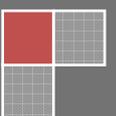


2022

UN OAD POUR LA GESTION AGROECOLOGIQUE DES ADVENTICES

Comment la recherche agronomique actuelle permet-elle de proposer une solution réaliste pour réduire l'usage des pesticides dans les cultures ?

Vulgarisation d'un article issu de la recherche agronomique par les élèves du Lycée Condorcet de Saint-Quentin.



SOMMAIRE

Article réécrit	p 3 à 11.
Résumé	p 3.
Gestion agroécologique de la flore adventice	p 4.
Comment allier implication des utilisateurs et méthodes statistiques complexes pour développer un outil d'aide à la décision	p 5.
Implication des utilisateurs dans le développement de l'outil	p 6.
Quels besoins des conseillers et agriculteurs ?	p 6.
Comment combiner pratiques agricoles et connaissances scientifiques	p 7.
Les différentes composantes de l'outil d'aide à la décision	p 7.
L'outil DECIFLORSYS pour jeter les grandes lignes d'un système de culture	p 7.
La parcelle virtuelle FLORSYS pour ajuster finement le système	p 9.
Exemple d'utilisation de l'outil d'aide à la décision avec des agriculteurs	p 10.
Bibliographie	p 11.
ANNEXE 1 Point de vue d'élèves ayant participé à la réécriture	p 12.
ANNEXE 2 Compte-rendu d'une visio-conférence élèves et chercheuse	p 13 à 14.
ANNEXE 3 Version raccourcie de l'article original publié dans Phytoma	p 15 à 22.

Comment conseillers et agriculteurs contribuent au développement d'un modèle d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventice ?

Floriane Colas¹, Wilfried Queyrel¹, Bastien Van Inghelandt¹, Jean Villerd^{1,2}, Mathilde Despierre-Thomas³, Noam Lebibat³, Corentin Lefèbvre³, Antoine Molinaro³, Kenneth Suindja-Kantou³, Younès Touahria³, Nathalie Colbach¹

¹Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

²LAE, INRA, Univ. Lorraine, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

³Lycée Général et Technologique Condorcet, F-02100 Saint-Quentin, France

RESUME

Contexte – Afin de réduire l'utilisation d'herbicides¹, les agriculteurs ont besoin d'outils pour concevoir des stratégies de gestion des adventices² qui utilisent moins de dés herbants chimiques. Dans ce but, un outil d'aide à la conception de systèmes de cultures réconciliant protection des cultures et des écosystèmes a été développé.

Etude – Tout d'abord, la structure de ce nouvel « Outil d'Aide à la Décision » (OAD) a été développée en interaction avec les futurs utilisateurs (conseillers et agriculteurs), par l'intermédiaire d'enquêtes et d'ateliers. Ensuite, le contenu biophysique³ d'un modèle de recherche a été utilisé. Ce modèle, FLORSYS, analyse et modélise les effets des techniques de culture sur les adventices et la production agricole pour simuler numériquement la croissance des adventices en fonction des systèmes de culture, de la météo et du type de sol. Il en déduit des indicateurs⁴ d'impact de l'ensemble des adventices sur la production agricole et sur les avantages que les adventices apportent à l'écosystème.

L'OAD résultant, DECIFLORSYS, est un outil informatique, qui est composé :

- de classements listant les techniques de culture qui ont le plus d'effets (ex : l'épandage de pesticides, le labour...)
- d'arbres de décision proposant des combinaisons de pratiques de cultures pour atteindre un objectif donné en termes d'impact de la flore adventice (ex. : rendre compatible les faibles pertes de rendement et le faible usage d'herbicides)
- d'un simulateur rapide permettant de tester sur ordinateur de nouveaux systèmes de culture en direct, notamment au cours d'un atelier impliquant des usagers dans la conception de systèmes de culture⁵.

Mots-Clés – Gestion agroécologique, adventice, OAD, perte de rendement, biodiversité

¹ Herbicide : produit chimique permettant l'éliminer les plantes indésirables

² Adventice : mauvaise herbe

³ Contenu biophysique : connaissances en biologie et physique

⁴ Indicateur : un indicateur permet d'évaluer une situation précise. L'indicateur est plus ou moins précis (note de 1 à 20 ; critère qualitatif ; valeurs précises).

⁵ Système de culture : ensemble de modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles travaillées de manière identique

Gestion agroécologique⁶ de la flore adventice⁷

Imaginer des stratégies de gestion de la flore adventice est essentiel afin de suivre les lois françaises et européennes. Cependant, l'emploi du désherbage chimique, la solution la plus efficace, rapide et facile d'usage à ce jour, est aussi la cause de certains problèmes sanitaires et environnementaux, comme une diminution de la qualité de la production alimentaire qui peut contenir des produits potentiellement toxiques. Les autres techniques de traitement sont moins efficaces ou plus difficiles à mettre en œuvre. Elles doivent être associées à des méthodes préventives⁸ qui limitent la multiplication des adventices, comme :

- la diversification de la rotation des cultures⁹
- le travail du sol pour vider le stock de graines d'adventices
- le retard de semis en automne qui permet de réaliser un travail superficiel du sol ou un faux-semis¹⁰ supplémentaire avant la culture d'hiver pour éviter le pic de germination des adventices - c'est-à-dire le moment où il y a le plus de germination-
- le choix d'espèces et variétés de culture compétitives pour occuper l'espace.

L'ensemble doit être raisonné sur le long terme. La gestion de la flore adventice est complexe parce que les adventices ont leur rôle à jouer dans l'agroécosystème, en rendant des services écosystémiques. En effet ces adventices servent de ressources alimentaires pour les abeilles présentes dans le champ et sont une composante de la biodiversité¹¹ végétale propre aux champs cultivés. Créer un système de culture respectant cet équilibre en augmentant les avantages liés aux adventices, tout en limitant leurs inconvénients est complexe, d'autant plus que le système de culture se réfléchit sur le long terme. C'est pourquoi nous avons besoin d'outils pour aider les acteurs - agriculteurs et conseillers agricoles -, confrontés directement à la création de systèmes de culture. Notre objectif était de co-développer, avec ces acteurs, un outil qui soit adapté à leurs besoins : un OAD¹² pour la gestion agroécologique des adventices.

Des OAD de ce type existent et répondent à des besoins spécifiques, par exemple : aider à reconnaître les espèces adventices, guider les traitements pour éliminer les « mauvaises herbes », guider la conception de nouveaux systèmes de culture économes en herbicides. Cependant, des experts ont identifié le besoin d'un outil à l'échelle système de culture et permettant de prendre des décisions stratégiques sur le long terme. Le projet CoSAC a donc comme buts :

- le développement d'un OAD prédisant les effets des pratiques agricoles et du pédoclimat¹³ sur la flore adventice
- l'utilisation de cet outil pour concevoir des stratégies de gestion durable des adventices.

⁶ Gestion agroécologique : gestion des cultures respectueuse de l'environnement

⁷ Flore adventice : ensemble des espèces d'adventices présentes dans le champ

⁸ Méthode préventive : méthode qui empêche le développement des adventices – comme par exemple le faux-semis

⁹ Rotation des cultures : alternance des cultures sur un terrain donné afin par exemple d'éviter le redéveloppement d'adventices qui ont déjà poussé l'année précédente et qui pourraient encore pousser l'année suivante ou éviter l'apparition d'adventices résistantes aux herbicides ou éviter la propagation de maladies

¹⁰ Faux-semis : action de travailler le sol mais sans mettre de semences, ce qui favorise la germination des adventices et vide le stock de graines

¹¹ Biodiversité : diversité des espèces présentes

¹² Outil d'Aide à la décision : ensemble d'instruments qui permettent de résoudre un problème en aidant l'utilisateur à faire des choix

¹³ Pédoclimat : ensemble des conditions de sol et de climat auquel est soumise une plante, connaissance essentielle pour déterminer par exemple si une culture se trouvera bien à un endroit particulier

Comment allier implication des utilisateurs et méthodes statistiques complexes pour développer un outil d'aide à la décision

Afin de concevoir un OAD permettant d'aider à la gestion agroécologique des adventices, nous avons besoin de :

- un outil qui raisonne et évalue la gestion de la culture sur le long terme, et combine les pratiques culturales - comme le désherbage manuel ou le désherbage chimique pendant la culture - pour contrôler les adventices
- un outil qui prenne en compte les techniques curatives alternatives¹⁴ et la prévention des adventices
- un outil qui donne en résultat :
 - ✓ des indicateurs proches des problèmes des agriculteurs liés aux adventices, comme les pertes de rendement
 - ✓ des indicateurs pour le compromis de gestion durable des systèmes de culture, comme le maintien de la diversité des adventices

Implication des utilisateurs dans le développement de l'outil

Pour cela, il est nécessaire d'avoir à la fois un outil qui représente la complexité des interactions entre le système de culture et les adventices mais aussi un outil qui soit utile et utilisé. C'est pourquoi la démarche adoptée ici fait intervenir les agriculteurs et les conseillers agricoles dès les premières étapes du développement tout en utilisant au mieux un modèle existant, en le rendant plus facile et plus rapide à utiliser (**figure 1**).

Les interventions avec ces personnes nous donnent le type, la structure et la forme de l'OAD à produire, tandis que la simplification du modèle nous fournit le contenu de l'OAD. C'est en avançant en parallèle avec les utilisateurs et avec la simplification du modèle qu'on peut arriver à l'OAD résultant du meilleur accord entre les demandes des utilisateurs et les possibilités du modèle.

