignes : une solution agroécologique pour gérer les adventices ?

Gentiane MAILLET[1,6], Arnaud DUFILS[2], René BAUMONT[3], Sonia RAMONTEU[1], Jean-Louis PEYRAUD[4], Frédérique ANGEVIN[5]

[1] ACTA, 149 rue de Bercy, 75012 Paris, France

[2] INRAE, Ecodéveloppement, 84000 Avignon, France

[3] INRAE, Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

[4] INRAE, PEGASE, 35590 Saint-Gilles, France

[5] INRAE, Info&Sols, 45075 Orléans, France

[6] Adresse actuelle : INRAE, AgroParisTech, Univ. Paris-Saclay, 91123 Palaiseau, France

Correspondance : frederique.angevin@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art19

Résumé

Le projet REVE avait pour objectif d'explorer les multiples aspects des interactions entre l'élevage et les productions végétales. Celles-ci se révèlent notamment productrice de nombreux services dont ceux de régulation des bioagresseurs. Cet article fait un focus sur l'introduction d'animaux en vignes et vergers pour gérer les adventices. Le but de cette étude est d'analyser, pour différentes espèces animales introduites, les services rendus en termes de gestion de l'enherbement, versus les disservices en termes de dommages causés aux sols, aux plants de vignes et aux arbres dans les vergers.

Mots-clés : Reconnexion végétal-élevage, vergers, vignes, adventices, enherbement

Abstract: Introducing animals into orchards and vineyards: an agroecological solution for managing weeds?

The aim of the REVE project was to explore the many aspects of interactions between livestock and crop production. In particular, these interactions provide numerous services, including the regulation of bio-aggressors. This article focuses on the introduction of animals into vineyards and orchards to manage weeds. The aim of this study was to analyze, for different animal species, the services rendered in terms of weed management, versus the disservices in terms of damage caused to soils, vine plants and trees in orchards.

Keywords: Crop-livestock integration, orchards, vineyards, weeds, grazing

1. Introduction

Dans un contexte de transition agroécologique, les systèmes agricoles sont confrontés à de nombreux défis techniques pour répondre à des exigences de durabilité. Un des leviers de cette transition est la diversification des cultures (Meynard *et al*., 2013), notamment en réintroduisant des animaux dans des systèmes spécialisés en grandes cultures ou en arboriculture (Moraine *et al*., 2016). En effet, depuis deux décennies, la littérature scientifique témoigne d'un renouveau d'intérêt pour ce type d'association en raison de leurs bénéfices environnementaux potentiels (Devendra, 2000 ; Mischler *et al*., 2018 ; Popay & Field, 1996 ; Ryschawy *et al*., 2014). Parmi les bénéfices environnementaux étudiés, nous pouvons par exemple citer : une diminution des traitements phytosanitaires (Mischler *et al*., 2020 ;

Schut *et al*., 2021), une amélioration de la fertilité des sols et une réduction des engrais azotés (Bell & Moore 2012 ; Martin *et al*., 2016 ; Rathore *et al*., 2019), une augmentation de l'autonomie alimentaire (Bell & Moore, 2012 ; Ryschawy *et al*., 2014) et une augmentation du bien-être animal (Schut *et al*., 2021).

Il existe de multiples façons de recoupler les cultures annuelles comme pérennes avec l'élevage, à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire. Nous nous intéresserons ici à un type de reconnexion spécifique qui est celui de l'introduction d'animaux sur les parcelles de culture fruitières et de vignes à l'échelle de l'exploitation ou via des coopérations entre éleveurs et viticulteurs ou arboriculteurs. Le volet socio-organisationnel et juridico-règlementaire n'est pas considéré dans cet article qui se concentre sur les aspects technico-environnementaux.

Une étude menée en France par Paut *et al*. en 2021 sur 34 fermes a analysé les motivations qui pouvaient conduire les arboriculteurs à introduire des animaux dans leurs vergers. Elle a montré qu'un des intérêts majeurs serait de faciliter la gestion de l'enherbement et donc de réduire l'utilisation des herbicides et le travail du sol. Cela constituerait un avantage en termes de main-d'œuvre, d'utilisation des machines et de protection de l'environnement. Un autre avantage supplémentaire qui pourrait motiver les arboriculteurs à introduire des animaux est la régulation des ravageurs. Cependant, la réintégration des animaux dans les vergers ou des vignes peut également entraîner des risques pour le sol (tassement ou création d'ornières) et pour les cultures (consommation des fruits, feuilles ou bourgeons, écorçage). De plus, cette pratique n'a pas encore fait l'objet de beaucoup d'expérimentations et très peu de références techniques sont disponibles concernant les services ou les disservices rendus qui sont variables en fonction de l'espèce animale introduite. Par ailleurs, certaines filières sont davantage référencées que d'autres dans la littérature.

La revue de littérature qui a été réalisée lors du projet REVE[13] avait pour objectif de faire une synthèse comparative des effets de l'introduction de différents animaux sur les bioagresseurs. Pour chaque espèce, les services rendus en termes gestion de l'enherbement, des ravageurs et des maladies ont été analysés en regard des disservices en termes de dommages causés dommages causés aux sols, aux plants de vignes et aux arbres dans les vergers.

Cet article fait un focus sur les adventices. Dans une première partie, les espèces animales recommandées pour gérer l'enherbement sont inventoriées. La deuxième partie traite au contraire des espèces sont qui sont plutôt à éviter. La dernière partie abordera les espèces qui ont peu été étudiées jusqu'à présent mais qui pourraient potentiellement présenter un intérêt.

2. Matériel et méthodes

Nous avons collecté 66 documents identifiés selon différents moyens de recherche : interrogations de bases de données bibliographiques, livrables de projets de R&D, réseaux sociaux, transmissions par les pairs, recherche à l'aide d'un outil de veille mis en œuvre à INRAE (CIKISI) et entretiens avec des experts. Les documents collectés ont été classés en six catégories : les études scientifiques, les études techniques, les témoignages, les communications institutionnelles et les comptes-rendus d'entretiens. 37 documents proviennent de France Métropolitaine, trois de Martinique, 8 d'Europe (hors France), 17 d'autres zones géographiques et un fait un état des lieux à l'échelle mondiale.

Les productions animales concernées par notre étude sont les suivantes : ovins, bovins, caprins, poules et poulets, oies, pintades, canards, cochons et lapins. Pour chaque espèce animale étudiée, l'impact de l'introduction en vignes et en vergers sur différents paramètres a été identifié et détaillé (voir Tab.1) :
Tableau 1 : Effets de l'introduction d'animaux sur la gestion de l'enherbement et risque de dégâts sur les cultures

[13] https://gis-grandes-cultures.hub.inrae.fr/collaborations-interfilieres/reconnexion-vegetal-elevage-reve

	Effets de l'introduction d'animaux sur le système de cultures pérennes	Moutons	Vaches	Poules et poulets	Oies	Lapins	Chèvres	Cochons
Services rendus (+) : gestion des adventices et amélioration de la fertilité du sol	Consommation d'herbe	37	11	14	9	5	7	10
	Exploration de la parcelle	37	11	14	9	5	7	10
	Effeuillage des vignes	2						
	Amélioration de la fertilité du sol par grattage ou piétinement	1		3				
Disservices rendus (-) : Risque de dégâts sur les arbres et le sol et les pieds de vignes	Apparition de zones de refus (plantes délaissées par le bétail lors du pâturage)	14	1	3	3	1		
	Diminution de la diversité de la composition floristique	3		2	2			
	Apparition de sol nu	2		4				
	Dégâts sur les racines par « labourage » du sol ou grattage superficiel	2		3				7
	Dégradation de l'arbre par écorçage ou picorage	17	2	6	3	2	4	
	Dégâts sur les branches basses	18	4	3	3		5	
	Consommation des bourgeons, feuilles ou fruits	20	4	7	3		5	2
	Dégradation du tronc par pression ou frottement	4	2	4	2			
	Dégradation de l'arbre par perchage			2				
	Dégâts sur les sarments de vignes	1						1
	Dégradation du sol par tassement, ou création d'ornières	13	4	2	1		2	7
	Dommage sur les fruits	1		2				
	Dégâts sur les jeunes plants	5	1	3	2		1	
	Dégradation des arbres par surfertilisation locale	2						

Légende

Effets positifs semblant significatifs

Effets positifs ne semblant pas significatifs
Absence d'effet : l'étude montre que cette pratique est sans effet
Effets négatifs ne semblant pas significatifs
Effets négatifs semblant significatifs
Effets inconnus : l'étude montre qu'il pourrait y avoir des effets mais que les mécanismes ne sont pas connus
Pas de publications

Les chiffres indiquent le nombre de publications mentionnant l'effet.Oies, moutons, vaches, lapins, poules ou pintades sont des espèces à recommander pour gérer l'enherbement

2.1. Les moutons : une solution traditionnelle et efficace

Le pâturage des moutons dans les vergers et les vignes est une pratique très ancienne (Delarue, 2020 ; Devendra, 2000 ; Popay & Field, 1996) commune dans de nombreux endroits dans le monde et qui est remise au goût du jour actuellement. Nous avons ainsi collecté 37 études ou témoignages qui traitent du pâturage des ovins en cultures pérennes dont 22 en vergers, 13 en vigne et 2 en vigne et

vergers. Plusieurs témoignages d'agriculteurs en Europe (Corroyer, 2017 ; Geddes & Kohl, 2009 ; Petit *et al*., 2017 ; Röhrig *et al*., 2020) ; Outremer en Martinique (Lavigne *et al*., 2011), en Australie (AWRI, 2016 ; Shannon, 2011), en Californie (Coffey & Mumma, 2014), en Nouvelle-Zélande (Dasgheib & Frampton, 2000), aux Etats-Unis (Wilson & Hardesrty, 2006) et en Malaisie (Chee & Faiz, 1991) attestent que l'introduction des moutons dans les vergers ou les vignes peut être une solution efficace pour gérer l'enherbement. Une étude conduite en Malaisie sur des méthodes de lutte contre les adventices dans des plantations de caoutchouc a montré qu'introduire des moutons permet de réduire les coûts globaux d'herbicides de 16 à 36 % (Chee & Faiz, 1991). Cette variation s'explique par des différences dans la gestion du pâturage, du taux de chargement et de l'âge des cultures. Des agriculteurs au Royaume-Uni ont noté une réduction des coûts d'entretien du verger grâce aux moutons (Burgess *et al*., 2014). D'autres témoignages en France attestent que la présence des ovins permet de diminuer le nombre de passages de faucheuse ou aide aussi à la maîtrise du lierre. Avant d'avoir des moutons, les agriculteurs fauchaient les rangs en moyenne six à huit fois par an contre une à deux fois après l'introduction des moutons (Jammes, 2017 ; Pype & Venineau-Delvalle, 2017). D'après une étude menée en Martinique sur un verger d'annonacées fruitières, le contrôle de l'enherbement par les moutons est efficace, mais les refus (plantes délaissées par le bétail lors du pâturage) doivent tout de même être éliminés régulièrement à la débroussailleuse, deux à trois fois par an (Lavigne *et al*., 2011). De même, en introduisant des brebis dans les vergers de châtaigniers ou de noyers, les arboriculteurs pourraient économiser jusqu'à 80% du temps de broyage. Seul un ou deux broyages des refus par an seraient nécessaires (Sagot, 2020a ; Sagot, 2020b). Les moutons peuvent cependant être sélectifs sur leur alimentation, ce qui peut induire une modification de la composition florale. Par exemple, dans une expérience menée par Geddes et Kohl (2009) sur l'introduction de brebis Shropshire en verger, celles - ci n'ont pas mangé les orties, mais elles les consommaient si elles étaient coupées et avaient séché au sol. D'autres auteurs ont remarqué que le pâturage des ovins sélectionne les graminées (Biofil, 2022). Une des solutions pour ne pas avoir de perte de diversité florale serait de pratiquer le pâturage tournant, même si cela n'élimine pas totalement les zones de refus et qu'un désherbage mécanique peut encore être nécessaire (Dufils, 2017). En viticulture, il est conseillé d'introduire les moutons sur des petites sections de vigne afin qu'ils mangent toute l'herbe à disposition (AWRI, 2016). Enfin, un témoignage d'agriculteur conseille, lorsque des zones de refus apparaissent, de surveiller le troupeau car cela peut révéler un déficit de la ressource fourragère ou une carence (Osaé a). Par ailleurs, la modification de la diversité floristique peut s'avérer positive. Un viticulteur faisant pâturer des brebis dans ses vignes a vu sa valeur pastorale passer de 40 à 90 sur deux ans de pâturage avec une augmentation de 27% de la proportion de légumineuses (Sagot, 2020c).

