



**HAL**  
open science

## **OPTIFLORSYS : Un outil pour aider à la conception de stratégies agroécologiques de gestion d'adventices**

Thibault Maillot, Mathieu Chanis, Jean Villerd, Wilfried Queyrel, Laurène Perthame, Nicolas Cavan, Jean-Baptiste Vioix, Nathalie Colbach

### ► To cite this version:

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>. <hal-05029749>

**HAL Id: hal-05029749**

**<https://hal.inrae.fr/hal-05029749v1>**

Submitted on 10 Apr 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



## OPTIFLORSYS : Un outil pour aider à la conception de stratégies agroécologiques de gestion d'adventices

Thibault Maillot<sup>1</sup>, Mathieu Chanis<sup>1</sup>, Jean Villerd<sup>1</sup>, Wilfried Queyrel<sup>1</sup>, Laurène Perthame<sup>1</sup>,  
Nicolas Cavan<sup>1</sup>, Jean-Baptiste Vioix<sup>2</sup>, Nathalie Colbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon

<sup>2</sup> Univ. Bourgogne, Route des plaines de l'Yonne, Auxerre

**Correspondance** : Nathalie.Colbach@inrae.fr

### 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<sup>1</sup> 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

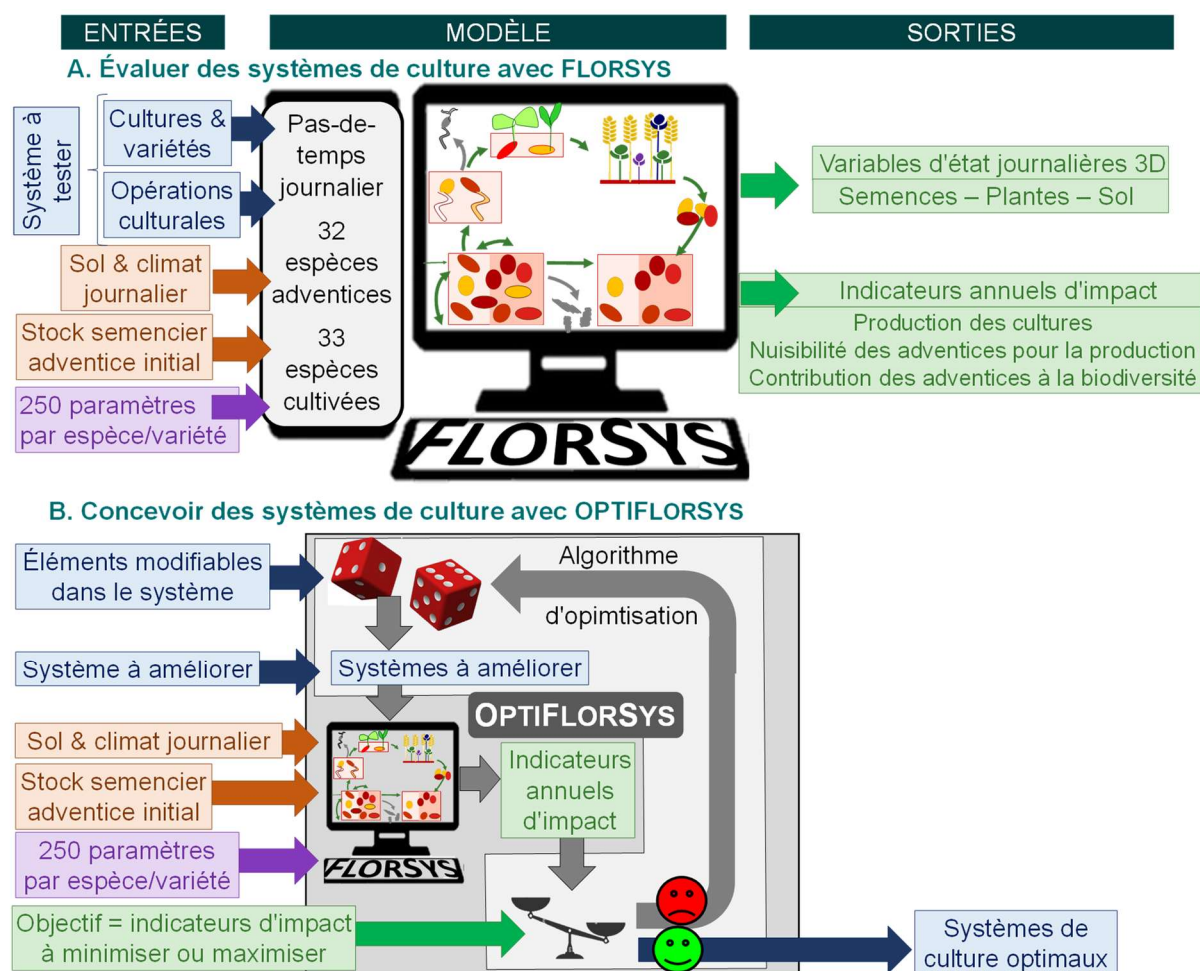
### 2.1 La « parcelle virtuelle » FLORSYS