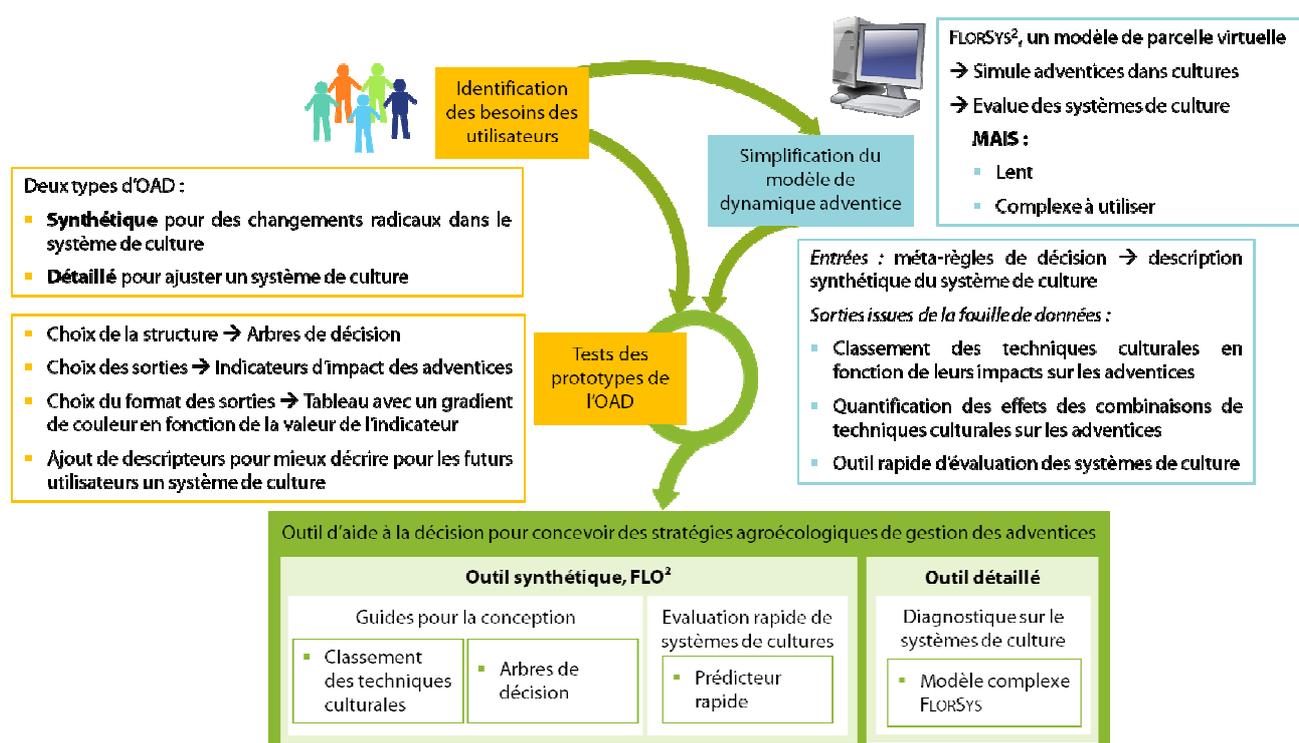


Figure 1 : Méthodologie et résultats de la conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion agroécologique des adventices.

¹⁴ **Technique curative alternative** : technique qui permet d'éliminer les adventices quand elles ont poussé sans utiliser les pesticides - comme par exemple le désherbage mécanique (désherbage utilisant des outils et non des produits chimiques)

Quels besoins des conseillers et agriculteurs ?

A l'aide d'un questionnaire en ligne, 40 conseillers agricoles et 6 agriculteurs ont été consultés pour définir quelle utilisation ils pourraient avoir d'un OAD au niveau de la gestion stratégique des adventices.

Deux types de besoins sont ressortis de l'enquête (**figure 1**) :

1. utilisation d'un OAD pour **gérer la composition d'un nouveau système de culture** : nécessité d'un outil qui décrit le système de culture à une échelle synthétique de type règle de décision simplifiée (ex : fréquence du travail du sol ou proportion de culture de printemps dans l'alternance des cultures) ;
2. utilisation d'un OAD pour **améliorer un système existant** en ajustant le système de culture : besoin d'un outil qui décrit de façon complète le système de culture, par l'intermédiaire d'une liste d'opération détaillée.

Les futurs utilisateurs consultés ont donné leur avis sur ce que devait estimer l'OAD, notamment sur les indicateurs qu'il est possible de calculer avec le modèle. Les conseillers agricoles et les agriculteurs sont principalement intéressés par les indicateurs qui évaluent les dommages causés par les adventices à la production agricole, en termes de quantité et qualité, aspect indispensable pour que leur système de production soit rentable (**figure 2**).

Cependant, ils sont nombreux à vouloir également inclure des impacts environnementaux - comme la participation des adventices à diminuer le lessivage de l'azote dans le sol - ou des impacts liés à la biodiversité - comme la présence de ressources alimentaires pour les abeilles ou pour les insectes qui mangent les graines des adventices - dans les critères d'évaluation des systèmes de culture.

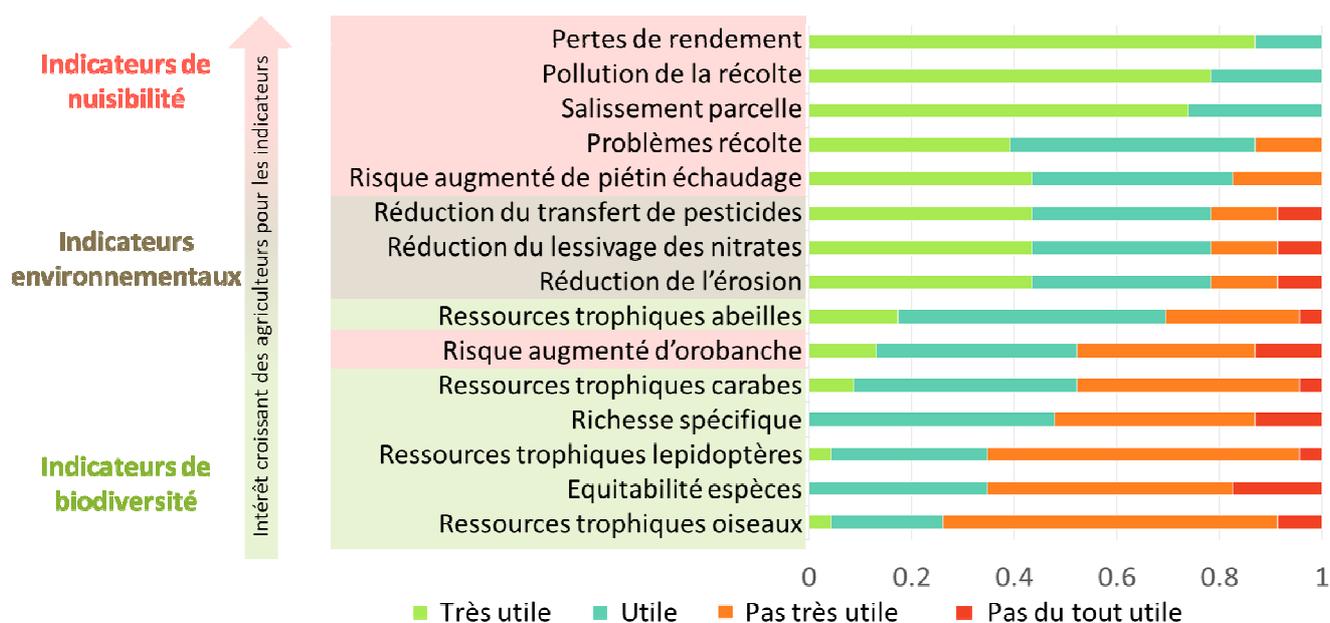


Figure 2 : Proportion des réponses d'un questionnaire en ligne évaluant l'utilité des indicateurs d'impact présents dans le modèle FLORSYS pour les conseillers agricoles.

Cette première interaction avec les utilisateurs démontre que nous disposons déjà d'un outil pour répondre au deuxième besoin, avec le modèle de recherche FLORSYS (voir présentation détaillée plus bas). Par contre, cette enquête démontrait aussi le besoin de développer un nouvel outil correspondant au premier besoin, que nous nommons DECIFLORSYS par la suite.

Comment combiner pratique agricole et connaissances scientifiques

Pour éviter de reprendre depuis le début la construction du nouvel outil DECIFLORSYS, nous avons décidé d'utiliser le logiciel FLORSYS comme réseau de champs virtuels¹⁵ afin de pouvoir reproduire de nombreux systèmes de culture, ce qui permet de modéliser plus simplement la relation entre le système de culture et les impacts des adventices. Les données utilisées proviennent de systèmes de culture existants : elles sont issues d'enquêtes en exploitation agricole, d'essais de systèmes de culture¹⁶ et d'experts.

Ces systèmes réels ont été complétés par des situations extrêmes, sans herbicides ou sans travail du sol, et par des systèmes de culture aléatoires pour découvrir des innovations inattendues.

Au total, 4102 systèmes ont été simulés sur 30 ans, afin d'identifier les effets à long terme. Les simulations ont été répétées avec 10 climats différents afin d'évaluer la résistance de ces systèmes face aux aléas climatiques¹⁷. Pour transformer ces données en OAD –DECIFLORSYS-, le modèle de recherche FLORSYS a été simplifié.

Les différentes composantes de l'outil d'aide à la décision

L'outil DECIFLORSYS pour jeter les grandes lignes d'un système de culture

Le nouvel OAD développé avec les conseillers et agriculteurs, DECIFLORSYS, est composé de trois parties :

- partie 1 : un classement des techniques culturales qui ont le plus d'effet sur la flore adventice, qui entraîne elle-même des conséquences sur la production agricole et la biodiversité. Ce classement permet d'aider l'utilisateur dans le choix des techniques qu'il peut modifier s'il veut améliorer ou concevoir un système de culture (**figure 3** : par exemple si on réduit le nombre d'opération destructives pendant le nourrissage des abeilles, on peut avoir un fort impact sur les adventices mais si on change le nombre de passage de rouleau cela n'aura pas un grand impact sur les adventices).