Malgré les avantages que présentent les moutons, les arboriculteurs peuvent hésiter à les introduire dans leurs vergers en raison des dégâts qu'ils peuvent engendrer. Pour certains, ces derniers sont même un critère rédhibitoire à l'introduction ou la conservation des brebis dans leurs parcelles (Jammes, 2017). Les moutons peuvent causer différents types de dommages plus ou moins maîtrisables selon la conduite. Ils peuvent d'une part, endommager les branches basses et le tronc des arbres en se frottant à la végétation et, d'autre part, ils sont susceptibles de consommer les feuilles, les bourgeons voire les fruits (Chee et Faiz, 1991 ; Jammes 2017 ; Lavigne *et al*. 2011 ; Lavigne *et al*., 2012). Des agriculteurs ont remarqué que les vergers pâturés par des moutons développaient des couronnes plus hautes car les animaux mangent les feuilles inférieures, ce qui a un impact sur les opérations de taille et sur la récolte (Röhrig *et al*., 2020). Dans les oliveraies, certains ont constaté que les brebis remontaient la frondaison des arbres jusqu'à 1,20 m, ce qui pourrait entraîner une perte de production de 20 à 25% (Jammes, 2017). Cette perte de production éventuelle a également été évaluée dans le cadre d'une expérience conduite par la Chambre d'Agriculture de Normandie sur l'introduction de moutons en verger de pommiers. Elle a montré des résultats variables en fonction des années d'étude : l'impact a été négligeable en 2015 mais a conduit à une perte d'environ 5% de la récolte en 2016. Ces dommages pourraient s'expliquer par un surpâturage ou par un manque en compléments alimentaires (Corroyer, 2017). Dans un atelier mené sur le pâturage des moutons en vergers de

pommiers, des participants ont aussi mentionné que le prélèvement des branches inférieures par les brebis dépendait de la forme de l'arbre. Cela pourrait notamment poser un problème dans les systèmes ayant des arbres conduits en axe avec une frondaison basse développée (Burgess, 2014). Un autre risque fortement redouté par les arboriculteurs est celui de l'écorçage. Un agriculteur ayant introduit un troupeau de brebis témoigne que l'un des animaux, probablement carencé, s'est mis à attaquer les arbres et a entraîné le reste du troupeau à faire de même. Il a alors opté pour un troupeau de plus petite taille et qu'il a introduit dès leur plus jeune âge dans les vergers (Osaé a, 2023). Dufils (2017) affirme également que les carences alimentaires peuvent engendrer des problèmes d'écorçage et que l'introduction d'animaux ayant pris l'habitude de manger l'écorce peut engendrer une modification du comportement du troupeau. Une des solutions proposées par de nombreuses revues scientifiques et techniques est d'utiliser la race anglaise Shropshire, utilisée traditionnellement dans les plantations de conifères (Geddes & Kohl, 2009) et qui a la réputation de ne pas s'attaquer aux arbres (Burgess *et al*., 2017 ; Pype & Venineau-Delvalle, 2017 ; Sagot, 2020a). Dans un travail d'enquête auprès de dix producteurs ovins, quatre ont confirmé que les ovins de race Shropshire ne s'attaquent pas aux arbres. L'un a cependant remarqué des dégâts qui seraient dus aux béliers de cette race. Chee et Faiz (1991) pointe également les risques engendrés par les béliers, particulièrement nuisibles pour les arbres. Ils peuvent endommager l'écorce en frottant le tronc avec leurs cornes. Ils peuvent aussi se dresser sur leurs pattes arrière et consommer l'intégralité de la canopée dans les plantations de moins de deux mètres. Pour limiter ce risque, certains recommandent de choisir la race Ouessant, de petite taille, particulièrement utilisée en viticulture (Brouard, 2022 ; France 3 Grand Est, 2022 ; TV sur Erdre, 2017). D'autres précautions pour protéger les arbres consistent à surveiller les troupeaux (Coffey et Mumma, 2014 ; Delarue, 2020 ; Sagot, 2020a) et protéger les arbres (CERPAM, 2017 ; Coffey et Mumma, 2014) et particulièrement les jeunes (Dufils, 2017 ; Sagot, 2020a). Les recommandations sont de laisser les protections en place huit à dix ans jusqu'à ce que les arbres soient matures. Ces protections peuvent être en ursus en tubex ou électriques. Il est aussi conseillé d'éviter les taux de chargement trop importants qui pourraient entrainer des carences, réduire la croissance des moutons et les inciter à manger l'écorce (Burgess *et al*., 2017). Enfin, il convient aussi de surveiller que les brebis ne restent pas trop longtemps stationnées auprès des arbres car l'accumulation localisée de déjections pourraient nuire à la bonne santé de ces derniers.

Hormis les dégâts sur les arbres, un autre risque identifié par les agriculteurs est celui du tassement du sol. Pour certains auteurs le passage des brebis, surtout en conditions humides, dégrade le sol (AWRI, 2016 ; CERPAM, 2017). Pour d'autres, ce tassement serait superficiel (Delarue, 2020) voire négligeable (Wilson et Hardesty, 2006 ; Sagot, 2020b ; France 3 Grand Est, 2017). D'après la revue Biofil (2022), s'il existe bel et bien un risque de tassement, il faut le relativiser en comparaison avec celui produit par le passage d'un tracteur.

Par ailleurs, certains auteurs soulignent que le passage des moutons pourrait avoir un effet bénéfique sur le sol. Contrairement aux herbicides les moutons ne détruisent pas complètement le couvert, ce qui protège le sol de l'érosion (Chee & Faiz, 1991). D'après Sagot (2020b), la présence des moutons offrirait un couvert plus dense qui protégerait du tassement via un système racinaire prairial structurant de manière homogène les premiers horizons de sol.

2.2. Les vaches : des animaux traditionnellement utilisés en vergers hautes tiges dans les pré-vergers ou dans les plantations de cocotiers

Les bovins peuvent être utilisés comme moyen de gérer l'enherbement dans les vergers, mais ils semblent être moins communément utilisés que les petits ruminants car ils engendrent des phénomènes de tassement des sols plus marqués du fait de leur poids plus élevé (Coffey & Mumma, 2014). De plus, du fait de leur taille plus importante, ils ne sont pas adaptés aux vergers basse-tiges à forte densité de plantation (Wilson & Hardesty, 2006).

Il existe toutefois des exemples de systèmes traditionnels associant arbres fruitiers et élevage bovin. L'un d'entre eux le pré-verger qui est l'association d'une prairie permanente et d'arbres fruitiers haute-tige. Ce système naît en France au XVIIème siècle et connaît son apogée vers 1930-1950, couvrant alors une surface 500 000 à 600 000 ha. Il représente aujourd'hui 100 000 ha, soit moins de 0,5 % de la SAU (Surface Agricole Utile). Une majorité de ces vergers se situe en Normandie, notamment dans le pays d'Auge dans des bassins qui disposent d'une industrie locale de la transformation (cidrerie, distillerie…) (Osaé b, 2023).

En pré-verger, la taille minimum du tronc des arbres doit être de 1,60 m et la densité inférieure à 100 arbres/ha (Osaé b, 2023). Pour pouvoir faire pâturer des bovins, il est nécessaire d'avoir des arbres haute-tige taillés vers le ciel pour que les animaux ne tirent pas et ne cassent pas les branches (Pleinchamp, 2017). Les pré-vergers nécessitent des dispositifs de protection spécifiques car les frottements des bovins contre le tronc peuvent détériorer les arbres (Chambre d'agriculture de Haute-Vienne, 2015). La plantation de trois à quatre pieux par arbre est le dispositif classiquement utilisé dans les vergers pâturés par les bovins pour protéger les arbres. Les éleveurs de bovins en Bretagne et Normandie utilisent aussi fréquemment un corset ajouré en acier galvanisé évasé au niveau du point de départ des branches charpentières. La protection du jeune arbre planté est indispensable pour éviter l'abroutissement des bourgeons et écorces par le cheptel. Il est recommandé de laisser en place la protection au moins 20 ans car seuls les arbres fruitiers de cet âge résistent à la poussée des vaches et des bœufs. Le pâturage des bovins adultes est compatible avec un pré-verger de densité moyenne (75 arbres/ha), mais les éleveurs réservent souvent les vergers de pommiers et poiriers aux veaux et génisses. Trouver un équilibre entre le nombre d'arbres et le nombre d'animaux est important, car plus il y a d'animaux, plus la pression sur le tronc et les branches basses est susceptible d'être forte. C'est pourquoi certains producteurs limitent fortement le chargement afin d'éviter les dégâts sur les arbres (Osaé b, 2023).

D'autres exemples dans le monde attestent de l'utilisation des bovins en vergers pour gérer la biomasse adventice. Dans le Pacifique, des éleveurs utilisent de façon traditionnelle les bovins dans les plantations de cocotiers. Cependant, cette pratique peut engendrer des effets négatifs car les populations de scarabées rhinocéros (*Oryctes rhinoceros*), de graves ravageurs du cocotier, qui vivent dans les excréments bovins peuvent augmenter (Dalla Rosa, 1993).

Une étude menée sur des vergers abandonnés de mandariniers au Japon a également montré que le pâturage bovin, en particulier à un taux de chargement élevé, était efficace pour la gestion de la végétation. Cependant, les résultats sont contrastés car les deux espèces dominantes dans le couvert végétal au début du pâturage, le kudzu (*Pueraria montana*) et le solidago (*Solidago spp.*), ont montré des réponses différentes au pâturage pendant les deux années d'expérience. La proportion du kudzu a diminué, contrastant avec celle du solidago qui a augmenté. Cela peut s'expliquer par une préférence élevée du bétail pour le kudzu et par l'évitement ou la faible appétence pour le solidago (Hayashi *et al*, 2006).

2.3. Les oies : des volailles herbivores faciles à conduire

Les oies sont des animaux rustiques et herbivores qui peuvent consommer jusqu'à 1000 g d'herbe (matière fraiche) par jour (Lavigne & Lavigne, 2013). En comparaison avec des brebis, les oies présentent l'avantage de moins tasser le sol (Biofil, 2022) et de ne pas écorcer ou consommer les feuilles ou les fruits des arbres (Jammes, 2017 ; Osaé a, 2023). Des expérimentations sur l'introduction de poulets et oies dans les vergers de pommiers ont montré que les oies pouvaient être une méthode efficace de gestion de l'enherbement et sans dégâts pour les cultures (Clark *et al*., 1995 ; Clark & Gage, 1996). Cependant, les oies pouvant être sélectives sur leur mode d'alimentation, d'autres méthodes complémentaires de désherbage sont recommandées dans le cas d'une forte proportion d'espèces non appétentes dans le couvert (Lavigne *et al*, 2012). Les oies ont une préférence pour les graminées

(Clark *et al*., 1995) et les herbes à feuillage souple comme le kaya blanc ou l'herbe grasse (Lavigne *et al*., 2013). Ces préférences peuvent conduire à une modification de la composition du couvert avec une augmentation des espèces peu attractives pour elles. Ce phénomène peut, de plus, être amplifié par une trop forte densité animale (Lavigne *et al*., 2012).

Un agriculteur des Pyrénées-Atlantiques, qui avait choisi d'introduire des oies dans ses vergers de pommiers et pêchers en raison de leur herbivorie et de leur facilité de conduite, a également observé ce phénomène de sélection via une diminution de la pression en pissenlit. Il s'interroge également sur la question du chargement idéal pour pouvoir produire suffisamment sans pour autant voire apparaître des zones de refus qui entraînerait une baisse de la diversité floristique non souhaitable pour la durabilité de son système. Le manque de références, d'expérimentations et de retours d'expériences est d'après lui un point limitant concernant cette pratique. De plus, il estime que si les oies ont permis de maîtriser l'enherbement sur l'inter-rang, elles n'ont pas montré de résultat significatif sur le rang et n'ont donc pas limité la concurrence alors que c'était son objectif prioritaire (témoignage à consulter dans Osaé a, 2023).

Un agriculteur martiniquais a rencontré le même problème, puisque le couvert spontané de ses vergers présentait beaucoup d'herbes lianescentes de la famille de *Convolvulacea*, peu appétentes pour les oies. De plus, les oies étaient âgées et donc peu habituées à consommer de l'herbe. Cet agriculteur souligne un autre point de vigilance : les oies opéraient le même trajet régulier pour aller s'abreuver et ne prospectaient pas l'ensemble du verger à disposition (Osaé a, 2023). En effet, les oies ont tendance à rester près des sources d'eau (Clark *et al*., 1995). Ainsi, une préconisation consiste à bien préparer et à réfléchir le terrain avant l'installation de l'élevage en plaçant stratégiquement les abreuvoirs afin que les oies explorent au maximum la parcelle.

Enfin, si les oies ne représentent pas un risque pour les troncs âgés, elles peuvent en revanche être à l'origine de dégâts sur de jeunes plants par arrachage des feuilles ou piétinement (Lavigne & Lavigne, 2013 ; Osaé a, 2023).

Dans les vignes, si l'introduction d'oies semble rare, elle existe tout de même. Des agriculteurs de Champagne ont utilisé des oies pour gérer l'enherbement et fertiliser le sol. Les oies consomment liserons, ray-grass et pissenlits. De plus, elles entretiennent un lien social entre les agriculteurs et les habitants du village car les oies attisent la curiosité des passants qui s'arrêtent pour poser des questions. Les oies augmentent la biodiversité : elles attirent d'autres oiseaux en leur montrant les point d'eaux et en laissant des plumes qui les aident à faire leurs nids. (France 3 Grand Est, 2023).

2.4. Les poules, poulets ou pintades : une solution possible mais présentant quelques limites

Les poules, poulets ou pintades utilisés pour gérer l'enherbement dans les vergers semblent moins efficaces que les oies du fait de leur régime granivore. Les poules et poulets ne consomment que 60 grammes par jour d'herbe (matière fraiche). Pour les pintades, nous ne disposons pas d'informations sur la quantité d'herbe ingérée par jour (Lavigne & Lavigne, 2013). Dans l'expérience de Clark *et al*. (1995), les poulets n'ont réduit que légèrement la strate herbacée et ne l'ont pas réduite du tout dans celle de Clark & Gage (1996). D'après le guide technique de Béral *et al* (2014), sur l'aménagement de parcours pour volailles (surtout poulets et pintades), le parcours doit-être fauché régulièrement car les volailles ne sont pas en mesure de consommer toute l'herbe à disposition. De même, aux yeux d'un conseiller martiniquais spécialisé en protection des cultures, les poules sont nettement moins intéressantes que les oies. Cependant, pour Lavigne *et al* (2012), les poulets permettraient de lutter contre certaines adventices telles que le souchet rond (*Cyperus rotundus)* et de diminuer le désherbage (Lavigne *et al*, 2012). Dans une expérience menée par Hilaire *et al* (2001) sur l'introduction de poulets pour lutter contre les ravageurs du pêcher, les poulets ont permis l'élimination totale des adventices, conduisant à une suppression totale des traitements herbicides. L'efficacité des poules et pintades pose

aussi question chez les agriculteurs. Un arboriculteur ayant introduit des poules dans ses vergers n'a pas constaté d'effet probant sur les adventices. Les poules ne lui ont pas permis de réduire le désherbage mécanique. D'après lui, elles permettraient juste de « fignoler le travail » (Osaé a, 2023). Un autre agriculteur, éleveur de poulets label rouge sur parcours de châtaigniers, a décidé de faire pâturer ses brebis en complément car les poulets ne suffisaient pas pour maintenir un enherbement ras sur la totalité de la surface (Innov'action, 2015). En Flandres, des agriculteurs pratiquant l'agroforesterie utilisent néanmoins des pintades pour désherber sur le rang (Afinet, 2019). Cette efficacité contrastée pourrait s'expliquer par la faible ingestion d'herbe, mais également par un trop faible taux de chargement ou une faible exploration des volailles sur les parcelles.

Lavigne et Lavigne (2013) estiment que le chargement de poulets ou poules requis pour gérer l'enherbement va de 500 par ha pour les adultes à 1500 par hectare pour les jeunes. Aucune estimation n'a été trouvée pour les pintades. Plus précisément, d'après Lavigne *et al*., (2012), les poulets ne seraient efficaces qu'au-delà de 910 individus/ha et sur des surfaces plus restreintes aptes à les maintenir à proximité du poulailler. Béral *et al*. (2014), insistent sur l'importance de bien aménager le parcours pour inciter les volailles à sortir. Sur ce point, Clark *et al* (1995) attestent cependant que, contrairement aux oies qui restaient à proximité des points d'eau, les poulets se dispersaient davantage sur la surface disponible.

Un autre point qui pourrait pousser les agriculteurs à utiliser les poules ou poulets, plutôt que des oies, est qu'ils sont moins sélectifs sur leur alimentation (Lavigne & Lavigne, 2013). Dans l'expérimentation de Lavigne *et al* (2012), les poulets avaient été utilisés pour gérer les espèces refusées par les oies. Si le pâturage des poulets a permis une légère repousse des poacées lors des deuxièmes et troisièmes cycles, il a peu modifié la composition spécifique du couvert. Un arboriculteur confirme qu'il n'a pas observé de sélectivité de flore sur son verger prospecté par les poules (OSaé a, 2023).