#### 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 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.

---

<sup>1</sup> émulateur ou modèle d'un modèle permettant de prédire les sorties du modèle parent à partir des entrées du modèle parent



**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 détaillées 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'aide 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 2.2.3).
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.

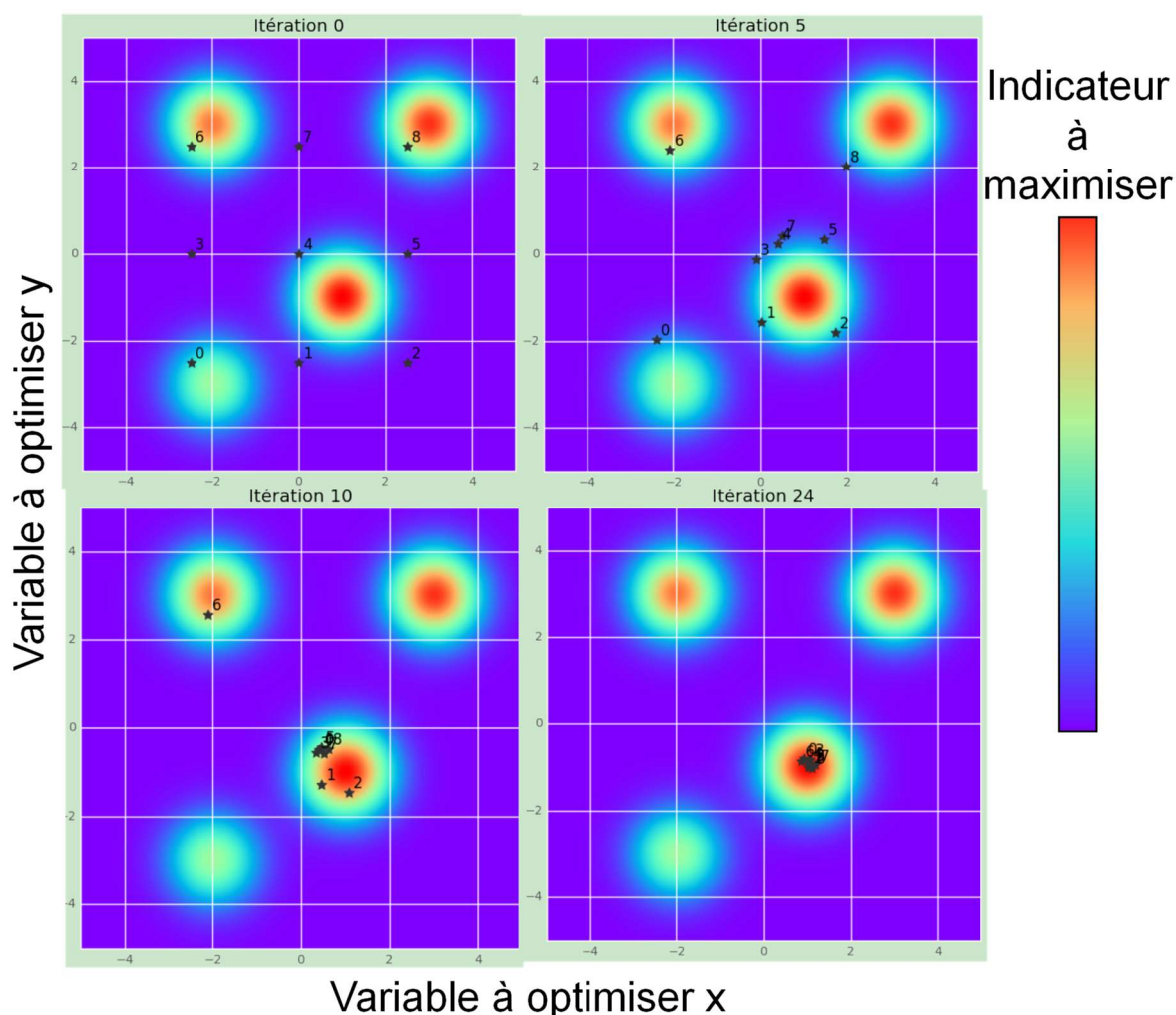
### **2.2.2 Évaluer la multiperformance**