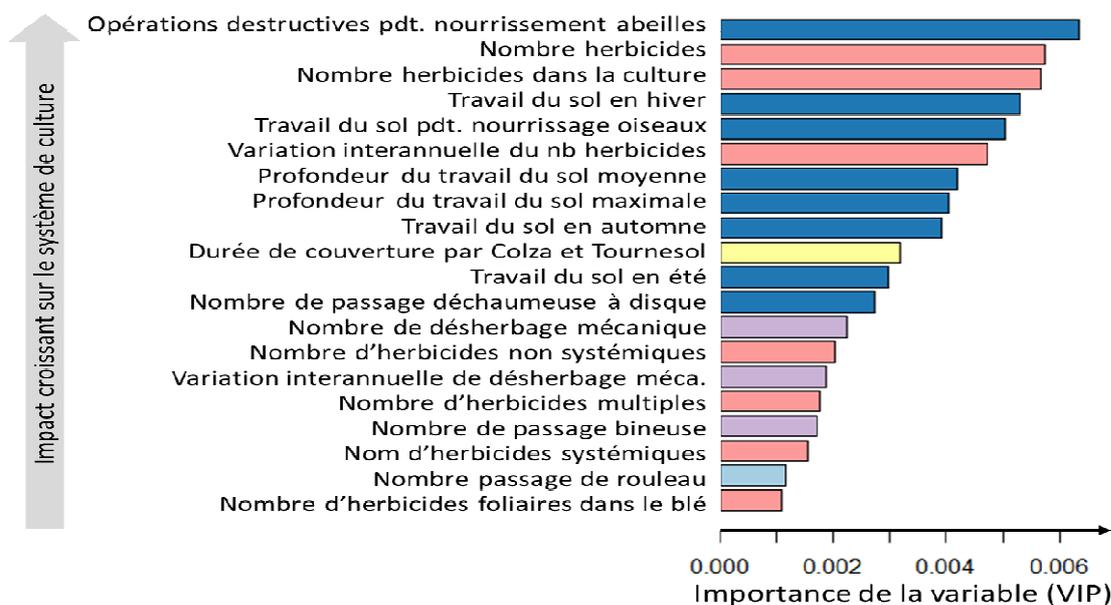


Figure 3 : Classement des 20 techniques culturales ayant le plus fort effet sur les impacts des adventices – les techniques culturales qui ont moins d'effet ne sont pas représentées-.

¹⁵ Champs virtuels : champs simulés par un logiciel

¹⁶ Essai de système de culture : test des systèmes de culture dans des champs réels découpés en parcelles (en institut de recherche ou chez des agriculteurs volontaires)

¹⁷ Aléa climatique : phénomène aléatoire lié au climat, comme les tempêtes, la sécheresse...

-partie 2 : un arbre de décision¹⁸ (figure 4). Chaque entrée correspond à une règle de décision simplifiée qui résume le type de système de culture (par exemple : la fréquence moyenne de travail du sol, la proportion de cultures de printemps utilisées, etc...). Les sorties de l'arbre sont les indicateurs d'impact de la flore adventice, dont la plupart a été développée avec des agriculteurs.

L'arbre peut se lire de haut en bas (« que se passe-t-il si... ») : en renseignant les différentes entrées (par exemple, sur la figure 4, série de décisions en trait noir plein : moins de 67% de cultures de printemps dans la rotation, puis nombre de fauche supérieur à 0,1 par an, puis nombre de jours entre la récolte et le premier travail du sol supérieur à 71 jours, et enfin fréquence d'utilisation de la luzerne supérieure ou égale à 0,2 par an), on obtient en quelques secondes une estimation des impacts des adventices sur la production agricole et la biodiversité (si l'on suit le même exemple : mauvais résultats pour le rendement, le salissement de la parcelle et la pollution des récoltes par les adventices, mais bons résultats pour la biodiversité). Si le résultat n'est pas satisfaisant, l'utilisateur modifie les valeurs des entrées pour relancer le calcul.

L'arbre peut également se lire de bas en haut (« que faut-il faire pour ... ») : toujours avec le même exemple, en traits noirs pointillés : pour améliorer les indicateurs concernant la récolte et l'utilisation des herbicides et conserver des indicateurs corrects de biodiversité, on peut choisir d'augmenter le nombre de jours entre la récolte et le premier travail du sol (supérieur à 71 jours) ainsi que d'augmenter la profondeur moyenne de travail du sol (supérieure à 4 cm).

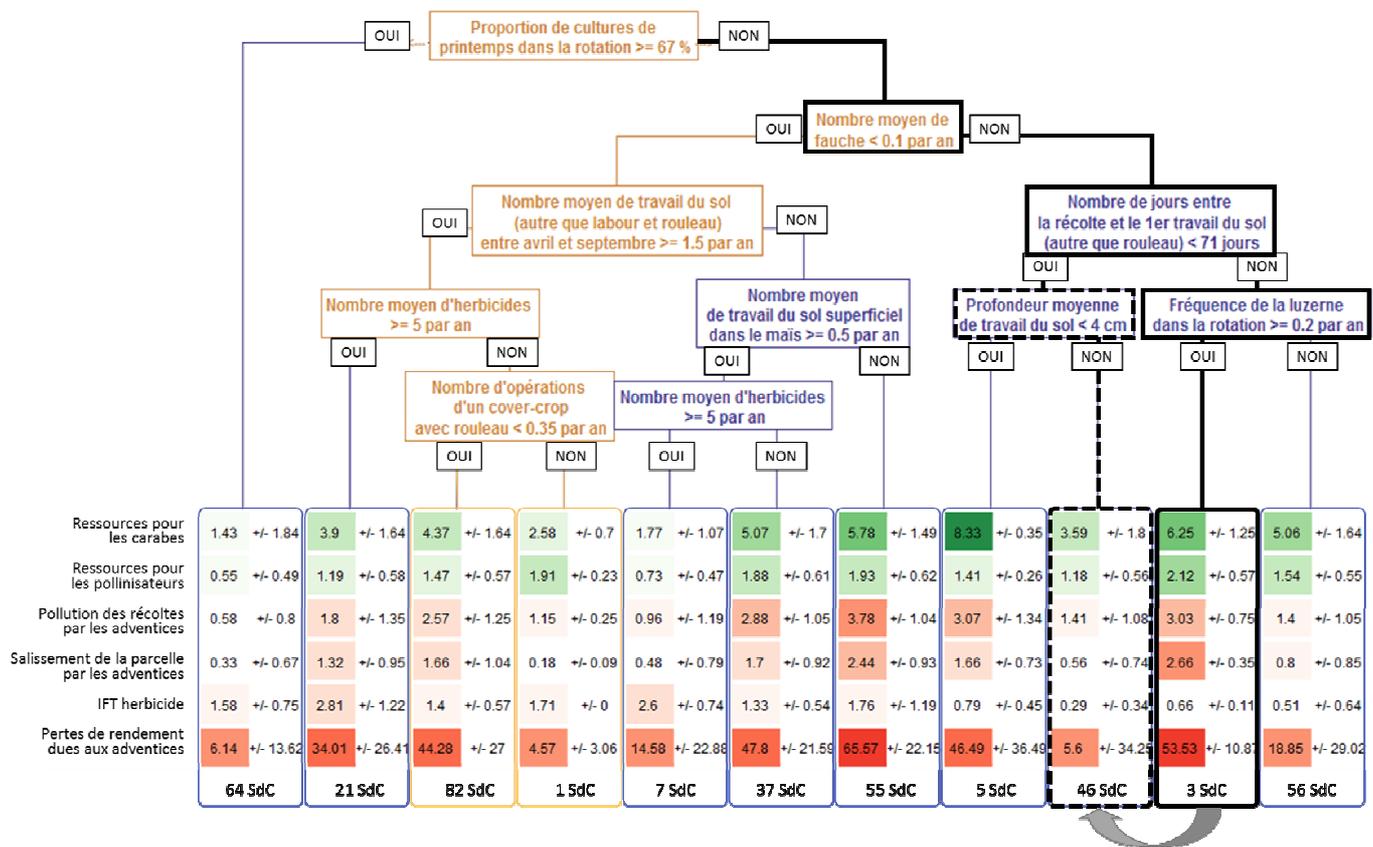


Figure 4 : Arbre de décision réalisé sur des systèmes de culture situés dans la région de la champagne humide et correspondant à la situation de production des agriculteurs du groupe de test de l'OAD.

Les « feuilles » en bas de l'arbre (cadres) comportent les indicateurs d'impact des adventices sur la biodiversité, la nuisibilité des adventices pour la production agricole et l'usage d'herbicides.

Les « branches » constituent des combinaisons de pratiques culturales.

En orange, le chemin correspondant au système de culture actuel d'un agriculteur du groupe. Les indicateurs-cibles représentés ont été choisis par la conseillère du groupe d'agriculteurs.

¹⁸ Arbre de décision : arbre constitué de propositions à partir desquelles on peut choisir parmi plusieurs décisions, représentées par des branches. Lorsque plusieurs arbres se succèdent, les feuilles positionnées à l'extrémité des dernières branches indiquent le résultat obtenu à la suite de l'ensemble des décisions prises.

- partie 3 : un calculateur qui prédit en quelques secondes les valeurs des indicateurs d'impact de la flore adventice sur le système à partir des entrées renseignées dans l'arbre de décision. Ce calculateur permet de trouver rapidement les modifications à apporter aux systèmes de culture pour faire bouger les impacts des adventices dans le sens qui nous convient.

La parcelle virtuelle FLORSYS pour ajuster finement le système

FLORSYS est une « parcelle virtuelle », où sont simulés les impacts du système de culture sur la croissance des mauvaises herbes à l'échelle de la parcelle, en fonction de l'humidité, de la température du sol et d'autres paramètres.

Les entrées du modèle sont les opérations culturales et les variables environnementales renseignées par l'utilisateur. Elles influencent le cycle de vie des adventices et des plantes cultivées. La croissance et la dynamique de ces plantes sont simulées en 3D et avec un pas de temps quotidien.