Bien que les poulets ou les poules présentent certains avantages, les agriculteurs sont toutefois parfois réticents à les utiliser car elles peuvent endommager le sol et la bande enherbée. Certains constatent que la zone pâturée par les poules est très perturbée et ressemble à de la terre battue (Biofil, 2022). Les zones enherbées en sortie de trappes, plus fréquentées par les volailles sont bien souvent dégradées (Béral *et al*., 2014). Dans les essais d'Hilaire *et al*. (2001), les poulets ont détruit la bande enherbée entre les rangs si bien que le couvert végétal a disparu après 40 jours. Cette disparition de la bande enherbée en inter-rang constitue un handicap compte tenu de son rôle important d'un point de vue environnemental. Une des solutions pour protéger le couvert de cette altération serait de choisir des espèces à croissance rapide comme l'ont fait les expérimentateurs du projet MIRAD[14] à l'INRAE de Gotheron où des essais ont été menés d'introduction de poulets dans des vergers biologiques. Avec un ccouvertn*ad hoc* la strate herbacée n'a pas été dégradée par les poules (Brun, *comm., pers*.).

A contrario, certains arboriculteurs ou viticulteurs notent un effet bénéfique des poules sur la structure du sol car elles le grattent, ce qui contribue à l'aérer en surface en complément du travail du sol déjà effectué (Brouard, 2022 ; La Chaine des détours gourmands, 2014 ; OSAé a, 2023).

Pour certains auteurs, les volailles sont sans danger pour la production fruitière en comparaison avec les ruminants (Lavigne *et al*, 2011 et 2012 ; Lavigne & Lavigne, 2013) et sont considérées comme un choix plus raisonnable par les arboriculteurs (Coffey & Mumma, 2014). Pour d'autres, les poules, poulets et davantage encore les pintades, peuvent engendrer des dégâts sur les jeunes arbres et arbustes en grattant et tassant le sol autour du tronc, en picorant l'arbre ou en s'y perchant (Béral *et al*., 2014), ce qui implique de protéger les jeunes plants (Innov'action, 2015). Hilaire *et al*. (2001) ont observé des attaques sur feuilles sur une hauteur de 70 cm, voire plus, dans le cas de branches basses où les poulets pouvaient se percher. Des piquages sur certains fruits immatures situés dans le bas des arbres ont aussi été constatés. Cela ne constitue toutefois pas un grave préjudice compte tenu de la

[14] https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/systeme-bio-filets-inrae-gotheron-mirad

qualité des fruits situés dans cette zone. Il est donc conseillé d'opter pour une conduite des arbres qui permette d'obtenir un tronc plus haut et d'éviter les sous-mères trop basses. Dans l'expérimentation de Clark *et al* (1995), les poulets se nourrissaient aussi parfois des fruits dans les arbres, mais n'ont jamais été observés perchés dans l'arbre. En vigne, seuls deux témoignages d'agriculteurs ayant introduit des poules ont été collecté (Brouard, 2022, La Chaine des détours gourmands, 2014). Pour ces deux exemples la gestion n'est pas évoquée ou peu détaillée. L'un des viticulteurs indique néanmoins aussi qu'il les déplace avant les vendanges car sinon elles mangent les raisins (Brouard, 2022).

2.5. Les lapins : une piste innovante ?

Des agriculteurs en Italie faisant pâturer des animaux dans leurs vergers ont mentionné l'intérêt d'utiliser des lapins pour la gestion de la biomasse adventice (Röhrig *et al*., 2020). Le projet de recherche LAPOESIE[15], lancé en 2020 par l'INRAE s'est intéressé à l'impact de l'introduction de cette espèce sur la gestion de l'enherbement en verger de pommiers. Deux dispositifs ont été testés : une cage mobile légère permettant la gestion de l'herbe sur l'inter-rang et un parc fixe permettant la gestion de l'enherbement sur le rang. Le deuxième dispositif s'est avéré plus probant, les lapins ont été très efficaces. Les arbres étaient équipés de manchons pour éviter que les animaux ne mangent l'écorce ce qui s'est avéré performant. Les premiers retours d'expérience sont plutôt positifs : les lapins consomment l'herbe, les feuilles mortes, les fruits restés au sol (jusqu'à 20g de pommes/j/lapin) et des branchages issus de la taille. Ils sont intéressants car ils consomment une grande diversité d'espèces végétales (pissenlit, trèfle, dactyle, géranium sauvage, chardon…). Le lierre n'est toutefois pas consommé. En plus de leur action sur les adventices, les lapins pourraient avoir une action sur la tavelure en consommant les feuilles au sol ou en les dégradant par l'action de l'urine, mais ces hypothèses n'ont pas été testées dans le cadre du projet et restent donc à vérifier (Biofil, 2022).

3. Éviter les chèvres et les cochons qui causent trop de dégâts aux cultures

3.1. Les chèvres : des « débroussailleuses » trop efficaces

Plusieurs études et témoignages d'agriculteurs attestent qu'introduire des chèvres dans les vergers pourrait être une solution efficace. Cependant, cette pratique est peu commune et même peu recommandée en raison des dégâts importants qu'elles peuvent causer aux arbres (Coffey & Mumma, 2014 ; Wilson & Hardesty, 2006). Par exemple, les caprins sont davantage susceptibles de prendre appui sur les arbres que les ovins pour se nourrir des feuilles (Osaé a, 2023). Des agriculteurs faisant pâturer des moutons dans les vergers d'oliviers en Italie affirment que les chèvres sont gardées dans les zones forestières du fait de leur nature « exploratrice » et qu'elles sont particulièrement déconseillées dans les jeunes vergers qu'elles pourraient détruire (Röhrig *et al*., 2020). De même, un viticulteur du Grand Est avait songé à introduire des chèvres dans ses vignes, mais il leur a préféré les moutons car les chèvres s'attaqueraient au bois de la vigne (Agriculture innovante, 2014).

3.2. Les cochons : des animaux couramment utilisés dans les dispositifs agroforestiers hors-production fruitière mais déconseillés dans les autres systèmes

Nous disposons de deux témoignages d'arboriculteurs en région PACA qui ont introduit des cochons dans leurs vergers. L'un d'eux note qu'ils ont un effet positif sur le contrôle de l'enherbement en « broutant » l'herbe. Il indique qu'il faut accepter toutefois que le verger puisse présenter des trous, du fait du retournement de la terre qu'ils provoquent. Pour gérer les cochons, il a équipé ses parcelles de clôtures électrifiées qui, selon lui, sont le seul moyen de les arrêter (Osaé a, 2023). L'autre arboriculteur

[15] https://ecodeveloppement.paca.hub.inrae.fr/nos-projets/projets-en-cours/lapoesie

fait pâturer librement dans ses vergers deux truies et leurs porcelets. Néanmoins, il remarque également que les truies ont l'habitude de retourner le sol après la pluie et surveille donc le comportement des porcelets avant de les introduire (Jammes, 2017). Cette tendance à fouiller peut être une contrainte majeure pour les arboriculteurs car cela peut dégrader les sols et les ornières causées représentent une contrainte pour circuler.

Une étude scientifique conduite par Nunn *et al*. (2007) a montré que des cochons pouvaient être utilisés de manière efficace dans des vergers de pommiers au Canada pour la gestion des adventices. Une autre étude menée sur des vergers de pommiers, poiriers et cerisiers aux Etats-Unis de 2010 à 2011 confirme ce résultat (Buehrer & Grieshop, 2014). Ces études confirment que les porcs peuvent entraîner des dégâts au sol et aux racines des arbres par leur activité de fouissement. Dans le travail de Nunn *et al*. (2007), les porcs portaient des anneaux de nez pour les empêcher de fouiller le sol, afin de minimiser les dommages potentiels aux racines des arbres et au sol du verger. Dans l'étude de Buehrer et Grieshop (2014), la perturbation du sol n'a pas été quantifiée, mais les auteurs rapportent que les porcs ont "labouré" les parcelles de manière substantielle. Cette perturbation du sol peut endommager le système racinaire des arbres du verger et entraîner des problèmes d'érosion. Pour limiter ces perturbations, les auteurs recommandent d'adapter la conduite technique en prenant en compte l'espacement des arbres, leur maturité, la taille des porcs, le chargement des porcs sur les parcelles et la durée du pâturage. Les porcs utilisés dans cette étude pesaient 72,6 kg et pâturaient entre des arbres matures et très espacés. Dans ces conditions, les arbres n'ont pas semblé souffrir « du labourage » fait par les animaux. Cependant, la taille des porcs utilisés dans cette étude ne serait probablement pas appropriée dans un verger plus moderne avec une forte densité d'arbres sur porte-greffe nanisant. Les auteurs suggèrent que de futures études devraient s'intéresser à la mise en place de méthodes permettant de mesurer quantitativement les dégâts réalisés. Il faudrait également pouvoir déterminer la taille des porcs et le nombre de porcs par are qui seraient idéaux pour ces systèmes culture-élevage.

Il semblerait, qu'hormis quelques exceptions, en raison des dégâts qu'ils peuvent engendrer, les cochons soient plus couramment utilisés dans des contextes hors production fruitière. Nous pouvons citer l'exemple de la dehesa (une pâture en sous-bois clairsemé). Ce mode d'exploitation agro-sylvo-pastoral, qui existe depuis le Moyen-Age est encore largement développé dans la péninsule ibérique sur quatre millions d'hectares, où se conjuguent chênes lièges ou chênes verts et production porcine, ainsi que bovine et ovine (Osaé a, 2023). Des témoignages d'agriculteurs en Italie indiquent qu'ils utilisent des moutons, des volailles ou des lapins pour pâturer entre les oliviers, alors que les cochons sont exclusivement gardés dans les zones forestières car ils grattent le sol et il serait nécessaire de ressemer après leur passage. (Röhrig *et al*., 2020). D'autre agriculteurs des Flandres, ont planté des pommiers, poiriers, cerisiers, noisetiers et châtaigniers sur leurs parcelles pour faire une ressource supplémentaire en fourrage et élèvent leurs cochons en plein air sous ses arbres. Ces agriculteurs conseillent de faire attention à ne pas laisser les animaux trop près des arbres, surtout dans les premières années, car ils peuvent endommager voire causer la mort d'arbres en fouissant le sol. Ils recommandent de clôturer et de laisser au moins 0,5 à 1m d'espace entre les cochons et les arbres pour permettre aux racines de s'étendre (Afinet, 2019).

Une autre alternative innovante pour pratiquer le pâturage en vigne avec des cochons serait d'utiliser des espèces naines. Pour un viticulteur, ayant récemment introduit des porcs nains Kunekune originaires de Nouvelle Zélande, cela serait une meilleure option que les moutons car ils ne mangent que l'herbe et ne s'attaquent pas aux fruits. Ils peuvent donc rester dans la parcelle jusqu'au débourrement. De plus, ils consomment les racines et rhizomes des herbes présentes (Réussir vigne, 2023 ; France 3 grand Est, 2023).

Tableau 2 : Effets de l'introduction d'espèces animales peu étudiées sur la gestion de l'enherbement et risque de dégâts sur les cultures

	Effets de l'introduction d'animaux sur le système de cultures pérennes	Pintades	Dindes/Dindons	Canards	Lapins	Chevaux /ânes
Services rendus (+) : gestion des adventices et amélioration de la fertilité du sol	Consommation d'herbe	5	1	2	5	1
	Exploration de la parcelle	5	1	2	5	1
	Effeuillage des vignes					
	Amélioration de la fertilité du sol (sol plus meuble et plus aéré) par grattage ou piétinement					
Disservices (-) : Risque de dégâts sur les arbres et le sol et les pieds de vignes	Apparition de refus (plantes délaissées par le bétail lors du pâturage)	2	1	2	1	
	Diminution de la diversité de la composition floristique					
	Apparition de sol nu					
	Dégâts sur les racines par « labourage » du sol ou grattage superficiel	1				
	Dégradation de l'arbre par écorçage ou picorage	3	1	2	2	
	Dégâts sur les branches basses par consommation, frottements ou appui dans l'arbre	2	1	2		
	Consommation des bourgeons, feuilles ou fruits	2	1	2		1
	Dégradation du tronc par Pression ou frottement	1	1	1		
	Dégradation de l'arbre par perchage	1				
	Dégâts sur les sarments de vignes					
	Dégradation du sol par tassement, ou création d'ornières	1				
	Dommage sur les fruits	1				
	Dégâts sur les jeunes plants	2	1	1		
	Dégradation des arbres par sur-fertilisation locale					

Légende :

Effets positifs semblant significatif



4. Des espèces animales peu étudiées semblant pourtant intéressantes

Dans notre étude, nous avons trouvé très peu de références sur certaines espèces animales (Tab. 2). En volailles, nous avons collecté quelques documents évoquant l'effet des pintades sur la gestion de l'enherbement, mais ces études montrent que les connaissances sont encore très éparses sur ce sujet (Afinet, 2019 ; Jammes, 2017). Nous n'avons pas repéré d'informations sur la quantité d'herbe ingérée ni sur les risques de refus ou sur la densité de chargement recommandées. Nous n'avons pas vu d'articles scientifiques ou techniques ayant trait à l'introduction de dindes et dindons. En ce qui concerne les canards, Lavigne *et al*. (2012) mentionnent des expérimentations en cours sur l'utilisation de canards de Barbarie chez des arboriculteurs, mais n'apportent pas de précisions sur les résultats de ces expériences. Lavigne et Lavigne (2013) donnent des informations sur la quantité d'herbe ingérée par jour et la sélectivité de l'alimentation et ces données montrent que les canards pourraient avoir un intérêt pour gérer les adventices et nettoyer les vergers. Néanmoins, nous n'avons trouvé aucun autre témoignage pour cette espèce. Nous avons aussi vu précédemment que le projet LAPOESIE s'est intéressé à l'association lapins-vergers et quelques agriculteurs l'évoquent également (Röhrig *et al*., 2020) mais cette piste ne semble pas s'être concrétisée à grande échelle. Cela pourrait s'expliquer par des débouchés difficiles à trouver pour cette filière animale. Une autre filière pour laquelle nous n'avons pas trouvé de cas de reconnexion élevage cultures-pérennes est celle des équidés. L'utilisation possible des chevaux et des ânes dans les prés-vergers est mentionnée dans une des références collectées lors de la recherche bibliographique (Osaé b, 2023), mais aucun exemple concret n'est ressorti.

Plusieurs hypothèses peuvent permettent d'expliquer ce manque de connaissances :

- ces espèces ont été étudiées, mais les résultats n'étaient pas concluants et n'ont pas été diffusés ;
- notre méthodologie de sélection des données n'a pas permis d'identifier les études ou les initiatives focalisées sur ces espèces.