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 utilisée 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 3).

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). Cet algorithme optimise les tirages aléatoires des variables ou paramètres dans l'étape 3 (section 2.2.1) 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).

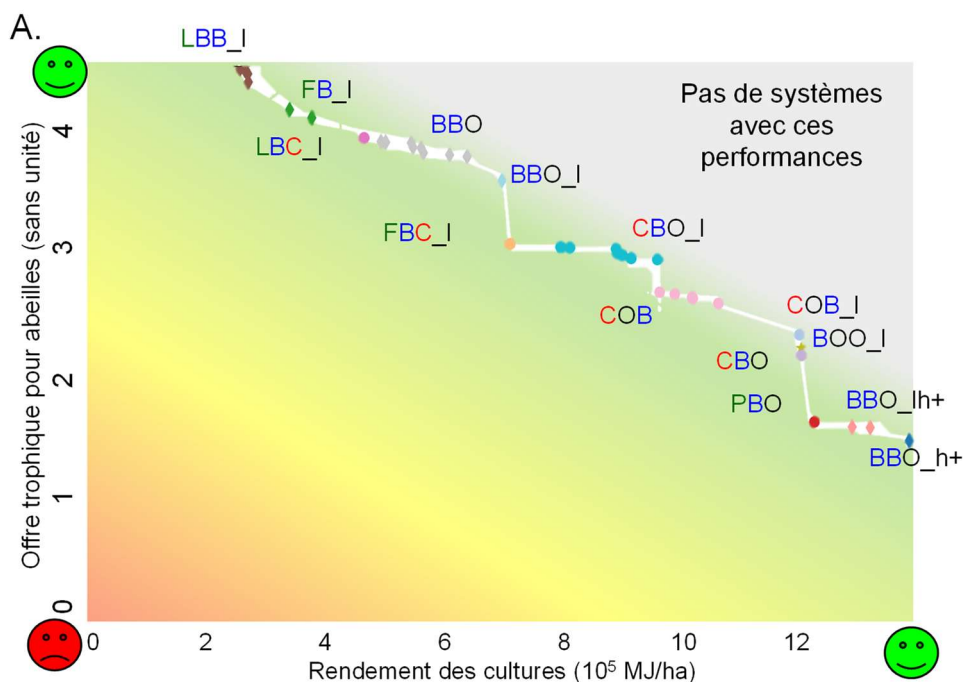


**Figure 2 :** Exemple de l'exploration de l'espace des possibles de deux variables quantitatives  $x$  et  $y$  à optimiser afin de maximiser un indicateur. Position des « lucioles » (★) à différentes itérations (de 0 à 24), montrant la migration des lucioles vers la valeur maximale de l'indicateur 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, à 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).