Cette approche produit des sorties très détaillées qui décrivent le couvert cultivé¹⁹ et la flore adventice (par exemple, la densité des semences capables de donner une plante, la densité des graines dormantes et germées, la densité, la position, la biomasse et la croissance des plantes, ainsi que la production de graines). Ces informations permettent de comprendre l'effet et la performance de chaque technique et système de culture utilisés dans le champ. Pour faciliter la comparaison des systèmes de culture testés, ces données sont synthétisées sous forme d'indicateurs d'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement physique (**figure 5**).

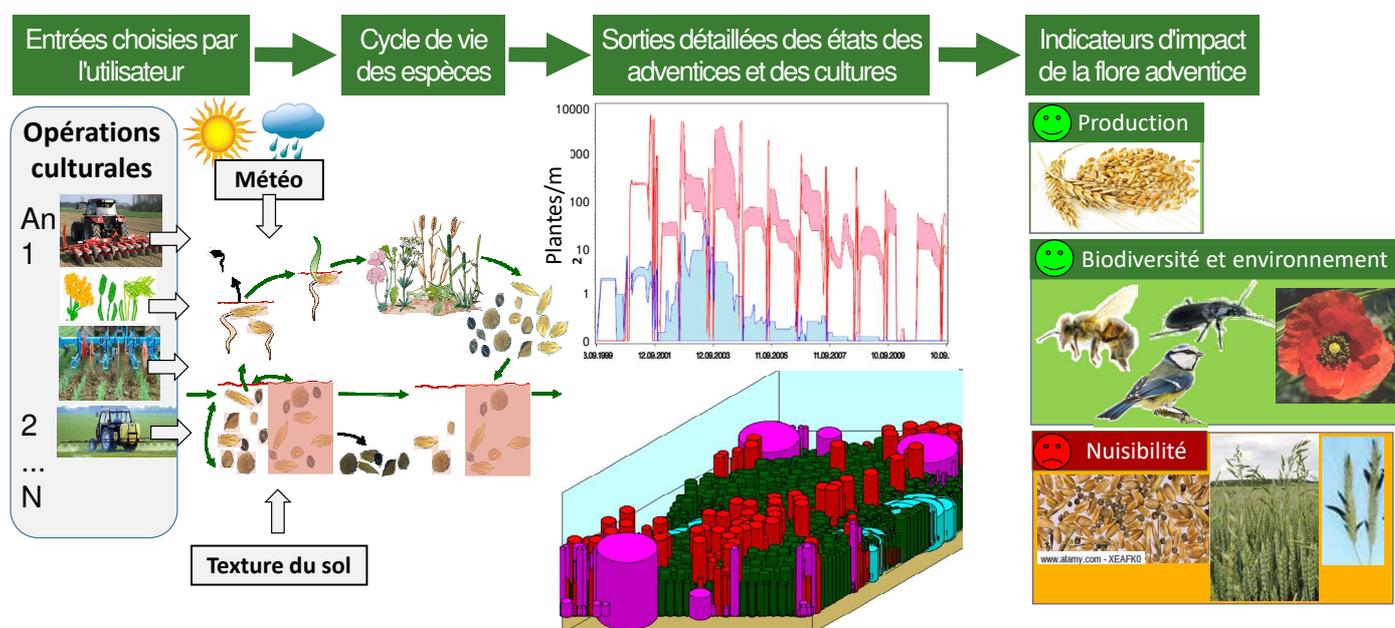


Figure 5 : Présentation schématique du fonctionnement du modèle de recherche FLORSYS.

L'évaluation du modèle FLORSYS avec des données indépendantes provenant d'observations sur le terrain dans différentes régions de France a montré que le rendement des cultures, la densité journalière d'adventices et les densités moyennées sur les années de simulations sont classés correctement par le modèle. On peut donc comparer les systèmes de culture entre eux, car l'erreur de prédiction est acceptable.

FLORSYS, par sa capacité à tester en virtuel de nombreux systèmes de culture très détaillés et à les évaluer par de nombreux indicateurs permet de faire une analyse détaillée du système de culture testé. Par exemple, les résultats de FLORSYS permettent de rechercher précisément les pratiques qui n'ont pas été suffisamment efficaces pour gérer les adventices à différentes étapes de la rotation. Cette complexité rend cependant l'utilisation de FLORSYS très lente. L'analyse d'un système de culture sur 30 ans et avec 10 répétitions climatiques peut demander jusqu'à 2 jours. C'est pourquoi on ne compare souvent qu'un petit nombre de systèmes de culture précis.

¹⁹ Couvert cultivé : plantes cultivées semées par l'agriculteur et présentes dans le champ

Exemple d'utilisation de l'outil d'aide à la décision avec des agriculteurs

Dans le cadre d'un atelier de co-conception de systèmes de culture (conception incluant agriculteurs, conseillers agricole et chercheurs), économes en désherbants et produisant malgré tout une récolte importante, ces deux outils, DECIFLORSYS et FLORSYS, ont été utilisés pour évaluer les propositions de système de culture conçus par des agriculteurs du GDA (Groupement de Développement Agricole) de Brienne. Lors de cet atelier les agriculteurs ont conçu des systèmes de culture. DECIFLORSYS est intervenu ensuite pour évaluer en direct les systèmes de cultures afin d'informer les agriculteurs de l'efficacité des différents systèmes de culture testés, grâce à son calculateur rapide.

Le **tableau 1** synthétise les performances du système de référence et celles de plusieurs prototypes, estimées par ce calculateur. Les options testées dans le prototype B montrent bien que l'évaluation en direct a donné des pistes de réflexion sur les options choisies par les agriculteurs pour gérer les adventices, les encourageant à mobiliser d'autres moyens de gestion et ainsi relancer une boucle de conception. Par exemple, DECIFLORSYS permet de voir que combiner l'utilisation d'herbicides et le désherbage mécanique ne permet pas de réduire encore la perte de rendement comparé au désherbage mécanique seul ou à l'utilisation d'herbicide seul, mais qu'au contraire, elle réduit la biodiversité liée à la flore adventice.

Système de culture (cultures de printemps en italique, couverts soulignés)	Offre trophique pour		Nuisibilité pour la production agricole		
	Carabes	Abeilles	Perte de rendement	Pollution récolte	Salissement de la parcelle
Référence (colza/blé/blé/orge)	4.65	1.59	45.8	2.82	1.51
Protype A [§]	4.60	1.59	31.8	2.37	1.02
Protype B [§] avec herbicides	5.11	1.66	25.5	2.09	0.87
B avec désherbage mécanique	5.01	1.67	24.2	2.11	0.99
B avec herbicides + désh. méca.	4.82	1.60	23.7	2.03	0.84
B-lentille + désh. mécanique	5.07	1.74	40.6	2.68	1.28

Meilleur résultat
(Forte biodiversité,
faible nuisibilité)

Pire résultat
(faible biodiversité,
forte nuisibilité)

[§]Colza+légumineuses/blé/couvert gélif puis *orge*/colza+pois/trèfle puis *tournesol* ou *betterave*/blé/orge

[§]Colza/blé/couvert gélif puis *orge*/couvert gélif puis *orge*/luzerne (2 ans)/blé/couvert gélif puis *chanvre*

Tableau 1 : Évaluation de l'impact de la flore adventice sur la biodiversité et la production agricole de systèmes de culture conçus par des agriculteurs en atelier, en utilisant le prédicteur rapide de DECIFLORSYS.

Ces ateliers ont aussi démontré que, malgré une interface un peu complexe qui reste à améliorer, DECIFLORSYS est déjà un outil capable d'appuyer la conception de nouveaux systèmes de culture. DECIFLORSYS et FLORSYS sont complémentaires. En effet, DECIFLORSYS peut s'utiliser à chaud pendant un atelier, en évaluant des propositions de système de culture pour avoir une vision globale de leurs performances, tandis que FLORSYS s'utilise plus à froid, entre deux ateliers, pour faire du diagnostic - avoir une évaluation plus précise du système de culture-.

Bibliographie

Colas, F., 2016. Which decision-support systems for sustainable weed management : why, how and when to use it ?, 7. International Weed Science Congress: Prague.

Colbach, N., Bockstaller, C., Colas, F., Gibot-Leclerc, S., Moreau, D., Pointurier, O., Villerd, J., 2017. Assessing broomrape risk due to weeds in cropping systems with an indicator linked to a simulation model. *Ecological Indicators* 82(Supplement C) 280-292.

Colbach, N., Favrelière, E., Munier-Jolain, N., Pernel, J., 2018. Quels outils pour piloter la gestion durable de la flore adventice ?, In: Chauvel, B., Darmency, H., Munier-Jolain, N., Rodriguez, A. (Eds.), *Gestion durable de la flore adventice des cultures*. Éditions Quae.

Mézière, D., Colbach, N., Dessaint, F., Granger, S., 2015a. Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators. *European Journal of Agronomy* 68 22-37.

Mézière, D., Petit, S., Granger, S., Biju-Duval, L., Colbach, N., 2015b. 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.

« Pour ce projet, nous avons travaillé avec une chercheuse sur le développement durable et le modèle FLORSYS. Ce projet m'a permis d'apprendre de nouvelles choses à propos de la science car je ne connaissais pas ce [sujet]; l'explication de la création de l'OAD DECIFLORSYS était précise et complète. Ce travail était intéressant car il fallait modifier l'article [initial] pour le rendre plus compréhensible ; nous avons travaillé en collaboration avec la chercheuse. Si c'était à refaire, je le referais ».