Afin de capitaliser davantage d'information sur ces espèces voilà ce qui pourrait être fait :

- utiliser des mots-clés plus ciblés ;
- élargir davantage la zone géographique (avec des mots-clés dans d'autres langues) ;
- élargir la temporalité de recherche (en utilisant des archives, par exemple) ;
- effectuer un travail d'enquêtes spécifiques.

5. Conclusion

Dans un contexte de transition agroécologique, introduire des animaux dans les vergers et les vignes pour réduire les traitements phytosanitaires est une alternative environnementalement intéressante. Cette solution est mise en pratique ou considérée par de nombreux agriculteurs en France ou ailleurs dans le monde. Toutefois, l'introduction d'animaux se heurte des limites de différentes natures : technico-économiques, socio-organisationnelles ou bien encore juridiques. Dans cet article, nous avons mis en évidence quelques freins techniques à l'introduction d'animaux qui sont les risques de dégâts sur le sol et les cultures, préoccupation importante des arboriculteurs et des viticulteurs. Nous avons pu

voir que toutes les espèces n'étaient pas équivalentes en termes de risques et que, par exemple, l'utilisation de chèvres ou de cochons s'avérait complexe voire déconseillée. De même, nous avons pu voir que toutes les espèces ne sont pas équivalentes en termes d'efficacité de gestion de l'enherbement. Pour les volailles, il existe une différence d'efficacité en fonction du régime alimentaire herbivore ou granivore. De plus, certaines espèces animales sont plus sélectives que d'autres sur leur alimentation et engendrent des risques de refus plus importants. Une autre limite que nous avons pu mettre en évidence est le manque de références, aussi bien scientifiques que techniques, sur les services ou disservices engendrés par la reconnexion élevage – cultures pérennes. De même, les connaissances ne sont pas équivalentes pour toutes les espèces animales. Néanmoins, certains modes de gestion semblent montrer un intérêt certain et partagé par différents agriculteurs dans différentes régions du monde, telle que l'utilisation de moutons pour la tonte des vergers et des vignes. Pour ces pratiques, plus de références techniques seraient nécessaires afin de faciliter leur mise en œuvre et de leur généralisation à plus grande échelle. Pour d'autres, plus innovantes, telle que l'utilisation de lapins en vergers, des études complémentaires seraient nécessaires pour évaluer la faisabilité chez des agriculteurs et identifier les débouchés potentiels pour la commercialisation des animaux. Un autre aspect qui mériterait d'être étudié et qui n'a pas été traité dans cet article, est celui de la complémentarité entre les espèces. Certains agriculteurs affirment mélanger ou faire des rotations de différentes espèces animales pour maximiser les services rendus. Par exemple, les poules peuvent être utilisées pour gérer les refus laissés par les oies. Cette solution pourrait être intéressante pour les fermes diversifiées et à petits effectifs, mais demanderait un travail de réflexion sur les possibilités techniques et réglementaires de l'association inter-espèces.

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

Frédérique ANGEVIN : https://orcid.org/0000-0002-1555-9160

René BAUMONT : https://orcid.org/0000-0002-3802-0651

Arnaud DUFILS : https://orcid.org/0000-0001-7495-6003

Jean-Louis PEYRAUD : https://orcid.org/0000-0002-6487-9355

Contributions des auteurs

Conceptualisation, méthodologie : tous ; analyse bibliographique : GM ; financement : JLP, FA, RB ; rédaction : GM, FA

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.

Remerciements

Les auteurs remercient Eva Drouin pour le travail effectué au préalable et les experts qui ont été consultés lors du projet REVE.

Déclaration de soutien financier

Le projet REVE a été financé par INRAE (Action Incitative Programmée Agriculture) et a été réalisé dans le cadre d'une action inter-GIS[16] (GIS Avenir Élevages, Grandes Cultures, Fruits et PIClég), en collaboration avec l'ACTA et le réseau mixte technologique SPICEE.

Références bibliographiques et vidéos

AWRI (Australian Wine Research Institute), 2016. Grazing sheep in vineyards. Ask the AWRI, issue 628, 46-47. https://www.awri.com.au/wp-content/uploads/2018/04/s1823.pdf

Afinet, 2019. Agroforestry in Europe. https://www.youtube.com/watch?v=u1dWmWrpu7w

Agriculture innovante, 2014. Des moutons dans les vignes. https://youtu.be/8dU2OI1tHLA

AGROOF, 2018. Les interventions dans un pré verger. https://www.youtube.com/watch?v=JNQ3cubScGg

Bell, L.W., Moore, A., D., 2012. Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. *Agricult. Syst.,* 111:1–12. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.04.003

Béral C., Guillet P., Brun V., 2014. Aménagements arborés des parcours de volailles : guide technique. Ed. AGROOF, 47 p. https://parcoursvolailles.fr/data/guideTechniqueCASDARVOLAILLES_leger_RVB.pdf

Bosshardt S., Sabatier R., Dufils A., Navarrete M., 2022. Changing perspectives on chicken-pastured orchards for action: A review based on a heuristic model. *Agricult. Syst.*, 196, 103335. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103335

Biofil, 2022. Introduire des animaux dans des vergers. N°140. https://www.biofil.fr/enquetes/introduire-animaux-verger/

Buehrer K., Grieshop M., 2014. Postharvest grazing of hogs in organic fruit orchards for weed, fruit, and insect pest management. *Org. Agr.*, 4:223–232, DOI: 10.1007/s13165-014-0076-0

Burgess P., 2014. Initial Stakeholder Meeting Report. Grazed Orchards in the UK. Livrable du WP3 du projet européen AGFORWARD.

https://www.agforward.eu/documents/WP3%20Initial%20Stakeholder%20Report%20Cranfield%20Grazed%20Orchards%208%20Oct%202014.pdf

Burgess P., Chinery F., Eriksson G., Pershagen E., Pérez-Casenave C., Upson,M., García de Jalón S., Giannitsopoulos M., Graves, A., 2017. Lessons learnt – Grazed orchards in England and Wales. Livrable du WP3 du projet européen AGFORWARD.

https://www.agforward.eu/documents/LessonsLearnt/WP3_UK_grazed_orchards_lessons%20learnt.pdf

Brouard J. M., 2022. Viti-pastoralisme au château de Poncié. https://www.terredevins.com/actualites/beaujolais-viti-pastoralisme-au-chateau-de-poncie

CERPAM, 2017. Le pâturage des vignes en Provence : un atout agroécologique pour la viticulture et l'élevage pastoral. CERPAM, 2p. Lien

Chambre d'agriculture de Haute-Vienne, 2015. La plantation de châtaigniers en polyculture élevage, complémentarité : châtaigniers-bovins. Compte-rendu de la visite du 20 novembre 2015 à l'EARL de la Chataigneraie. https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=160372

[16] GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique

ACTA : Association de Coordination Technique Agricole

Chee Y. K., Faiz A., 1991. Sheep grazing reduces chemical weed control in rubber. In: Shelton H. M., Stur W. W. (Eds)? *Forages for plantation crops*. ACIAR Proceedings 32. ACIAR, Canberra, Australia, pp 120–123.

Clark M.S., Gage S.H., 1996. Effects of free-range chickens and geese on insect pests and weeds in an agroecosystem. *Am. J. Altern. Agric*. 11, 39–47. https://www.jstor.org/stable/44503905

Clark M.S., Gage S.H., DeLind, L.B., Lennington M., 1995. The compatibility of domestic birds with a non-chemical agroecosystem. *Am. J. Altern. Agric*. 10, 114–121. https://doi.org/10.1017/S0889189300006275

Coffey L., Mumma T., 2014. Integrating Livestock and Crops: Improving Soil, Solving Problems, Increasing Income. NCAT Ed., 16p. https://attra.ncat.org/publication/integrating-livestock-and-crops-improving-soil-solving-problems-increasing-income/

Corroyer N., 2017. Lessons learnt: Grazed orchards in France. Livrable du projet européen AGFORWARD. https://www.agforward.eu/documents/LessonsLearnt/WP3_F_Grazed_orchard_lesson_learnt.pdf

Dalla Rosa K. R, 1993. Cattle under coconuts a practical pacific tradition. Agroforestry for the Pacific Technologies. *Agroforestry Information Service*, Number 7. https://winrock.org/cattle-under-coconuts-a-practical-pacific-tradition/

Dasgheib F., Frampton C., 2000. Weed management practices in apple orchards and vineyards in the South Island of New Zealand. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 28:1, 53-58, https://doi.org/10.1080/01140671.2000.9514122

Delarue E., 2020. Pour un partenariat gagnant/gagnant, *L'agriculteur Provençal*, N°1866, p 3. https://www.pressagrimed.fr/article/pastoralisme-et-cultures-perennes-pour-un-partenariat-gagnant-gagnant

Devendra, C., 2000. Crop-Animal Production Systems in Tropical Regions: a review. Asian Australasian Journal of Animal Sciences 13(2): 265-276. https://www.animbiosci.org/upload/pdf/13-33.pdf

Dufils A., 2017. Associer arbres fruitiers et élevage ovin. *L'arboriculture fruitière,* 175, 17-20. ⟨hal-02618739⟩

France 3 Grand Est, 2017. Des moutons pour la tonte autour des vignes à Cumières (Marne). Youtube. 2 min.

France 3 Grand Est, 2022. Des moutons et des oies dans les vignes marnaises. Youtube 3 min.

France 3 Grand Est, 202 3. Des cochons nains de Nouvelle-Zélande mieux que les moutons pour désherber les vignes ? Test grandeur nature en Champagne. Lien

Geddes P., Kohl R., 2009. Shropshire sheep control weeds in orchards. *Pesticides new* 86, 3-4 https://www.yumpu.com/en/document/read/25129479/shropshire-sheep-control-weeds-in-orchards

Hayashi K., Ikeda K., Ueda A., Fumita T., Etoh T., Gotoh T., 2006. Short-term response of vegetation to cattle grazing in an abandoned mandarin orchard in southwestern Japan. *Asian- Aust J Anim Sci* 19 (4): 514–520. https://doi.org/10.5713/ajas.2006.514

Hilaire C., Mathieu V., Joly T., Mirabito L., 2001. Le poulet label, un auxiliaire sélectif. Infos-Ctifl 170, 38–40.

Innov'Action, 2015. Agroforesterie : verger de châtaigniers et parcours arboré de volailles. https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=160373

Jammes D., 2017. Le pâturage en verger. Livret de références, 25p. Réseau Agriculture, Énergie & Environnement en PACA. Lien

La chaine Détours Gourmands, 2014. A Bourgueil, on élève les poules dans les vignes. Youtube. 1 min.

Lavigne C., Lesueur-Jannoyer M., de Lacroix S., Chauvet G, Lavigne A., Dufeal D., 2011. De la production fruitière intégrée à la gestion écologique des vergers aux Antilles. *Innov. Agron.* 16, 53-62.

Lavigne A., Dumbardon-Martial E., Lavigne C., 2012. Les volailles pour un contrôle biologique des adventices dans les vergers. *Fruits* 67, 341–351. https://doi.org/10.1051/fruits/2012029

Lavigne A., Lavigne C., 2013. Associer production fruitière et élevage de volailles, une méthode innovante pour gérer l'enherbement. Guide pratique. Fredon et CIRAD Eds., 16p http://www.fredon972.org/wp-content/uploads/2016/01/GuideAssocierProductionFruitiereElevageVolailles_ALavigneCLavigne_PF_2013.pdf

Martin G., Moraine M., Ryschawy J., Magne M. A. *et al*., 2016. Crop–livestock integration beyond the farm level: a review. *Agron. Sustain. Dev*. 36, 53 (2016). https://doi.org/10.1007/s13593-016-0390-x

Meynard J.-M., Messéan A., Charlier A., Charrie, F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.-B., Savini I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Étude au niveau des exploitations agricoles et des filières Synthèse du rapport d'étude, INRAE, 52 p. https://doi.org/10.1051/ocl/2013007

Mischler P., Tresch P., Jousseins C., Chambaut H., Durant D., Veysset P., Martin G., Fiorelli J. L., Ben Chedly H., Pierret P., Candau D., Sennepin D., Cailly B., Emonet E., Ramette C., Flament M., Martel G., 2018. Savoir caractériser les complémentarités entre cultures et élevage pour accompagner la reconception des systèmes de polyculture - élevage dans leurs transitions agroécologiques. 24èmes. Rencontres Recherches Ruminants (3R), Paris, France. pp.63. hal-02297505

Mischler, P., Martel, G., Tresh P., Chartier, N., 2020. L'association cultures et élevage : un moyen pour réduire l'usage des pesticides et une piste pour la reconception agroécologique de systèmes de productions agricoles. *Innovations agronomiques*, 80, 41-54. https://doi.org/10.15454/e9fz-fc55

Moraine, M., Duru, M., Therond, O., 2017. A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels. *Renew Agric Food Syst*. Volume 32, Issue 1,, pp. 43 - 56

DOI: https://doi.org/10.1017/S1742170515000526

Nunn L., Embree C. G., Hebb D., Bishop SD., Nichols D., 2007. Rotationally grazing hogs for orchard floor management in organic apple orchards. Acta Hort (ISHS) 737 : 71–78.

https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.737.9

Osaé a (Osez l'Agroécologie), 2023. Réintroduire le pâturage dans les cultures pérennes enherbées. https://osez-agroecologie.org/reintroduire-le-paturage-dans-les-cultures-perennes-enherbees

Osaé b (Osez l'Agroécologie), 2023. Mettre en place un pré-verger. https://osez-agroecologie.org/mettre-en-place-un-pre-verger

Paut R., Dufils A., Derbez F., Dossin A.-L., Penvern S., 2021. Orchard Grazing in France: Multiple Forms of Fruit Tree–Livestock Integration in Line with Farmers' Objectives and Constraints, 2021, *Forests* 12 (10), 1339, https://doi.org/10.3390/f12101339

Petit A., de Villaines F., Cresson C., 2017. Innover en viticulture : 15 « bionnes » idées pour se lancer. Rapport du projet CASDAR VITINNOBIO, ITAB Editions, 60 p. https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2018/12/vitinnobio_15fiches_ifv.pdf

Pleinchamp. 2017. Le pré-verger normand, entre tradition et modernité. Youtube, 3 min.

Popay I., Field R., 1996. Grazing Animals as Weed Control Agents. *Weed Technology* 10(1): 217-231.

https://doi.org/10.1017/S0890037X00045942

Pype S., Venineau-Delvalle C., 2017. Introduction d'un troupeau de brebis Shropshire dans les vergers basses tiges. SCEA du clos Bernard. Inosys réseaux d'élevage IDELE et APCA, 4p. https://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/5aa438f9-ca93-4171-982b-a8998ce54eb5

Rathore V. S., Tanwar S. P. S., Kumar P., Yadav O. P., 2019. Integrated farming system: Key to sustainability in arid and semi-arid regions. *Indian Journal of Agricultural sciences* 89(2): 181–192.

https://doi.org/10.56093/ijas.v89i2.86982

Réussir Vigne, 2023. Des cochons nains Kunekune désherbent la vigne. Youtube. 1 min.