B.

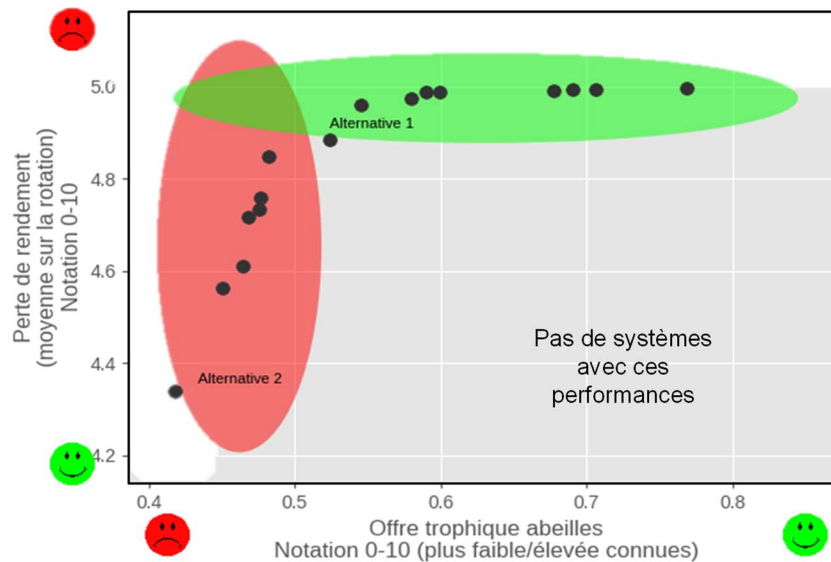
Système de culture	Rotation			Gestion d'interculture (sans couvert semé)					Herbicides en culture <sup>&amp;</sup>	Désherbage mécanique
	Espèces (nombre)	Légumineuses (%)	Céréales (%)	Broyage	Labour	Travail du sol superficiel <sup>§</sup>	Roulage	Glyphosate		
LBB_I	2	33	66	1 an/3	1 an/3	1/an	2 ans/3	Non	1.33/an	Non
FBB_I	2	33	66	1 an/3	1 an/3	1.33/an	2 ans/3	Non	1.33/an	3 ans/3
LBC_I	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_I	2	0	100	Non	1 an/3	4.33/an	Non	2 ans/3	2.66/an	2 ans/3
FBC_I	3	33	33	1 an/3	1 an/3	2.66/an	2 ans/3	Non	1.67/an	3 ans/3
CBO_I	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_I	3	0	66	Non	1 an/3	4.33/an	1 an/3	2 ans/3	2.33/an	2 ans/3
BBO_I	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_Ih+	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

<sup>§</sup> 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. <sup>&</sup> nombre d'opérations moyenné sur la rotation