« Nous avons réalisé une réécriture partielle de l'article sur plusieurs séances d'une heure. Le but était de rendre l'article plus accessible et plus compréhensible. Nous avons participé à une visio-conférence avec Floriane Colas ; elle a notamment répondu à nos questions, nous a expliqué le fonctionnement global de la recherche ainsi qu'un survol de ses nouveaux travaux de recherche. Ce projet m'a apporté de nouvelles connaissances et m'a permis de découvrir le monde de la recherche. Le projet m'a beaucoup plu et intéressé. »

"Le principe de notre travail était de réécrire un article de Floriane Colas, la chercheuse qui a suivi notre travail. L'article parle d'aider à réduire l'utilisation d'herbicides avec un "Outil d'Aide à la Décision". Nous avons interagi de plusieurs manières avec la chercheuse. Elle nous renvoyait l'article avec des commentaires, pour nous dire si nos propositions étaient acceptables ou pas, pour nous aider à les reformuler. Ces commentaires m'ont beaucoup aidée. Nous pouvions poser des questions à la professeure ou écrire des commentaires à la chercheuse si nous n'avions pas compris, ce qui m'a plu. Nous avons eu une visio-conférence à laquelle je n'ai pas pu participer parce que j'avais cours, mais j'ai quand même pris connaissance des réponses de la chercheuse grâce à mes camarades et à la professeure. J'ai appris la différence entre recherche publique et recherche privée, comment on devient chercheur, etc. le projet m'a apporté de la réflexion. La chose qui a le plus manqué était le temps car parfois cela passait trop vite pour faire plein de choses. Rien ne m'a déplu dans ce projet."

"[Pour comprendre un article scientifique non vulgarisé], le lecteur doit déjà avoir de fortes notions dans le domaine, [un tel article] n'est donc pas compréhensible pour le grand public. Notre travail consistait donc à rendre cet article compréhensible pour le grand public (en intégrant des définitions, en remplaçant certains termes compliqués par des plus simples, en revoyant certains paragraphes...). Pour moi, ayant cours pendant la rencontre organisée [en visioconférence] avec la chercheuse, mon interaction avec elle a été limitée aux commentaires sur Word et aux paroles transmises par notre professeure. Cette expérience [de réécriture] me permet de mieux comprendre comment vulgariser un article scientifique, mais aussi le processus fait en amont pour que cet article passe de quelque chose d'indéchiffrable pour le grand public à quelque chose de plus compréhensible. Ce qui m'a plu c'est le travail d'équipe, la cohésion entre nous, les différents élèves (venant de différentes classes) mais aussi avec la chercheuse. Ce qui m'a moins plu c'est le manque de communication entre nous, la seule intermédiaire étant la prof. De plus, je pense aussi que ce projet m'a donné plus de connaissances dans le sujet étudié, en l'occurrence sur le monde agricole et l'optimisation des cultures."

Questions posées par les élèves (75%) avec l'accompagnement de leur professeure, réponses de Floriane Colas.

Est-ce que beaucoup de personnes utilisent FLORSYS et DECIFLORSYS ?

FLORSYS : une dizaine de chercheurs (c'est un modèle de recherche très complet, mais complexe à utiliser).

DESCIFLORSYS : pas encore très utilisé, car depuis le début des recherches à ce sujet (2018) un travail est mené pour rendre l'interface de travail plus ergonomique (agréable et simple à utiliser) + réalisation de tests/essais complémentaires.

Durée de l'utilité de cet OAD ? Sur le long terme, des changements climatiques sont prévus : sont-ils pris en compte ou vont-ils rendre l'OAD obsolète ?

Ils sont déjà pris en compte mais l'outil devra évoluer au fur et à mesure des nouvelles données relatives aux prévisions climatiques utilisées. D'autre part, il faut encore voir si l'OAD sera réellement adopté et utilisé par le public visé.

L'OAD sera-t-il payant pour les utilisateurs ?

Non ; issu de la recherche publique, il n'a pas vocation à être payant. Eventuellement, la formation nécessaire pour apprendre à utiliser l'outil peut l'être, mais pas l'outil lui-même.

Quelle est la différence entre la recherche publique et privée ?

Dans la recherche publique, les expérimentations sont plutôt réalisées par des étudiants de thèse, pendant que les plus expérimentés passent moins de temps sur la mise en œuvre des protocoles, pour pouvoir innover (avoir de nouvelles idées) et rechercher les financements (monter les dossiers et les suivre).

Dans la recherche privée, les travaux sont financés par des entreprises qui vendent ensuite le fruit du travail (la vente du résultat de recherche finance donc la recherche).

Est-ce que cet OAD a vocation à être utilisé à l'échelle mondiale ? Si oui sera-t-il payant ?

Le modèle de base est pour l'instant utilisé en Allemagne et en Espagne. Pour cela, il a été adapté avec des données climatiques complémentaires car dans les zones où il est utilisé, le climat est légèrement différent de celui avec lequel l'OAD a été construit (plus froid en Allemagne par exemple).

Pour d'autres zones climatiques que les zones européennes, l'OAD doit également être adapté avec les données climatiques de la zone où l'on veut l'utiliser.

Est-ce que les modifications climatiques liées au changement climatique global vont être prises en compte ?

Oui ; pour cela, FLORSYS doit être utilisé pour refaire les simulations en prenant en compte les nouvelles données climatiques, et pouvoir mettre l'OAD à jour.

Dans tous les cas, DECIFLORSYS n'a pas vocation à être payant, même s'il est utilisé hors de France.

Est-ce que le changement climatique a un effet négatif sur le modèle ?

Non le changement climatique n'affecte pas le modèle, par contre il faut le prendre en compte : nécessité de modéliser les différentes évolutions climatiques possibles pour prévoir des adaptations du modèle.

Est-ce que DECIFLORSYS est basé sur FLORSYS ?

Oui, DECIFLORSYS contient toutes les données de FLORSYS, mais sous forme simplifiée.

Sur quelle durée la recherche menant à DECIFLORSYS a-t-elle été menée ?

Depuis 2010, FLORSYS a été utilisé dans différents groupes de recherche pour concevoir DECIFLORSYS. Ce dernier évolue encore : par exemple, un groupe l'enrichit actuellement en précisant la modélisation des systèmes racinaires, l'utilisation de l'azote etc...

Est-ce que de nouvelles techniques sont également rajoutées dans l'OAD ?

Oui. La recherche est souvent en retard par rapport aux agriculteurs, car ce sont eux qui innovent au niveau des techniques ; celles-ci sont utilisées sur le terrain avant d'être incluses dans le modèle. Cela permet de ne prendre

en compte que les innovations qui ont été trouvée réellement utiles par les agriculteurs et conservées, et cela permet également d'avoir des données sur les résultats de l'utilisation de ces techniques

Comment devient-on chercheur ?

Après les 5 années de Master, 3 années de thèse pendant lesquelles on travaille déjà dans un laboratoire de recherche, puis après la thèse les post-doctorats et les contrats courts sont conseillés pour élargir son expérience et le champ des sujets abordés.

Plus tard dans la carrière on peut passer des concours pour obtenir un poste de chercheur fixe, où l'on peut plus se concentrer sur son sujet de prédilection.

Comment conseillers et agriculteurs contribuent au développement d'un modèle d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventice ?

Floriane Colas¹, Wilfried Queyrel¹, Bastien Van Inghelandt¹, Jean Villerd^{1,2}, Nathalie Colbach¹

¹Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

²LAE, INRA, Univ. Lorraine, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

RESUME

Contexte – Afin de réduire l'utilisation d'herbicides, nous avons besoin d'outils pour concevoir des stratégies de gestion des adventices économes en herbicides. Dans ce but, un outil d'aide à la conception de systèmes de cultures et des écosystèmes a été développé.

Etude – Tout d'abord, la structure de ce nouvel outil d'aide à la décision (OAD) a été développée en interaction avec les futurs utilisateurs (conseillers et agriculteurs), via des enquêtes et des ateliers. Ensuite, le contenu biophysique a été utilisé sur le cycle des adventices dans les cultures, à partir d'un modèle de recherche FlorSys. Ce modèle est une « parcelle virtuelle » simulant la dynamique des adventices en fonction des systèmes de culture et du pédoclimat et qui en déduit des indicateurs d'impact de la flore adventice sur la production agricole et les services écosystémiques associés aux adventices. L'OAD résultant, DeciFloSys, est composé :

- de classements listant les techniques culturales les plus influentes
- d'arbres de décision proposant des combinaisons de pratiques culturales pour atteindre un objectif donné en termes d'impact de la flore adventice (ex. : concilier faible perte de rendement et faible usage d'herbicides)
- d'un simulateur rapide permettant de tester sur ordinateur de nouveaux systèmes de culture en direct, notamment au cours d'un atelier de coconception de systèmes de culture.

Mots-Clés – Gestion agroécologiques, adventice, OAD (outils d'aide à la décision), perte de rendement, biodiversité

Gestion agroécologique de la flore adventice

Reconcevoir des stratégies de gestion de la flore adventice est essentiel afin de suivre les réglementations françaises et européennes. Cependant, l'emploi d'herbicides, la solution curative la plus efficace à ce jour, la plus simple et la plus rapide à mettre en œuvre, est aussi cause de problèmes sanitaires et environnementaux. Les autres techniques curatives (mécaniques ou thermiques) sont moins efficaces ou plus difficiles à mettre en œuvre. Elles doivent être combinées avec des méthodes préventives telles que : (1) la diversification de la rotation, (2) le travail du sol pour vider le stock semencier, (3) le retard de semis en automne pour éviter le pic de germination des adventices, (4) des espèces et variétés de culture compétitives pour occuper l'espace et l'ensemble doit être raisonné sur le long terme. La gestion de la flore adventice est d'autant plus complexe que les adventices ont leur rôle à jouer dans l'agroécosystème, en rendant des services écosystémiques, notamment en tant que ressources alimentaires pour les abeilles de la parcelle ou composante de la biodiversité végétale propre aux champs cultivés. Concevoir un système de culture respectant cette dualité de gestion est complexe, d'autant plus que le système de culture se réfléchit sur le long terme. C'est pourquoi nous avons besoin d'outils pour aider les acteurs, agriculteurs et conseillers agricoles, confrontés directement à la conception de systèmes de culture. Notre objectif était de co-développer, avec des conseillers agricoles et des agriculteurs, un outil d'aide à la décision pour la gestion agroécologique des adventices à l'échelle du système de culture, un outil qui soit adapté aux besoins des conseillers agricoles et des agriculteurs.