Röhrig N., Hassler M., Roesler T., 2020. Capturing the value of ecosystem services from silvopastoral systems: perceptions from selected Italian farms. *Ecosyst. Serv*. 44, 101152.

https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101152

Ryschawy J., Joannon A., Gibon A., 2014. L'exploitation de polyculture-élevage : définitions et questions de recherche. Une revue. *Cahiers Agricultures*, 23(6), 346–356. DOI : 10.1684/agr.2014.0727

Sagot L., 2020a. Des brebis sous les châtaigniers. Brebis Link. https://dordogne.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/099_Inst-Dordogne/Documents/Pastoralisme/Fiche5_Brebis_Link_BrebisSsChataigniers_w.pdf

Sagot L., 2020b. Des brebis sous noyers. Brebis Link. https://www.inn-ovin.fr/wp-content/uploads/2021/02/Fiche3_Brebis_Link_BrebisSsNoyers.pdf

Sagot L., 2020c. Des brebis dans les vignes. Brebis Link. https://www.inn-ovin.fr/wp-content/uploads/2021/02/Fiche6_Brebis_Link_BrebisDsVignes.pdf

Shannon J. C., 2011. Sheeps in vineyards! Youtube, 14 min.

Schut A.G.T., Cooledge E.C, Moraine M., Van De Ven G.W.J., Jones D.L., Chadwick D.R., 2021. Reintegration of crop-livestock systems In Europe: an overview. *Front Agric Sci Eng,* 8:111–129. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020373

TV sur Erdre, 2017. Des moutons au services des vignerons. Youtube. 5 min.

Wilson LM., Hardesty LH., 2006. Chapter 11: targeted grazing with sheep and goats in orchard settings. *In*: Launchbaugh K *et al*. (Eds) Targeted grazing: a natural approach to vegetation management and landscape enhancement. American Sheep Industry Association, Centennial, pp 99–106. https://www.webpages.uidaho.edu/rx-grazing/Handbook/Chapter_11_Targeted_Grazing.pdf

Pour citer cet article : Gentiane Maillet, Arnaud Dufils, René Baumont, Sonia Ramonteu, Jean-Louis Peyraud, *et al*.. L'introduction d'animaux en vergers et en vignes : une solution agroécologique pour gérer les adventices ?. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.224-240. 10.17180/ciag-2025-vol101-art19

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

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

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

Capitaliser les pratiques d'agriculteurs innovants pour nourrir le conseil : exemple de l'abandon du glyphosate en grande culture

Mathilde DIONISI[1], Marie-Hélène JEUFFROY[1], Louise PERRISSEAU[1], Priscila Duarte MALANSKI[3], Jean-Marc MEYNARD[2]

[1] Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR Agronomie, 91120 Palaiseau, France

[2] Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR SADAPT, 91120 Palaiseau, France

[3] Université Clermont Auvergne, AgroParisTech, INRAE, VetAgro Sup, Territoires, Clermont-Ferrand, France

Correspondance : marie-helene.jeuffroy@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art20

Résumé

Cet article analyse les pratiques d'agriculteurs innovants pour gérer les adventices en grande culture, sans recours au glyphosate. À partir des pratiques décrites dans 36 récits d'agriculteurs enquêtés, 12 logiques d'action élémentaires ont été formalisées pour la gestion des adventices. Une classification des combinaisons de ces logiques élémentaires, identifiées chez les agriculteurs, a permis de déterminer 5 logiques d'action génériques de gestion des adventices sans glyphosate. Ces logiques d'action génériques sont discriminées selon des critères socio-économiques et techniques. Cette classification est proposée comme outil pour les conseillers agricoles, afin de guider les agriculteurs en transition vers des systèmes sans glyphosate, adaptés à leurs critères de satisfaction et aux spécificités de leur exploitation.

Mots-clés : gestion adventice, traque aux innovations, logique d'action, modélisation systémique, classification

Abstract: Capitalizing on the practices of innovative farmers to inform agricultural advisory services: an example of glyphosate abandonment in large-scale farming

This article analyzes the practices of innovative farmers for weed management in glyphosate-free large-scale farming. Based on practices described in 36 farmer narratives, 12 elementary action logics were identified for weed management. The analysis and classification of combinations of these elementary action logics enabled the identification of 5 generic action logics for glyphosate-free weed management. These generic action logics are differentiated based on socio-economic and technical criteria. This classification is proposed as a tool for agricultural advisors to guide farmers in transitioning to glyphosate-free systems that align with their satisfaction criteria and farm-specific characteristics.

Keywords: weed management, innovation tracking, action logic, systemic modeling, classification

1. Introduction

Les adventices figurent parmi les principaux défis rencontrés dans les systèmes de grande culture. En agriculture conventionnelle en France, leur contrôle repose le plus souvent sur l'utilisation d'herbicides chimiques, choisis pour leur grande efficacité, leurs coûts réduits et la rapidité de leur application. Cependant, les préoccupations croissantes concernant les impacts environnementaux des herbicides (contamination des eaux, réduction de la biodiversité, développement de populations d'adventices résistantes) et leurs effets sur la santé humaine (Baldi *et al.*, 2013 ; INSERM, 2021) incitent les gouvernements à mettre en place des politiques publiques visant à restreindre leur usage, en faveur de pratiques agroécologiques. Cette dynamique a notamment conduit à envisager l'interdiction du glyphosate, un herbicide clé dans la gestion des adventices en grande culture.

En France, cette réflexion s'est traduite par le lancement du Plan de sortie du glyphosate en 2018. La possibilité d'interdiction du glyphosate a cependant suscité des controverses, les nouvelles réglementations créant de l'incertitude (Guillot *et al*., 2010) chez des agriculteurs habitués à recourir à des intrants chimiques (Olry, 2013).

Pour soutenir ces agriculteurs dans une transition vers de nouveaux systèmes peu dépendants des pesticides, plusieurs initiatives ont vu le jour, comme le réseau des « fermes DEPHY », constitué de groupes d'exploitants agricoles engagés dans la réduction de l'usage des produits phytosanitaires, et dans la communication sur les innovations qui rendent celle-ci possible. Ces réseaux de fermes, soutenant des pratiques innovantes développées par des agriculteurs, et complémentaires de réseaux d'expérimentations, reposent sur les idées proposées par Akrich *et al*. (1988) et citée par Demeulenaere and Goldringer (2017) selon laquelle la résolution de problèmes concrets et l'incertitude scientifique nécessitent la mobilisation d'une pluralité d'acteurs concernés, chacun apportant une connaissance partielle (et partiale) de la complexité du monde. Cependant, les références issues de telles initiatives restent souvent marquées par les caractéristiques du territoire, et dépendent des motivations propres de chaque agriculteur. En conséquence, les pratiques innovantes issues de ces expériences de terrain sont rarement directement extrapolables à d'autres agriculteurs. Comment alors structurer et analyser les pratiques des agriculteurs innovants, pour inspirer et orienter la gestion agroécologique des adventices des grandes cultures ?

En s'appuyant sur une démarche d'analyse des pratiques d'agriculteurs innovants, cet article propose de détailler les étapes de conception d'une classification de stratégies agroécologiques de gestion des adventices. Cette classification vise à orienter les conseillers vers des pratiques de gestion des adventices sans glyphosate, adaptées aux caractéristiques d'une diversité d'exploitations agricoles.

2. Matériel et méthodes

Nous avons appliqué la méthode de traque aux innovations (Salembier *et al*., 2016, 2021) à la problématique de l'abandon du glyphosate en grande culture. Cette méthode permet de repérer des innovations, qu'elles soient techniques, organisationnelles ou autres, apportant une réponse à une problématique spécifique, et à produire des connaissances sur ces innovations, en vue de préparer leur diffusion dans un cercle plus large. Nous avons adapté les 5 étapes, décrites par Salembier *et al*. (2021), à notre question (Tableau 1) :

Tableau 2. Approche choisie dans le projet de recherche en fonction des étapes de traque aux innovations décrites dans Salembier *et al* (2021). Les logiques d'action des agriculteurs correspondent aux relations systémiques établies par chaque agriculteur entre ses pratiques, ses intentions et projets, son environnement de travail, les effets observés des pratiques, l'évaluation de ces pratiques et leur trajectoire personnelle. Les logiques d'action élémentaires correspondent à des combinaisons de pratiques répondant à un même objectif, pouvant aider un agriculteur à réfléchir à la mise en place d'une pratique particulière dans sa propre situation.

Étape de la traque	Approche choisie pour ce projet de recherche
1- Définir un projet de traque	Étude de la gestion des adventices chez des agriculteurs en **grande culture,** avec ou sans **élevage**, ayant **abandonné** ou fortement **réduit** l'usage du **glyphosate** **Profil recherché** : agriculteur qui utilisait du glyphosate et a modifié un ou plusieurs systèmes de culture pour fortement réduire, ou abandonner, son usage
2- Identifier des agriculteurs innovants	Recherche de groupes d'intérêt sur le site **Collectifs Agroécologiques** et entretiens avec les **animateurs** des groupes repérés pour identifier les agriculteurs pertinents pour le projet Recherche d'agriculteurs pertinents sur les **réseaux sociaux** (Linkedin,

	youtube) Demande de contacts de proche en proche à la fin des entretiens
3- Prendre connaissances des pratiques innovantes	Entretiens **semi-directifs** individuels auprès d'agriculteurs, combinés à une visite de leur ferme si possible. Informations à récolter sur un ou plusieurs **systèmes de culture** mis en place sur chaque exploitation enquêtée : les **pratiques de gestion des adventices**, leur efficacité, les **critères de satisfaction** de l'agriculteur pour l'évaluation de ces pratiques et les **raisons de leur mise en place**.
4- Conduire une analyse agronomique des pratiques	Construction d'un **récit** pour chaque entretien, mettant en lumière la **logique d'action de chaque agriculteur** sous-jacente à la construction du **système de culture innovant**. Construction de **logiques d'action élémentaires** en regroupant un ensemble de **pratiques** de gestion des adventices en fonction d'un **objectif commun** sur une **période du cycle cultural** donnée.
5- Générer des contenus agronomiques	**Modélisation** de chaque logique d'action d'agriculteur par une **combinaison de logiques d'action élémentaires** mobilisée par l'agriculteur pour la gestion des adventices. **Analyse statistique** sur l'ensemble des combinaisons de logiques d'action élémentaires pour identifier des **logiques d'action génériques** communes à plusieurs agriculteurs. Identification de **critères** économiques, sociologiques et techniques **déterminants** pour chaque groupe d'agriculteurs afin de caractériser chaque logique d'action générique en fonction des profils d'agriculteurs et d'exploitations

La collecte des données (**étapes 2 et 3**) s'est déroulée sur une période d'un an et demi, en 2023 et 2024. Les entretiens ont été menés sur l'ensemble du territoire métropolitain, chez des agriculteurs en grande culture, avec ou sans élevage. En tout, 36 agriculteurs ont été enquêtés, incluant 3 récits réalisés dans le cadre du proj*et al*AGE, concernant également la sortie du glyphosate (Tableau 2).

Tableau 3. Profils des fermes enquêtées. Les noms ont été anonymisés et remplacés par des identifiants numériques. SAU : Surface Agricole Utile ; SCOP : Surface en Céréales, Oléagineux et Protéagineux ; UTH : Unité de Travail Humain ; AB : Agriculture Biologique ; TCS : Techniques Culturales Simplifiées

Code Agri	Département	Type de production	Mode de production	SAU *ha total (ha SCOP)*	Main d'œuvre *ha SCOP/UTH*
1	Isère	Céréales	Conventionnel	130	130
2	Haute-Marne	Polyculture-élevage	AB	160 (150)	150
3	Landes	Céréales	Conventionnel	100 (70)	70
4	Savoie	Polyculture-élevage	AB	90 (12)	12
5	Alsace	Polyculture-élevage	AB, TCS / semis-direct	*na*	*na*
6	Pas-de-Calais	Polyculture-élevage	Conventionnel	116 (59)	20
7	Haute Savoie	Céréales	Conventionnel	49	49
8	Savoie	Polyculture-élevage	Conventionnel	203 (46)	23
9	Savoie	Polyculture-élevage	Conventionnel	170 (40)	20
10	Isère	Polyculture-élevage	Conventionnel	180 (80)	50
11	Morbihan	Polyculture-élevage	TCS	215	36
12	Isère	Polyculture-élevage	Conventionnel	105 (60)	20

13	Mayenne	Polyculture-élevage	Conventionnel	150 (100)	50
14	Nouvelle-Aquitaine	Polyculture-élevage	AB, TCS / semis-direct	150	75
15	Cher	Polyculture-élevage	Conventionnel	213 (100)	33
16	Haute-Saône	Polyculture-élevage	Conventionnel	245 (100)	80
17	Lot-et-Garonne	Céréales	Conventionnel	80	27
18	Eure	Céréales	Conventionnel	90	90
19	Haute-Marne	Céréales	AB, TCS / semis-direct	170	85
20	Vendée	Polyculture-élevage	Conventionnel	110 (15)	10
21	Alsace	Céréales	Conventionnel	45	22,5
22	Vendée	Polyculture-élevage	AB, TCS	80 (40)	20
23	Aveyron	Polyculture-élevage	TCS / semis-direct	*na*	*na*
24	Finistère	Polyculture-élevage	AB, TCS	90	90
25	Aude	Polyculture	AB	2	1
26	Deux Sèvres	Polyculture-élevage	Conventionnel	225 (145)	80
27	Yonne	Céréales	AB, TCS	325 (310)	155
28	Seine-Maritime	Polyculture-élevage	Conventionnel	105 (70)	35
29	Ille-et-Vilaine	Polyculture-élevage	AB	52	52
30	Alsace	Polyculture	AB	20	20
31	Meurthe-et-Moselle	Polyculture-élevage	Conventionnel	160 (90)	45
32	Vendée	Polyculture-élevage	AB, TCS	300 (200)	100
33	Meurthe-et-Moselle	Polyculture-élevage	Conventionnel	165 (110)	110
34	Loire-Atlantique	Polyculture-élevage	AB	160 (20)	20
35	Haute-Garonne	Polyculture-élevage	Conventionnel	220 (200)	50
36	Drôme	Céréales	Semis-direct	139	139

L'ensemble des 36 entretiens couvre une diversité de modes de production (agriculture conventionnelle ou biologique ; travail du sol incluant du labour plus ou moins fréquent, Techniques culturales Simplifiées, semis-direct). Les caractéristiques d'exploitation (taille d'exploitation, main d'œuvre) sont également très diverses (Tableau 2). Si les 36 agriculteurs enquêtés ont tous fortement réduit l'usage du glyphosate, seuls 25 d'entre eux ont complètement abandonné l'utilisation de cette matière active.