**Figure 3 :** 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).

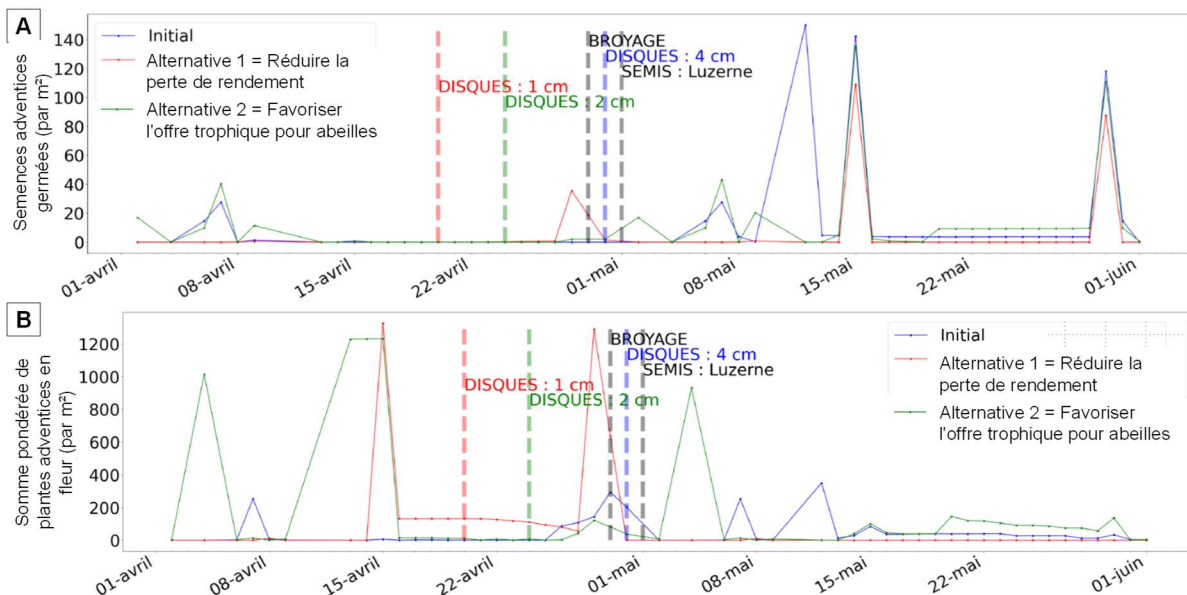




**Figure 5.** Front de Pareto (points noirs) identifiés par OPTIFLORSYS pour optimiser dates et profondeurs de travail du sol dans le système de la Figure 4, et agrégation des résultats issus de l'optimisation en deux alternatives. Les indicateurs d'évaluation ont été normés de 0 (la plus faible valeur 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

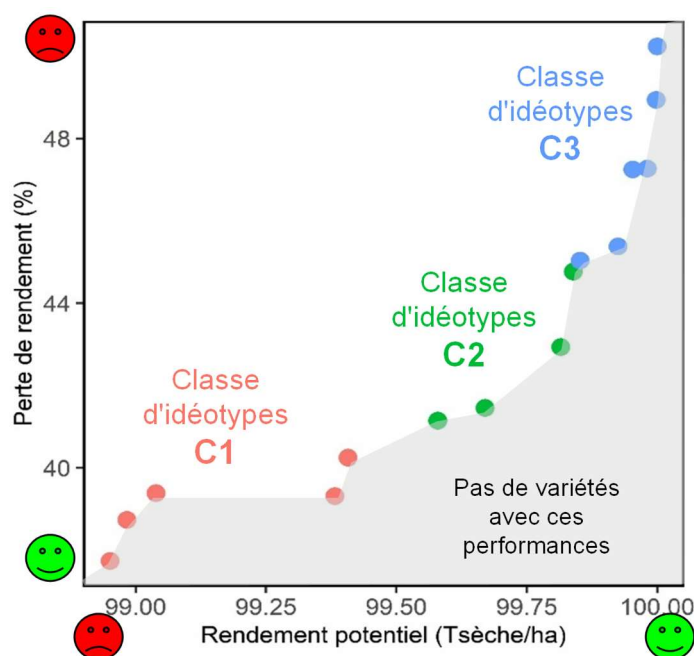
OPTIFLORSYS met à disposition des variables intermédiaires permettant de comprendre les résultats. Dans l'étude, les deux alternatives ont ainsi réduit et avancé (via le choix des dates et types d'intervention de travail du sol) les germinations adventices par rapport au semis de la luzerne suivante (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 6.** 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 4 :** 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 ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Capacité de prélèvement d'azote par les racines ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$ )
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 mûr (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).

### Ethique

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

### Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

### ORCID des auteurs

Thibault Maillot (0000-0002-9689-9860), Mathieu Chanis (0009-0001-4954-7336), Nicolas Cavan (), Laurène Perthame (0000-0002-6421-8055), Wilfried Queyrel (), Jean Villerd (0000-0001-7156-7512), Jean-Baptiste Vioix (0000-0002-0624-2399), Nathalie Colbach (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 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/](http://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'expérience de conception de systèmes de culture innovants économes en herbicides avec des agriculteurs : 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.



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

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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