Des outils d'aide à la décision pour la gestion des adventices existent et répondent à des besoins spécifiques, par exemple : aider à reconnaître les espèces adventices (InfloWeb), guider les traitements herbicides (DECID'herb) et guider la conception de nouveaux systèmes de culture économes en herbicides (ECOHERBI ou ODERA-Systèmes). Cependant, le besoin d'un outil à l'échelle système de culture et permettant de prendre des décisions stratégiques sur le long terme a été identifié par le GIS GC HP2E (Journée de réflexion sur la création d'OAD pour la profession agricole, 2011). C'est pourquoi, le projet CoSAC (ANR-14-CE18-0007, www.projet-cosac.fr) a dans ses objectifs le développement d'outils d'aide à la décision (OAD) prédisant les effets des pratiques agricoles et du pédoclimat sur la flore adventice et l'utilisation de ces outils pour concevoir des stratégies de gestion durable des adventices.

Comment allier implication des utilisateurs et méthodes statistiques complexes pour développer un outil d'aide à la décision

Afin de concevoir un OAD permettant d'aider à la gestion agroécologique des adventices, tout en réduisant l'utilisation des herbicides, nous avons besoin de :

- un outil qui raisonne et évalue la gestion sur le long terme, et combine les pratiques culturales pour gérer la flore adventice ;
- un outil qui prenne en compte les techniques curatives alternatives et la prévention des adventices ;
- un outil avec, en sortie, des indicateurs proches des problèmes liés aux adventices des agriculteurs, ainsi que des indicateurs pour le compromis de gestion durable des systèmes de culture.

Implication des utilisateurs dans le développement de l'outil

Pour cela, il est nécessaire d'avoir à la fois un outil qui représente la complexité des interactions entre le système de culture et les adventices mais aussi un outil qui soit utile et utilisé. C'est pourquoi la démarche adoptée ici fait intervenir les futurs utilisateurs dès les premières étapes du développement tout en utilisant au mieux un modèle complexe existant, en le simplifiant (**figure 1**).

Les interventions avec les utilisateurs nous donnent le type d'OAD à produire ainsi que la structure et le forme de l'OAD. Tandis que la simplification du modèle nous fournit le contenu de l'OAD. C'est en avançant en parallèle avec les utilisateurs et avec la simplification du modèle qu'on peut arriver à l'OAD résultat du meilleur compromis entre les demandes des utilisateurs et les possibilités du modèle.

Quels besoins des conseillers et agriculteurs?

Via un questionnaire en ligne, 40 conseillers agricoles et 6 agriculteurs ont été consultés pour définir quelle utilisation ils pourraient avoir d'un OAD au niveau de gestion stratégique des adventices.

Deux types de besoins sont ressortis de l'enquête (figure 1) :

3. pour gérer la **conception d'un nouveau système de culture**, un outil qui décrit le système de culture à une échelle synthétique de type méta-règle de décision (ex : fréquence du travail du sol ou proportion de culture de printemps dans la rotation) ;
4. pour **améliorer un système existant** en ajustant le système de culture, un outil qui décrit de façon complète le système de culture, via une liste d'opération détaillée.

Les futurs utilisateurs consultés ont donné leur avis sur ce que devait estimer l'OAD, notamment sur les indicateurs qu'il est possible de calculer avec le modèle. Les conseillers agricoles et les agriculteurs sont principalement intéressés par les indicateurs qui évaluent la nuisibilité des adventices pour la production agricole, en termes de quantité et qualité, aspect indispensable pour que leur système de production soit rentable (figure 2).

Pendant, ils sont nombreux à vouloir inclure dans les critères d'évaluation des systèmes de culture également des impacts environnementaux (comme la contribution des adventices à réduire le lessivage de l'azote dans le sol) ou liés à la biodiversité (comme la présence de ressources alimentaires pour les carabes ou les abeilles).

Cette première interaction avec les utilisateurs démontre que nous disposons déjà d'un outil pour répondre au deuxième besoin, avec le modèle de recherche FLORSYS (voir présentation détaillée plus bas). Par contre, cette enquête démontrait aussi le besoin de développer un nouvel outil correspondant au premier besoin, que nous nommons DECIFLORSYS par la suite.

Comment combiner pratique agricole et connaissances scientifiques

Pour éviter de repartir de zéro dans la construction du nouvel outil DECIFLORSYS, nous avons décidé d'utiliser le modèle de recherche FLORSYS comme réseau de parcelles virtuelles, en simulant de nombreux systèmes de culture pour ensuite modéliser plus simplement la relation entre le système de culture et les impacts des adventices. Les systèmes de culture utilisés proviennent de systèmes de culture existants issus d'enquêtes en exploitation agricole, d'essais systèmes de culture et d'experts. Ces systèmes ont été complétés par des situations extrêmes, sans herbicides ou sans travail du sol, et des systèmes de culture aléatoires pour traquer l'innovation inattendue. Au total, 4102 systèmes ont été simulés sur 30 ans, afin de capter les effets à long terme et répétés avec 10 séries climatiques différentes afin d'évaluer la robustesse des systèmes face aux aléas climatiques. Pour transformer ces données en OAD, des méthodes de fouille de données ont été utilisées permettant de méta-modéliser le modèle de recherche FLORSYS en un modèle plus simple.

Les différentes composantes de l'outil d'aide à la décision

L'outil pour jeter les grandes lignes d'un système de culture

Le nouvel outil d'aide à la décision développé avec les conseillers et agriculteurs, DECIFLORSYS, se compose de trois parties. Tout d'abord, (1) un classement des techniques culturales ayant le plus d'effet sur la flore adventice et les conséquences pour la production agricole et la biodiversité afin de guider l'utilisateur dans le choix des techniques à modifier en vue d'améliorer ou concevoir un système de culture (figure 4).

Le deuxième élément de DECIFLORSYS (2) est constitué par une série d'arbres de décision (Figure 3). Les entrées de chaque arbre sont des méta-règles de décision correspondant à une description synthétique du type de système de culture (par exemple fréquence moyenne de travail du sol, proportion de culture de printemps, fréquence de travail du sol avant le colza). Les sorties des arbres sont les indicateurs d'impact de la flore adventice (Colbach et al., 2017; Mézière et al., 2015b), dont la plupart a été développée avec des agriculteurs (Mézière et al., 2015a).

Le troisième composant de DECIFLORSYS (3), issu de la forêt aléatoire, est un calculateur qui prédit en quelques secondes les valeurs des indicateurs d'impact de la flore adventice à partir des métrarègles de décision et descripteurs synthétiques des systèmes de culture. En renseignant les différentes méta-règles de décision (par exemple, labourer un an sur trois, avec 20% de cultures de printemps dans la rotation), on obtient en quelques secondes une estimation des impacts des adventices sur la production agricole et la biodiversité. Si le résultat n'est pas satisfaisant, l'utilisateur modifie les valeurs des méta-règles pour relancer le calcul afin de trouver les valeurs de méta-règles de décision qui permettent de faire bouger les impacts des adventices dans le sens qui nous convient.

La parcelle virtuelle FLORSYS pour ajuster finement le système

FLORSYS est une « parcelle virtuelle », où sont simulés les impacts du système de culture sur la dynamique adventice à l'échelle de la parcelle et en fonction du pédoclimat à un pas de temps journalier (figure 5).

. Les systèmes de culture simulés et les variables environnementales vont influencer le cycle de vie des cultures et adventices, prédisant pour chaque jour une multitude de variable d'état décrivant le couvert cultivé et la flore adventice (la densité des semences viables, dormantes et germées, la densité, la position, la biomasse, et le stade des plantes émergées, ainsi que la production de graines). L'évaluation du modèle FLORSYS avec des données indépendantes provenant d'observations sur le terrain dans différentes régions de France a montré que le rendement des cultures, la densité journalière d'adventices et les densités moyennées sur les années de simulations sont classées correctement par le modèle, ce qui permet de comparer des systèmes de culture entre eux, l'erreur de prédiction étant acceptable.

FLORSYS, par sa capacité à tester en virtuel de nombreux systèmes de culture très détaillés et à les évaluer par de nombreux indicateurs permet de faire un diagnostic détaillé du système de culture testé, en traquant par exemple les pratiques qui n'ont pas été suffisamment efficaces pour gérer les adventices à différentes étapes de la rotation. Cette complexité rend cependant l'utilisation de FLORSYS assez compliquée et très lente. Une simulation d'un système de culture sur 30 ans et avec 10 répétitions climatiques peut demander jusqu'à 2 jours. C'est pourquoi, on ne compare souvent qu'un petit nombre de système de culture précis.

Exemple d'utilisation de l'outil d'aide à la décision avec des agriculteurs

Dans le cadre d'un atelier de co-conception de systèmes de culture économes en herbicides et rentables, ces deux outils, DECIFLORSYS et FLORSYS, ont été mis en œuvre pour évaluer les propositions de système de culture conçus par des agriculteurs du GDA de Brienne. Lors de cet atelier les agriculteurs ont conçu des systèmes de culture. DECIFLORSYS est intervenu ensuite pour évaluer en direct, grâce au prédicteur rapide, les systèmes de cultures afin d'informer les agriculteurs de l'efficacité des différents systèmes de culture testés. Le tableau 1 synthétise les performances du système de référence et de plusieurs prototypes estimés par le prédicteur de DECIFLORSYS. Les options testées dans le prototype B montre bien que l'évaluation en direct a donné des pistes de réflexion sur les options choisies par les agriculteurs pour gérer les adventices, les encourageant à mobiliser d'autres leviers de gestion et ainsi relancer une boucle de conception. Par exemple, DECIFLORSYS permet de voir que combiner l'utilisation d'herbicide et le désherbage mécanique ne permet pas de réduire encore la perte de rendement comparé au désherbage mécanique seul ou à l'utilisation d'herbicide seul, mais qu'au contraire, elle réduit la biodiversité liée à la flore adventice.