Ces 36 entretiens ont été structurés sous la forme de récits d'agriculteurs (**étape 4**), mettant ainsi en évidence 36 logiques d'action d'agriculteurs pour la gestion adventice. À partir de ces récits, des logiques d'action élémentaires ont été définies par expertise, en regroupant des pratiques de gestion des adventices rencontrées chez plusieurs agriculteurs, visant des objectifs proches, et concernant des périodes spécifiques du cycle cultural (**étape 5**).

Les logiques d'action des 25 agriculteurs ayant complètement abandonné le glyphosate (sur 36 fermes au total, les 11 autres fermes ayant réduit leur usage de glyphosate mais en utilisant toujours) ont été modélisées comme la combinaison de plusieurs logiques d'action élémentaires. Une classification hiérarchique sur composantes principales, basée sur une analyse factorielle préalable, a été réalisée sur ces 25 combinaisons de logiques d'action élémentaires. L'analyse factorielle de données mixtes et la classification hiérarchique sur composantes principales ont été réalisées avec le package 'FactoMinR' (Le *et al*., 2008) et 'factoextra' (Kassambara & Mundt, 2020) sur R (version 4.3.3 ; R Core Team, 2024).

Cette analyse a permis d'identifier des logiques d'action génériques pour la gestion adventice, avec le regroupement d'agriculteurs partageant des combinaisons de logiques d'action élémentaires proches. Ces groupes ont ensuite été caractérisés, par expertise, en fonction de critères économiques, sociologiques et techniques, identifiés comme déterminants pour chaque groupe. Cette analyse a

permis l'élaboration d'une classification des logiques d'action génériques pour la gestion des adventices sans glyphosate, adaptée à différents profils d'agriculteurs, et susceptible d'orienter le conseil.

3. Résultats

3.1. Identification de logiques d'action élémentaires

Chaque agriculteur enquêté a décrit un ensemble de pratiques, mis en œuvre sur son exploitation pour gérer les adventices sans glyphosate. En tout, 43 pratiques distinctes de gestion des adventices ont été identifiées dans l'ensemble des récits d'agriculteurs. La mise en œuvre de ces pratiques dépend de contraintes (e.g., type d'adventice visé, état pédologique des parcelles, conditions météorologiques) et des critères de satisfaction et attentes des agriculteurs vis-à-vis de la réussite des interventions (e.g., efficacité, prix de l'intervention, temps de travail nécessaire).

A partir de ces pratiques décrites sur l'ensemble des récits d'agriculteurs, 12 logiques d'action élémentaires ont été identifiées pour gérer les adventices sans glyphosate (Tableau 3).

Tableau 3 : Description des logiques d'action élémentaires identifiées pour la gestion adventice à partir de l'ensemble des récits d'agriculteurs.

Logique d'action élémentaire	Objectif de la LAE	Période du cycle	Pratiques concernées	Critères de satisfaction
LAE 1 : Adaptation de la séquence de cultures	Favoriser la mise en place de leviers de gestion efficaces pour des adventices spécifiques	Culture, interculture, prairie	Séquence culturale diversifiée Implantation de cultures allélopathiques ou nettoyantes Alternance de cultures d'hiver et de printemps Successions incluant peu de cultures favorisant l'espèce adventice visée	Absence d'adventices problématiques au semis de cultures/prairies sensibles à la compétition
LAE 2 : Travail du sol en interculture sans couvert	Obtenir une parcelle propre au semis de la culture	Interculture	Labour Travail du sol hors labour *(déchaumage, fissurateur)* Travail du sol réduit *(herse rotative, fraise rotative)*	Bonne conditions pédologiques (structure, humidité) pour la culture à venir Résidus non gênant pour le semis de la culture à venir Absence de bioagresseurs dû aux résidus de cultures *(limaces, maladies fongiques)* Intensité de travail du sol correspondant aux valeurs de l'agriculteur
LAE 3 : Implantation d'un couvert d'interculture	Mettre en place un couvert compétitif vis-à-vis des adventices pendant l'interculture	Interculture	Semis du couvert sur un sol sans adventice au plus proche de la moisson Outils de semis favorisant un bon contact sol-graine *(semoir à graines, rouleaux)* Sur-semis si développement	Développement du couvert plus rapide que le développement adventice Développement adventice limité dans le couvert Prix du couvert acceptable Autres services rendus

Logique d'action élémentaire	Objectif de la LAE	Période du cycle	Pratiques concernées	Critères de satisfaction
			insuffisant	*(fertilisation, pollinisation)*
LAE 4 : Destruction du couvert d'interculture	Détruire les adventices avec le couvert	Interculture	Densité de semis favorisant une bonne levée pour chaque espèce du couvert tout en limitant les coûts	Destruction facile du couvert (pas de lignification) Pas de grenaison du couvert Résidus du couvert non gênant pour le semis de la culture Pas d'adventices au moment du semis de la culture Travail du sol adapté aux valeurs de l'agriculteur
			Implantation d'espèces compétitives *(pousse rapide, allélopathiques)*	
			Implantation de mélanges d'espèces dans le couvert pour assurer une levée dans des conditions climatiques incertaines	
			Destruction précoce du couvert pour laisser du temps pour un travail du sol avant semis	
			Réduction de la biomasse aérienne si forte biomasse *(broyage, pâturage)*	
			Destruction de la biomasse aérienne réduite *(désherbeuse, gel)*	
			Travail du sol en complément de la destruction de la biomasse aérienne (*labour, déchaumage, fraise rotative)*	
			Dates de semis décalées en fonction des périodes d'émergence des adventices	
LAE 5 : Assurer une levée rapide de la culture	Favoriser le développement de la culture par rapport au développement des adventices	Culture	Couvert d'interculture gardé le plus longtemps possible pour limiter le développement des adventices en pré-semis sans travail du sol	Pas d'adventice au moment du semis de la culture Levée des cultures avant la levée des adventices Travail du sol adapté aux valeurs de l'agriculteur
			Préparation du lit de semence *(faux-semis)*	
			Enrobage de semences avec des biostimulants	
			Densité de semis élevée pour couvrir le sol rapidement	
			Plantation de plants préparés en pépinière	
LAE 6 : Couverture du sol en culture	Limiter le développement des adventices en limitant l'accès à	Culture	Paillage avec résidus de couverts *(strip-till, semis-direct sous couvert vivant)*	Peu de développement des adventices en culture Travail du sol réduit/pas de

Logique d'action élémentaire	Objectif de la LAE	Période du cycle	Pratiques concernées	Critères de satisfaction
	la lumière			travail du sol
			Association de cultures *(sur une culture, couvert permanent)*	Autres services rendus par le couvert associé à la culture principale *(biodiversité, fertilisation)*
			Utilisation de matières actives diversifiées	
			Couplage herbicide - désherbage mécanique	Destruction des adventices levées pendant la culture
			Fractionnement des traitements	
LAE 7 : Désherbage chimique en culture	Éliminer les adventices poussant après semis	Culture	Période d'intervention optimisée pour garantir une meilleure efficacité *(stade adventice, hygrométrie)*	Usage d'herbicides (et charges) réduit Pas d'apparition d'adventices résistantes
			Anticiper les interventions en fonction de la rotation pour limiter en amont le développement d'adventices pouvant devenir problématiques	
			Utilisation d'outils de désherbage mécanique *(binage, houe rotative, herse étrille)*	
LAE 8 : Désherbage mécanique en culture	Éliminer les adventices poussant après semis	Culture	Destruction de la biomasse adventice pour épuiser le stock semencier *(broyage, écimage)*	Destruction des adventices levées pendant la culture
			Optimiser la période d'intervention pour garantir une meilleure efficacité *(stade des adventices)*	
LAE 9 : Adaptation du couvert de prairie	Limiter le développement des adventices par l'implantation d'un couvert concurrent	Prairie	Implantation d'un couvert spécifique aux adventices problématiques *(ex : méteil)*	Pas de développement d'adventices problématiques
			Implantation d'une prairie multi-espèces pour couvrir rapidement le sol tout en laissant à des espèces longues à lever le temps de se développer	Services agronomiques multiples du couvert *(alimentation animale, fertilisation, biodiversité, structuration du sol)*
LAE 10 : Destruction du couvert de prairie par un travail du sol	Détruire les adventices avec la prairie	Prairie	Labour	Aucune adventice au moment du semis de la culture Travail du sol adapté aux valeurs de l'agriculteur
			Travail du sol hors labour *(déchaumage, fraise rotative)*	
			Date de destruction précoce pour laisser le temps de faire des faux-semis	
			Dernière date de destruction proche du semis pour limiter la levée d'adventices avant culture	

Logique d'action élémentaire	Objectif de la LAE	Période du cycle	Pratiques concernées	Critères de satisfaction
LAE 11 : Valorisation des couverts végétaux insatisfaisants	Détruire les couverts végétaux trop sales	Culture, interculture, prairie	Utilisation des couverts pour l'alimentation animale *(fourrage, ensilage, pâturage)*	Gain économique tiré de couverts infestés d'adventices, d'associations de cultures mal gérées ou de couverts d'interculture trop peu denses
			Limitation des conditions favorables au développement d'adventices ciblées *(raisonnement de la fertilisation, décompaction du sol)*	
LAE 12 : Gestion des flux adventices	Limiter la propagation et les conditions favorables aux adventices	Culture, interculture, prairie	Compostage du fumier pour ne pas importer d'adventices dans les parcelles	Pas de développement d'adventices problématiques sur le cycle de culture
			Gestion des abords des parcelles pour limiter la contamination depuis les bordures *(désherbage des accotements/talus, travail du sol plus intense en bord de parcelles)*	

3.2. Identification de groupes d'agriculteurs avec des logiques d'action génériques de gestion adventice similaires

Les logiques d'actions des 25 agriculteurs ayant complètement abandonné le glyphosate ont été modélisées comme la combinaison de plusieurs logiques d'action élémentaires. Une classification hiérarchique sur composantes principales a été appliquée sur ces 25 combinaisons de logiques d'action élémentaires, pour identifier les agriculteurs avec des combinaisons proches (Figure 1). La classification a ainsi permis d'identifier 5 logiques d'action génériques.

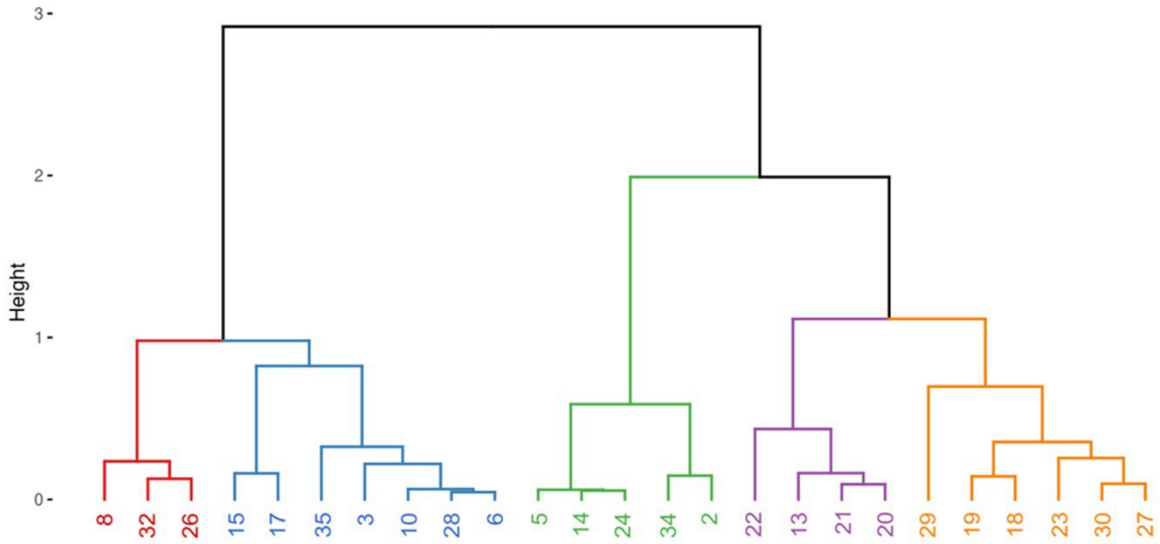


Figure 1 : Classification hiérarchique sur composantes principales des fermes, basée sur les combinaisons de logiques d'action élémentaires mobilisées sur chaque exploitation pour la gestion adventice. Chaque couleur représente un groupe statistique défini par la CHCP. Les fermes ont été anonymisées et caractérisées par des identifiants numériques (les mêmes que dans le tableau 2, voir plus haut).

Les groupes d'agriculteurs identifiés par la classification hiérarchique sur composantes principales se distinguent par des schémas spécifiques d'adoption et de non-adoption de logiques d'action élémentaires. L'analyse de ces combinaisons, en lien avec les objectifs et les critères de satisfaction propres à chaque agriculteur, permet de mieux définir les logiques d'action génériques de gestion des adventices (Tableau 3).

Tableau 3 : Logiques d'action génériques pour la gestion des adventices, définies pour chaque groupe d'agriculteurs issu de la classification hiérarchique sur composantes principales, en fonction des logiques d'actions élémentaires communes ou jamais observées dans le groupe.

Agriculteurs	Logique d'action générique pour la gestion des adventices	Logiques d'action élémentaires communes à chaque groupe	Logiques d'action élémentaires jamais observées dans chaque groupe
Groupe 1 : 15, 17, 35, 3, 10, 28, 6	Substitution simple du glyphosate par un travail du sol en interculture pour exploitations en conventionnel	LAE 2 : Travail du sol en interculture sans couvert	LAE 1 : Pas d'adaptation de la séquence culturale LAE 6 : Pas de couverture du sol en culture LAE 9 : Pas d'adaptation des couverts de prairie LAE 12 : Pas de gestion des flux d'adventices
Groupe 2 : 8, 32, 26	Gestion adaptative de la séquence culturale et du travail du sol, en fonction des adventices présentes	LAE 1 : Adaptation de la séquence culturale LAE 2 : Travail du sol en interculture sans couvert LAE 4 : Destruction du couvert d'interculture LAE 10 : Destruction de la prairie par un travail du sol LAE 11 : Valorisation des couverts végétaux insatisfaisants	LAE 6 : Pas de couverture du sol en culture LAE 12 : Pas de gestion des flux adventices
Groupe 3 : 22, 13, 21, 20	Reconception du système de culture pour limiter le recours au travail du sol et au désherbage chimique	LAE 3 : Implantation d'un couvert d'interculture LAE 4 : Destruction du couvert d'interculture LAE 5 : Assurer une levée rapide de la culture LAE 12 : Gestion des flux adventices	
Groupe 4 : 29, 19, 18, 23, 30, 27	Gestion des adventices par le couvert d'interculture, en l'absence de désherbage chimique et avec un travail du sol limité	LAE 3 : Implantation d'un couvert d'interculture	LAE 2 : Pas de travail du sol en interculture sans couvert LAE 7 : Pas de désherbage chimique LAE 9 : Pas d'adaptation du couvert de prairie LAE 10 : Pas de destruction de la prairie

Groupe 5 : 5, 14, 24, 34, 2	Reconception du système de culture vers l'AB grâce à l'élevage	LAE 1 : Adaptation de la séquence culturale LAE 3 : Implantation d'un couvert d'interculture LAE 9 : Adaptation du couvert de prairie LAE 10 : Destruction du couvert de prairie

La logique d'action générique du **premier groupe** repose sur une substitution simple du glyphosate, sans reconception du système de culture. Elle est utilisée par des agriculteurs ayant recours au labour, qui remplacent l'usage du glyphosate en interculture par un travail du sol, complété par une utilisation fréquente du désherbage chimique et/ou désherbage mécanique. Dans le cas des systèmes en polyculture-élevage, pour la destruction des prairies, l'application de glyphosate est remplacée par un labour.

La logique d'action générique du **deuxième groupe** est d'adapter la séquence culturale (par exemple intégration de couverts végétaux et/ou de cultures de printemps) et le travail du sol, en fonction des adventices présentes sur les parcelles. Les systèmes de culture et logiques d'action élémentaires mobilisées par ces agriculteurs sont flexibles et adaptables en fonction du salissement observé. Les agriculteurs de ce groupe passent donc beaucoup de temps dans les champs pour observer le salissement.

Les agriculteurs du **troisième groupe** ont reconçu leur système de culture pour limiter le travail du sol et le désherbage chimique. Cette reconception passe notamment par l'implantation de couverts d'interculture, détruits grâce à un travail du sol, par une bonne gestion de l'implantation des cultures pour favoriser une levée rapide, et une gestion des flux de semences d'adventices, pour limiter la contamination des parcelles. Au contraire des agriculteurs du deuxième groupe, qui adaptent en continu leur séquence culturale en fonction de leurs observations de salissement, les séquences de culture des agriculteurs de ce groupe sont assez rigides.

Les agriculteurs du **quatrième groupe** ont reconçu leurs systèmes pour se passer du glyphosate et du désherbage chimique, et du travail du sol chaque fois que possible. Ils s'appuient pour cela sur la compétitivité des cultures, des séquences culturales longues, et la systématisation des couverts d'interculture. Aucun agriculteur de ce groupe ne mobilise les logiques d'actions 'Travail du sol en interculture non couverte' et 'Gestion chimique'.

Le **cinquième groupe** est composé d'agriculteurs en polyculture-élevage bio, qui avaient auparavant pratiqué des systèmes conventionnels avec travail du sol réduit (TCS ou semis-direct) et se sont convertis en AB. Cette conversion a été rendue possible par la présence d'élevage, permettant un passage en prairie en cas de salissement important et une reprise plus ou moins importante du travail du sol, en particulier pour la destruction des prairies. Bien qu'ayant réintroduit un travail du sol plus ou moins profond, ces agriculteurs ont généralement conservé, de leur précédent système en semis direct ou TCS, une séquence culturale diversifiée (avec une médiane de 6,5 cultures dans les séquences culturales recensées), et continuent d'accorder une attention particulière à l'implantation des couverts d'interculture pour favoriser leur levée rapide.

3.3. Identification de critères déterminants pour le conseil

Les groupes identifiés par la classification hiérarchique sur composantes principales ont ensuite été caractérisés par expertise, en vue de mettre en lumière les liens entre logiques d'action génériques pour la gestion des adventices et éléments du fonctionnement des exploitations. Cette analyse a permis

de préciser les groupes de la classification en termes de critères techniques, économiques et sociologiques cohérents, permettant d'aboutir à un arbre décisionnel pour guider le choix de logique d'action générique en fonction du fonctionnement des exploitations (Figure 2).

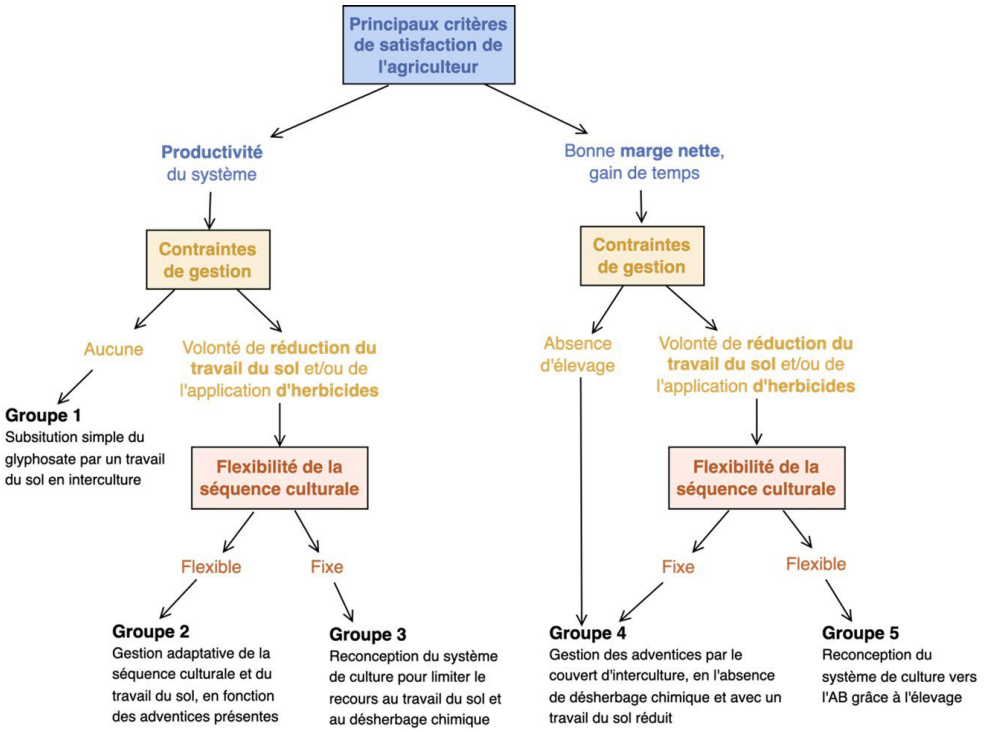


Figure 2 : Arbre décisionnel des logiques d'action génériques pour une gestion adventice sans glyphosate adaptée au fonctionnement des exploitations.

Les critères économiques qui discriminent les groupes reflètent les principaux critères de satisfaction des agriculteurs, ici à entendre comme l'objectif du système de culture. Ces critères concernent la productivité du système : certains agriculteurs privilégient une productivité élevée, même au prix d'un temps de travail accru et d'une augmentation des coûts, tandis que d'autres cherchent à réduire leur temps de travail grâce à une meilleure efficacité des interventions tout en tolérant un salissement plus important, tant que la marge nette reste satisfaisante. Ces premiers critères permettent ainsi de distinguer les logiques d'action génériques 1, 2 et 3, axées sur l'amélioration de la productivité à travers la gestion des adventices, des logiques d'action génériques 4 et 5, qui regroupent principalement des agriculteurs adoptant une gestion plus extensive**.** Ces derniers privilégient des pratiques orientées vers le gain de temps et raisonnent en termes de marge nette, en limitant le travail du sol, coûteux en temps comme en carburant. Les logiques d'action génériques sont également différenciées en fonction des contraintes de gestion (i.e., présence d'élevage sur ou à proximité de la ferme, limitation volontaire ou contrainte du travail du sol) ainsi que de la flexibilité de la séquence culturale (i.e., la capacité d'adapter le choix des cultures en fonction de l'évolution du salissement).

4. Discussion

Cette étude montre qu'il existe une grande diversité de pratiques, employées par des agriculteurs pour gérer les adventices en l'absence de glyphosate, avec plus de 43 pratiques listées. La grande diversité de ces pratiques s'explique par le fait que chaque agriculteur possède une perception différente du système agricole, s'appuie sur des valeurs qui lui sont propres pour prendre ses décisions techniques, et génère des pratiques et savoirs situés adaptés à leurs propres contextes (Gouttenoire *et al*., 2013; Chantre et Cardona, 2014; Compagnone *et al*., 2018). Cette singularité des savoirs et pratiques pose la question de leur circulation en dehors du contexte duquel ils ont émergé (Compagnone *et al*., 2018). L'étude de l'efficacité de ces pratiques de gestion des adventices dans divers contextes agricoles est

essentielle, car la perception du risque associé à leur mise en œuvre, ainsi que la sécurisation de cette transition, sont reconnues comme des facteurs clés influençant leur adoption (Ridier *et al*., 2013). Dans ce sens, préciser les conditions d'efficacité de ces pratiques pourrait être une priorité, en s'appuyant sur les expériences des agriculteurs.

Ces pratiques ne sont pas appliquées isolément, mais, comme le montre notre étude, combinées de diverses manières afin de répondre aux systèmes de valeurs, aux critères de satisfaction propres à chaque agriculteur, ainsi qu'aux contraintes spécifiques de chaque exploitation. Le raisonnement de mise en œuvre de ces pratiques s'inscrit ainsi dans une approche systémique plutôt qu'additive (Meynard *et al*., 2001), avec des effets directs, indirects, synergiques ou antagonistes des pratiques entre elles (Meynard, 2017). À cet égard, Jacquet *et al*. (2022) soulignent l'importance de privilégier une approche globale de gestion des adventices fondée sur la combinaison de leviers pour réussir la transition vers une agriculture sans pesticide.

Chaque transition et combinaison de pratiques est ainsi unique, s'inscrivant dans des dynamiques spécifiques à chaque individu et à chaque territoire. Comme le souligne Hazard (2018) à propos des transitions agroécologiques, il n'existe ainsi aucune solution universelle qui puisse faire consensus, que ce soit d'un point de vue scientifique, technique ou opérationnel, et qui soit donc directement transférable à d'autres agriculteurs. De fait, il peut être complexe pour les conseillers agricoles d'accompagner les agriculteurs dans leurs transitions, ces derniers quittant une situation jugée indésirable sans vision clairement définie de la situation alternative qu'ils construisent (Christiansen *et al*., 2022, Meynard *et al*., 2023).

Alors que le conseil agricole s'est longtemps centré sur la préconisation de pratiques normées, le concept d'accompagnement, tel que discuté par Cerf *et al*. (2010) ou Cardona *et al*. (2021), met en avant l'autonomie de l'agriculteur dans ses choix techniques et stratégiques au regard de contextes de production de plus en plus complexes. Nous mettons en évidence cinq logiques d'action génériques de gestion des adventices sans glyphosate, différant par les critères de satisfaction des agriculteurs et leurs contraintes techniques. Ces logiques d'action génériques, caractérisées par la combinaison de logiques d'action élémentaires communes aux agriculteurs du groupe, sont ainsi différenciées selon l'importance accordée par les agriculteurs à la maximisation des rendements, à la réduction du temps passé au champ ou à la limitation du travail du sol. Elles sont également définies par les caractéristiques des systèmes de production, telles que la présence d'élevage ou la flexibilité de la séquence culturale, cette dernière étant influencée par des facteurs comme les marchés, l'investissement matériel préalable et le temps accordé à l'observation des parcelles.

Cette classification peut servir de guide pour l'accompagnement, mais elle ne cherche pas à décrire en détail les pratiques à appliquer. Celles-ci doivent en effet être réfléchies et adaptées au contexte spécifique de chaque ferme (e.g., espèces à implanter dans un couvert d'interculture choisies en fonction des conditions pédo-climatiques, des services attendus, et du matériel de destruction disponible). Le rôle du conseiller utilisant cette classification se situe dans une approche de co-conception conseiller/agriculteur, plutôt que dans une relation « descendante » de conseil prescriptif.

Cette dynamique de conseil agroécologique, telle que définie par Olry (2013), conduit le binôme à s'interroger sur le système de culture, et à envisager son évolution, qu'elle soit radicale ou progressive, mais toujours dans une perspective à long terme et pour plusieurs parcelles. La classification présentée dans cette étude représente alors un outil utile pour orienter le savoir à mobiliser dans les projets singuliers de chaque agriculteur (Meynard *et al*., 2023).

Pour évaluer cette démarche d'accompagnement mobilisant la classification proposée, il serait intéressant de s'appuyer sur un test d'usage outillé, proposé par Cerf *et al* (2012), en observant et caractérisant les situations de travail des conseillers agricoles, et des agriculteurs susceptibles d'utiliser la classification (i.e., façon de représenter un problème, outils utilisés pour prendre des décisions dans ce contexte, et contraintes de l'activité dans laquelle les outils sont utilisés).

Au-delà de la question du glyphosate, cette étude a permis de consolider une démarche d'innovation basée directement sur l'analyse des pratiques des agriculteurs, alliant traque aux innovations et modélisation des logiques d'action des agriculteurs, pour offrir des éléments de conseil. La méthode de traque aux innovations a déjà démontré son utilité pour repérer des systèmes alternatifs conçus par les agriculteurs (Salembier *et al*., 2016), produire des connaissances opérationnelles et des ressources cognitives en vue de reconcevoir les systèmes de culture (Verret *et al*., 2020 ; Salembier *et al*, 2021), et identifier les trous de connaissances (Lamé *et al*., 2015 ; Salembier *et al*, 2021). La modélisation systémique, quant à elle, permet d'aider à la prise de décision en milieu complexe. La modélisation des logiques d'action des agriculteurs a permis de faciliter la projection des actions pour en simplifier l'analyse (Gendron et Richard, 2015). L'ampleur du sujet abordé (gestion des adventices sans glyphosate en grande culture sur l'ensemble de la séquence culturale, et sur l'ensemble de la France métropolitaine) et la diversité des pratiques qui en découlent ont nécessité l'élaboration de cette modélisation à partir de logiques d'action élémentaires. Cette méthode a ainsi permis d'identifier des systèmes alternatifs, et de produire des ressources opérationnelles et cognitives. Elle a également rendu possible la proposition d'une structuration cohérente des logiques d'action génériques de gestion des adventices. Elle offre ainsi une vision synthétique capable d'intégrer une grande diversité de pratiques. Ce cadre méthodologique générique pour appuyer le conseil, tout en préservant la diversité des pratiques et des critères de satisfaction propres à chaque agriculteur, pourrait être mobilisé sur de nombreuses autres thématiques liées à la transition agroécologique.