Ces ateliers ont aussi démontré que, malgré une interface un peu austère qui reste à améliorer, DECIFLORSYS est déjà un outil capable d'appuyer la conception de nouveaux systèmes de culture. DECIFLORSYS et FLORSYS sont complémentaires, en effet, DECIFLORSYS peut s'utiliser à chaud, pendant un atelier, en évaluant des propositions de système de culture, pour avoir une vision globale des performances du système, tandis que FLORSYS s'utilise plus à froid, entre deux ateliers pour faire du diagnostic, avoir une évaluation plus précise du système de culture.

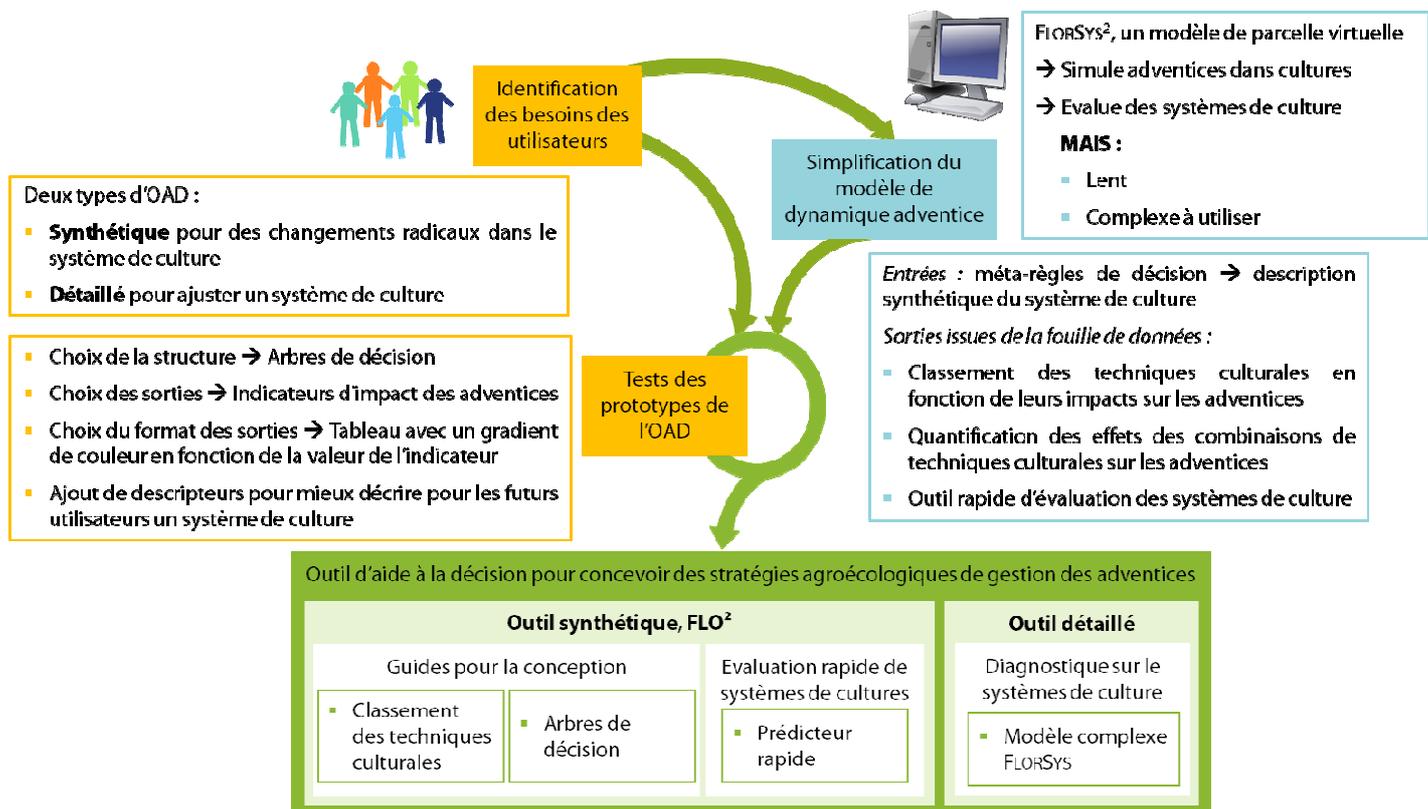


Figure 1 : Méthodologie et résultats de la conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventive.

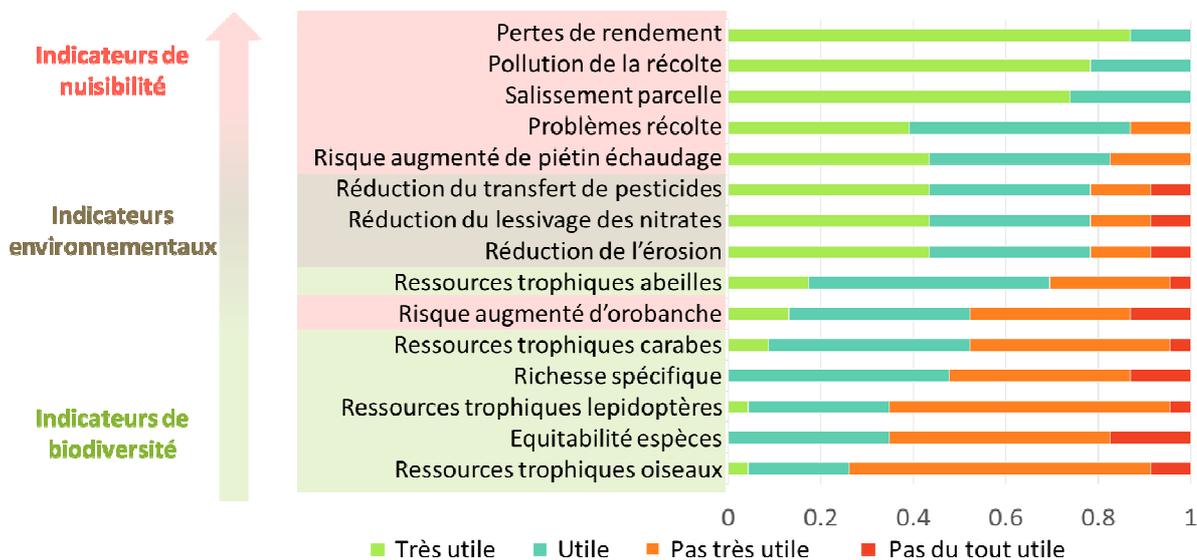


Figure 2 : Quels indicateurs de d'impact de la flore adventice sur le système de culture intéresse le plus les conseillers agricoles ? Proportion des réponses d'un questionnaire en ligne évaluant l'utilité des indicateurs d'impact présents dans le modèle FLORSYS.