5. Conclusion

Face à la diversité de pratiques agricoles mises en œuvre pour se passer de glyphosate en grande culture, la combinaison d'une traque aux innovations et d'une modélisation des logiques d'action individuelle des agriculteurs a permis de mettre en évidence 5 logiques d'action génériques de lutte contre les adventices, sans glyphosate. Ces 5 logiques d'action génériques constituent potentiellement la base d'un accompagnement systémique pour favoriser le déploiement de l'abandon du glyphosate. Nous proposons qu'elles soient utilisées par des conseillers pour l'animation de groupes d'agriculteurs en transition vers des systèmes agroécologiques : sources pour le collectif de réflexion et de débat ; source pour chaque agriculteur du choix de la logique d'action générique la mieux adaptée à ses critères de satisfaction et aux spécificités de son exploitation. En combinant ainsi traque aux innovations, modélisation des logiques d'action d'agriculteurs, et classification de logiques d'action génériques techniques, notre travail ouvre des portes pour une meilleure valorisation de l'inventivité des agriculteurs dans l'accompagnement de l'évolution des exploitations et la recherche de solutions alternatives aux matières actives en instance de retrait.

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

Mathilde DIONISI : https://orcid.org/0009-0006-2862-4706

Marie-Hélène JEUFFROY : https://orcid.org/0000-0003-0520-9172

Priscila Duarte MALANSKI : https://orcid.org/0000-0002-4145-3431

Jean-Marc MEYNARD : https://orcid.org/0000-0002-4280-1768

Louise PERRISSEAU : https://orcid.org/0009-0000-7044-852X

Contributions des auteurs

Mathilde DIONISI : conceptualisation, gestion des données, analyse, rédaction ; Marie-Hélène JEUFFROY : conceptualisation, gestion de projet, supervision, rédaction ; Louise PERRISSEAU : gestion des données, analyse ; Priscila MALANSKI : gestion des données ; Jean-Marc MEYNARD : conceptualisation, supervision, rédaction

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Remerciements aux agriculteurs et agricultrices enquêté.e.s ; aux chercheurs et conseillers impliqués dans les projets Tagaïda *et al*iage ; au Ministère de l'Agriculture qui a financé, via le budget CASDAR de soutien dû à la sortie du glyphosate, les projets Tagaïda *et al*iage ; au réseau IDEAS INRAE-AgroParisTech, et en particulier C Salembier, pour les échanges méthodologiques.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet TaGaïDa (Trajectoires d'Abandon du Glyphosate par des Agriculteurs Innovants, pour leur Déploiement en Agriculture), financé par le MASA-DGER (programme CAS DAR 776).

Références bibliographiques

Akrich M., Callon,M., Latour B., 1988. A quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement; 2 : Le choix des porte-parole. Gérer et Comprendre. Annales des Mines, Les Annales des Mines 4–17 & 14–29.

Baldi I., Cordier, S., Coumoul X., Elbaz A., Gamet-Payrastre L., Lebailly P., Multigner L., Rahmani R., Spinosi J., 2013. Pesticides: Effets sur la santé, Editions EP Sciences. ed. Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM), Paris.

Cardona A., Cerf M., Barbier M., 2021. Mettre en œuvre l'action publique pour réduire l'usage des pesticides : reconnaître les activités d'intermédiation. Cahiers de l'Agriculture 30, 33.

Cerf M., Jeuffroy M.-H., Prost L., Meynard J.-M., 2012. Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. Agronomy for Sustainaible Development 32, 899–910.

Cerf M., Omon B., Chantre E., Guillot M., Le Bail M., Lamine C., Orly P., 2010. Vers des systèmes économes en intrants : quelles trajectoires et quel accompagnement pour les producteurs en grandes cultures. *Innovations agronomiques* 8, 105-119.

Chantre E., Cardona A., 2014. Trajectories of French Field Crop Farmers Moving Toward Sustainable Farming Practices: Change, Learning, and Links with the Advisory Services. Agroecology and Sustainable Food Systems 573–602.

Christiansen G., Thénard V., Hazard L., Simonneaux J., 2022. Accompagner une transition agroécologique dans un contexte complexe et incertain : utilisation de la diversité des raisonnements des acteurs de terrain. Pour 244, 145–153.

Compagnone C., Lamine C., Dupré L., 2018. La production et la circulation des connaissances en agriculture interrogées par l'agro-écologie. Revue d'anthropologie des connaissances 12.

Demeulenaere É., Goldringer I., 2017. Semences et transition agroécologique : initiatives paysannes et sélection participative comme innovations de rupture. Natures Sciences Sociétés. 25, S55–S59.

Ferdinand M.S., Baret P.V., 2024. A method to account for diversity of practices in Conservation Agriculture. Agronomy for Sustainable Development 44, 31.

Gendron S., Richard L., 2015. La modélisation systémique en analyse qualitative : un potentiel de pensée innovante. Recherches Qualitatives Hors-série, 78–97.

Gouttenoire L., Cournut S., Ingrand S., 2013. Farm-scale models built with farmers converting and converted to organic farming. Agronomy for Sustainable Development 33, 609–619.

Guillot M.-N., Cerf M., Olry P., 2010. L'activité de conseil en grandes cultures : d'une épreuve à une autre », Travail et apprentissages 6, 125-149.

Hazard L., 2018. Baser l'enquête sur l'expérience pour gérer les incertitudes d'une transition durable : le cas de la transition agroécologique, in: La démarche d'enquête. Éducagri éditions, 23–41.

Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (Ed.), 2021. Pesticides et effets sur la santé: nouvelles données, Éd. actualisée. ed, Expertise collective. EDP sciences, Les Ulis.

Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J., Le Cadre E., Litrico I., Malausa T., Reboud X., Huyghe C., 2022. Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. Agronomy for Sustainable Development 42, 8.

Kassambara A, Mundt F, 2020. _factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses_. R package version 1.0.7, https://CRAN.R-project.org/package=factoextra.

Lamé A., Jeuffroy M.-H., Pelzer E., Meynard J.-M., 2015. Les agriculteurs sources d'innovations: exemple des associations pluri-spécifiques dans le grand Ouest de la France. Agronomie, environnement et sociétés 5, 47–54.

Le S., Josse J., Husson F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, 25(1), 1-18. DOI: 10.18637/jss.v025.i01

Lucas V., Tourdonnet S.D., Barbier J.-M., Cittadini R., Gasselin P., 2018. Le glyphosate en agriculture de conservation : Un cas illustratif de la dépendance de l'agriculture française aux pesticides. Communication aux 12ème Journées de Recherches en Sciences Sociales, Nantes, 13-14 décembre 2018.

Meynard J.-M., Doré T., Habib R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France 87, 4, 223–236.

Meynard J.-M., 2017. L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation. Oilseeds and fats, Crops and Lipids 24, D303.

Meynard J.-M., Cerf M., Coquil X., Durant D., Le Bail M., Lefèvre A., Navarrete M., Pernel J., Périnelle A., Perrin B., Prost L., Reau R., Salembier C., Scopel E., Toffolini Q., Jeuffroy M.-H., 2023. Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition. European Journal of Agronomy 150, 126948.

Olry P., 2013. Un chantier de développement des compétences des conseillers agricoles dans l'accompagnement des transitions agroenvironnementales. Pour 219, 219–231.

Ridier A., Ben El Ghali,M., Nguyen G., Kephaliacos C., 2013. The role of risk aversion and labor constraints in the adoption of low input practices supported by the CAP green payments in cash crop farms. *Revue d'Études En Agriculture et Environnement* 94, 2, 195-219.

Salembier C., Elverdin J.H., Meynard J.-M., 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. Agronomy for Sustainable Development 36, 1.

Salembier C., Segrestin B., Weil B., Jeuffroy M.-H., Cadoux S., Cros C., Favrelière E., Fontaine L., Gimaret M., Noilhan C., Petit A., Petit M.-S., Porhiel J.-Y., Sicard H., Reau R., Ronceux A., Meynard J.-M., 2021. A theoretical framework for tracking farmers' innovations to support farming system design. Agronomy for Sustainable Development 41, 61.

Verret V., Pelzer E., Bedoussac L., Jeuffroy M.-H., 2020. Tracking on-farm innovative practices to support crop mixture design: The case of annual mixtures including a legume crop. European Journal of Agronomy 115, 126018.

Annexe 1 : Description des logiques d'action génériques identifiées pour la gestion adventice à partir de l'ensemble des récits d'agriculteurs.

Logique d'action élémentaire	Objectif de la LAE	Période du cycle	Pratiques concernées	Critères de satisfaction
LAE 1 : Adaptation de la séquence de cultures	Favoriser la mise en place de leviers de gestion efficaces pour des adventices spécifiques	Culture, interculture, prairie	Séquence culturale diversifiée	Absence d'adventices problématiques au semis de cultures/prairies sensibles à la compétition
			Implantation de cultures allélopathiques ou nettoyantes	
			Alternance de cultures d'hiver et de printemps	
			Successions incluant peu de cultures favorisant l'espèce adventice visée	
LAE 2 : Travail du sol en interculture sans couvert	Obtenir une parcelle propre au semis de la culture	Interculture	Labour	Bonne conditions pédologiques (structure, humidité) pour la culture à venir
			Travail du sol hors labour *(déchaumage, fissurateur)*	Résidus non gênant pour le semis de la culture à venir
			Travail du sol réduit *(herse rotative, fraise rotative)*	Absence de bioagresseurs dû aux résidus de cultures *(limaces, maladies fongiques)*
				Intensité de travail du sol correspondant aux valeurs de l'agriculteur
LAE 3 : Implantation d'un couvert d'interculture	Mettre en place un couvert compétitif vis-à-vis des adventices pendant l'interculture	Interculture	Semis du couvert sur un sol sans adventice au plus proche de la moisson	Développement du couvert plus rapide que le développement adventice
			Outils de semis favorisant un bon contact sol-graine *(semoir à graines, rouleaux)*	
			Sur-semis si développement insuffisant	
			Densité de semis favorisant une bonne levée pour chaque espèce du couvert tout en limitant les coûts	Développement adventice limité dans le couvert
				Prix du couvert acceptable
			Implantation d'espèces compétitives *(pousse rapide, allélopathiques)*	Autres services rendus *(fertilisation, pollinisation)*
			Implantation de mélanges d'espèces dans le couvert pour assurer une levée dans des conditions	

Logique d'action élémentaire	Objectif de la LAE	Période du cycle	Pratiques concernées	Critères de satisfaction
			climatiques incertaines	
LAE 4 : Destruction du couvert d'interculture	Détruire les adventices avec le couvert	Interculture	Destruction précoce du couvert pour laisser du temps pour un travail du sol avant semis	Destruction facile du couvert (pas de lignification) Pas de grenaison du couvert Résidus du couvert non gênant pour le semis de la culture Pas d'adventices au moment du semis de la culture Travail du sol adapté aux valeurs de l'agriculteur
			Réduction de la biomasse aérienne si forte biomasse *(broyage, pâturage)*	
			Destruction de la biomasse aérienne réduite *(désherbeuse, gel)*	
			Travail du sol en complément de la destruction de la biomasse aérienne (*labour, déchaumage, fraise rotative)*	
			Dates de semis décalées en fonction des périodes d'émergence des adventices	
LAE 5 : Assurer une levée rapide de la culture	Favoriser le développement de la culture par rapport au développement des adventices	Culture	Couvert d'interculture gardé le plus longtemps possible pour limiter le développement des adventices en pré-semis sans travail du sol	Pas d'adventice au moment du semis de la culture Levée des cultures avant la levée des adventices Travail du sol adapté aux valeurs de l'agriculteur
			Préparation du lit de semence *(faux-semis)*	
			Enrobage de semences avec des biostimulants	
			Densité de semis élevée pour couvrir le sol rapidement	
			Plantation de plants préparés en pépinière	
LAE 6 : Couverture du sol en culture	Limiter le développement des adventices en limitant l'accès à la lumière	Culture	Paillage avec résidus de couverts *(strip-till, semis-direct sous couvert vivant)*	Peu de développement des adventices en culture Travail du sol réduit/pas de travail du sol Autres services rendus par le couvert associé à la

Logique d'action élémentaire	Objectif de la LAE	Période du cycle	Pratiques concernées	Critères de satisfaction
			Association de cultures *(sur une culture, couvert permanent)*	culture principale *(biodiversité, fertilisation)*
			Utilisation de matières actives diversifiées	
			Couplage herbicide - désherbage mécanique	
			Fractionnement des traitements	Destruction des adventices levées pendant la culture
LAE 7 : Désherbage chimique en culture	Éliminer les adventices poussant après semis	Culture	Période d'intervention optimisée pour garantir une meilleure efficacité *(stade adventice, hygrométrie)*	Usage d'herbicides (et charges) réduit Pas d'apparition d'adventices résistantes
			Anticiper les interventions en fonction de la rotation pour limiter en amont le développement d'adventices pouvant devenir problématiques	
			Utilisation d'outils de désherbage mécanique *(binage, houe rotative, herse étrille)*	
LAE 8 : Désherbage mécanique en culture	Éliminer les adventices poussant après semis	Culture	Destruction de la biomasse adventice pour épuiser le stock semencier *(broyage, écimage)*	Destruction des adventices levées pendant la culture
			Optimiser la période d'intervention pour garantir une meilleure efficacité *(stade des adventices)*	
LAE 9 : Adaptation du couvert de prairie	Limiter le développement des adventices par l'implantation d'un couvert concurrent	Prairie	Implantation d'un couvert spécifique aux adventices problématiques *(ex : méteil)*	Pas de développement d'adventices problématiques
			Implantation d'une prairie multi-espèces pour couvrir rapidement le sol tout en laissant à des espèces longues à lever le temps de se développer	Services agronomiques multiples du couvert *(alimentation animale, fertilisation, biodiversité, structuration du sol)*
LAE 10 : Destruction du couvert de	Détruire les adventices avec la prairie	Prairie	Labour	Aucune adventice au moment du semis de la culture
			Travail du sol hors labour *(déchaumage, fraise*	

Logique d'action élémentaire	Objectif de la LAE	Période du cycle	Pratiques concernées	Critères de satisfaction
prairie par un travail du sol			*rotative)*	Travail du sol adapté aux valeurs de l'agriculteur
			Date de destruction précoce pour laisser le temps de faire des faux-semis	
			Dernière date de destruction proche du semis pour limiter la levée d'adventices avant culture	
LAE 11 : Valorisation des couverts végétaux insatisfaisants	Détruire les couverts végétaux trop sales	Culture, interculture, prairie	Utilisation des couverts pour l'alimentation animale *(fourrage, ensilage, pâturage)*	Gain économique tiré de couverts infestés d'adventices, d'associations de cultures mal gérées ou de couverts d'interculture trop peu denses
			Limitation des conditions favorables au développement d'adventices ciblées *(raisonnement de la fertilisation, décompaction du sol)*	
LAE 12 : Gestion des flux adventices	Limiter la propagation et les conditions favorisables aux adventices	Culture, interculture, prairie	Compostage du fumier pour ne pas importer d'adventices dans les parcelles	Pas de développement d'adventices problématiques sur le cycle de culture
			Gestion des abords des parcelles pour limiter la contamination depuis les bordures *(désherbage des accotements/talus, travail du sol plus intense en bord de parcelles)*	

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.