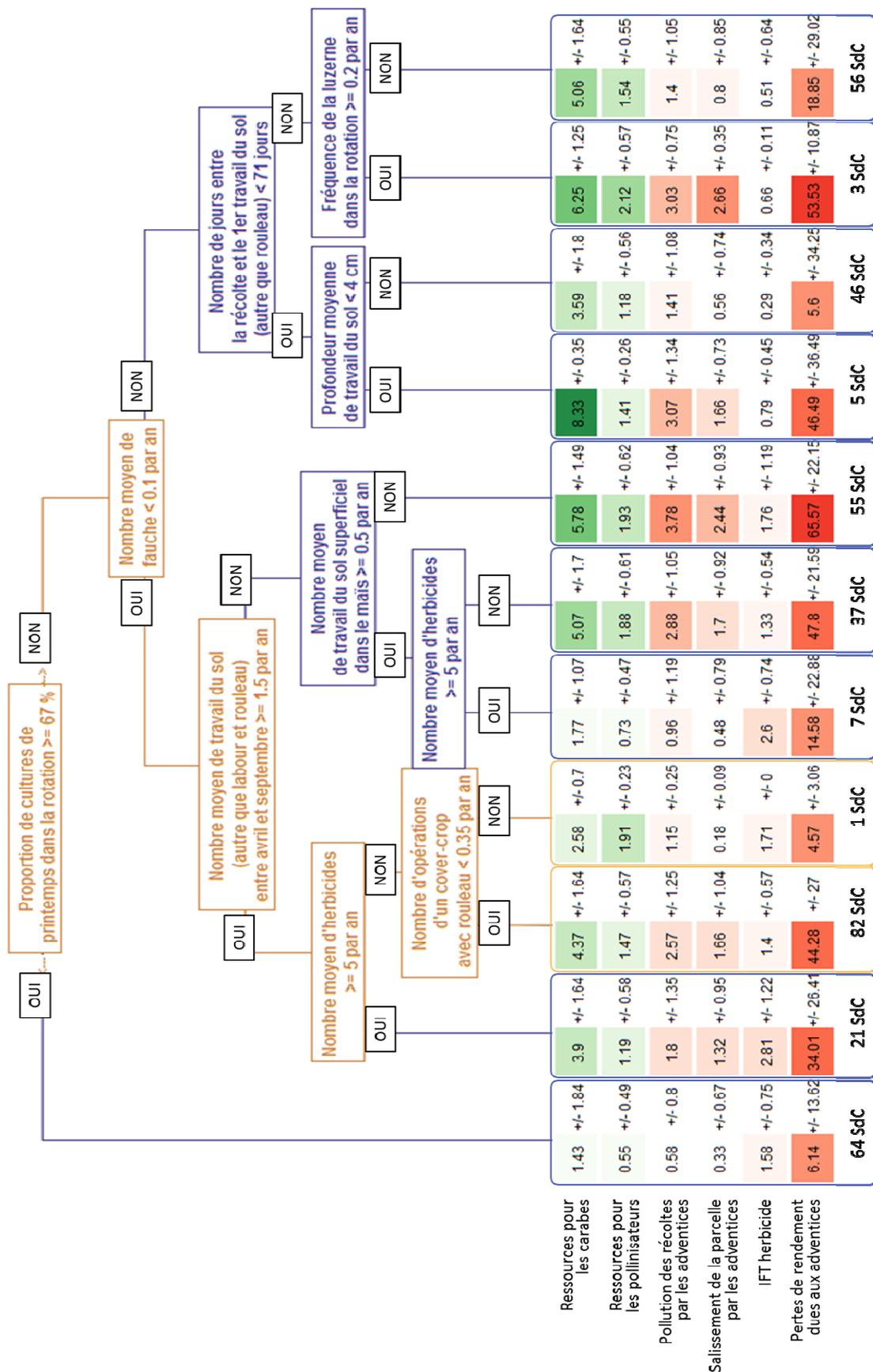


Figure 3 : Arbre de décision réalisé sur des systèmes de culture correspondant à a de la champagne humide correspondant à la situation de production des agriculteurs du groupe de test de l'OAD. Les "feuilles" en bas de l'arbre constituent les performances-cible en termes de contribution des adventices à la biodiversité, nuisibilité des adventices pour la production agricole et usage d'herbicides. Les branches constituent des combinaisons de pratiques culturales. L'arbre peut se lire de haut en bas ("que se passe-t-il si...") ou de bas en haut ("que faut-il faire pour obtenir..."). En orange, le chemin correspondant au système de culture actuel d'un agriculteur du groupe. Les indicateurs-cibles représentés ont été choisis par la conseillère du groupe d'agriculteurs.

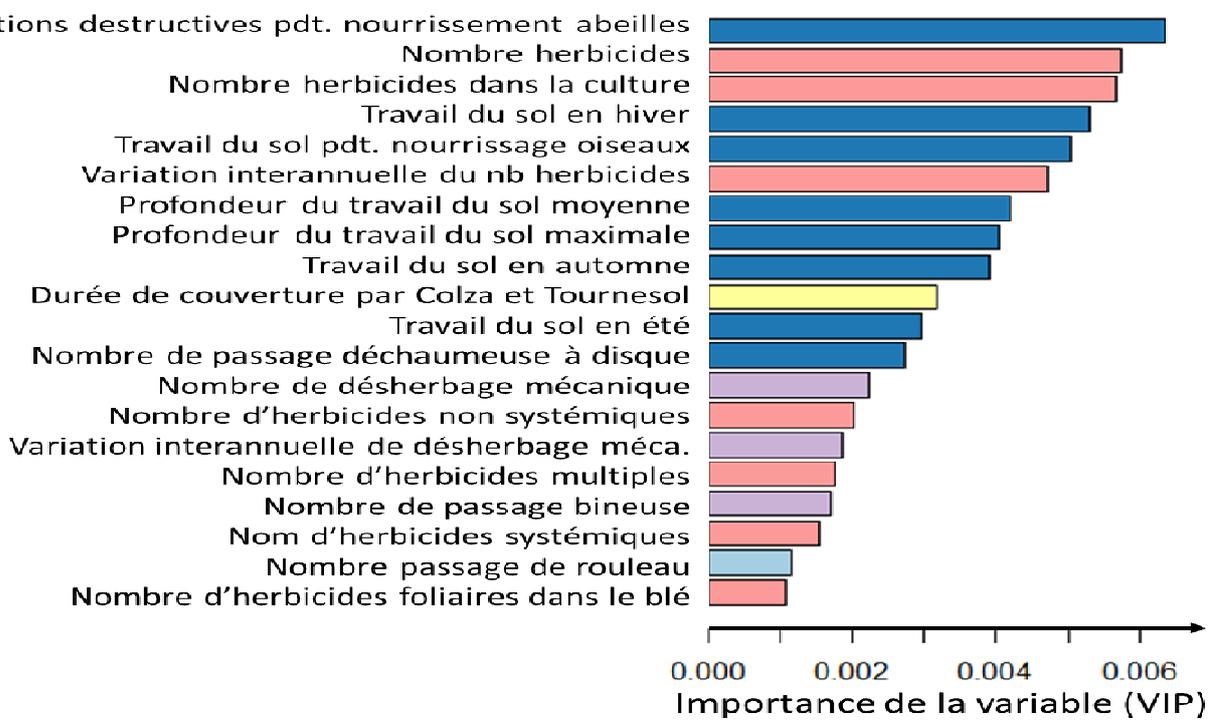


Figure 4 : Classement des techniques culturales ayant le plus fort effet sur les impacts des adventices (pertes de rendement, salissement de la parcelle, pollution des récoltes, intensité d'utilisation des herbicides, ressources alimentaires pour les abeilles et les carabes). Les valeurs correspondent aux VIP, l'importance de la variable calculée à l'aide d'une méthode de fouille de données, la forêt aléatoire. Ce classement permet d'identifier les techniques culturales à modifier en priorité pour améliorer ou concevoir un système de culture.

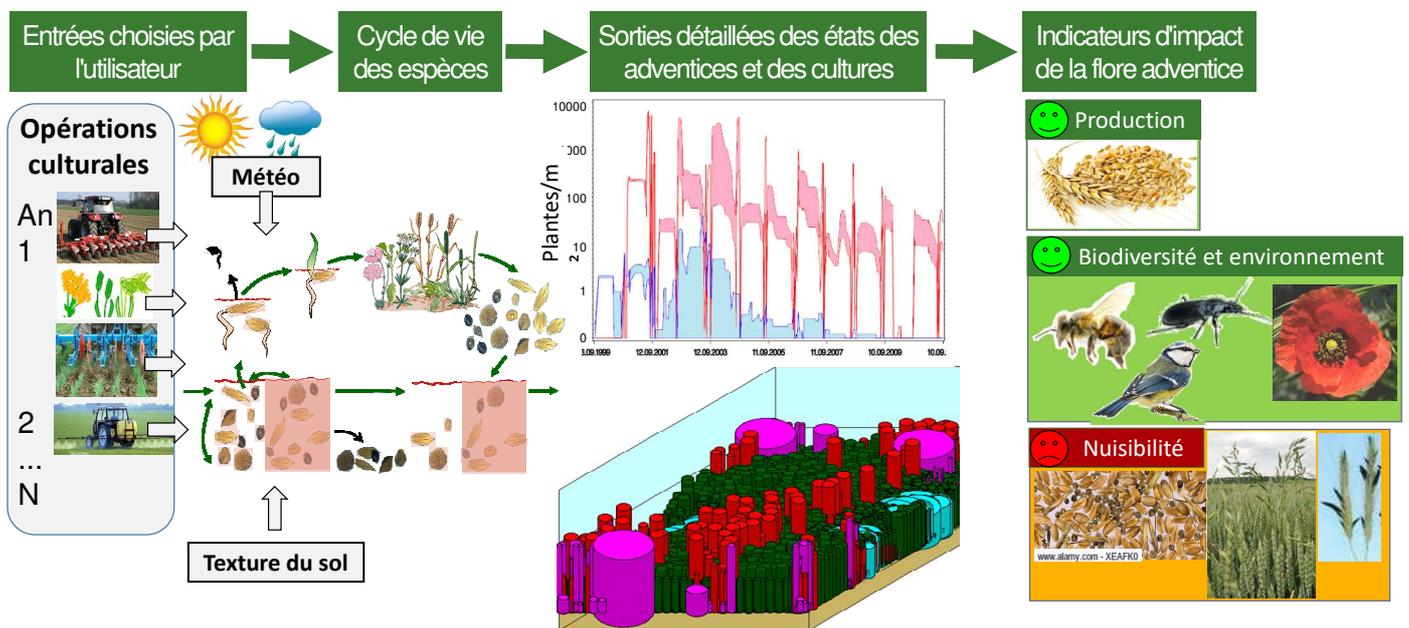


Figure 5 : Le modèle FLORSYS est une parcelle virtuelle où l'on peut tester de nombreux et divers systèmes de culture à long terme et avec différentes flores adventices, conditions météo et types de sol (Colas, 2016; Colbach et al., à paraître). Les entrées renseignées par l'utilisateur influent sur le cycle de vie des adventices et plantes cultivées dont la croissance et dynamique sont simulées en 3D et avec un pas de temps journalier. Cette approche mécanistique produit des sorties très détaillées qui permettent de comprendre l'effet et la performance de chaque technique et système de culture. Pour faciliter la comparaison des systèmes de culture, ces sorties détaillées sont synthétisées sous forme d'indicateurs de l'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement physique (Nathalie Colbach © 2018)

Système de culture (cultures de printemps en italique, couverts soulignés)	Offre trophique pour		Nuisibilité pour la production agricole		
	Carabes	Abeilles	Perte de rendeme nt	Pollution récolte	Salissement de la parcelle
Référence (colza/blé/blé/orge)	4.65	1.59	45.8	2.82	1.51
Protoype A [§]	4.60	1.59	31.8	2.37	1.02
Protoype B [§] avec herbicides	5.11	1.66	25.5	2.09	0.87
B avec désherbage mécanique	5.01	1.67	24.2	2.11	0.99
B avec herbicides + désh. méca.	4.82	1.60	23.7	2.03	0.84
B-lentille + désh. mécanique	5.07	1.74	40.6	2.68	1.28

[§]Colza+légumineuses/blé/couvert gélif puis *orge*/colza+pois/trèfle puis *tournesol* ou *betterave*/blé/orge

[§]Colza/blé/couvert gélif puis *orge*/couvert gélif puis *orge*/luzerne (2 ans)/blé/couvert gélif puis *chanvre*

Tableau 2 : Évaluation de l'impact de la flore adventice sur la biodiversité et la production agricole de systèmes de culture conçus par des agriculteurs en atelier, en utilisant le prédicteur rapide de DECIFLORSYS. Les cellules de chaque colonne sont colorées en rouge pour le pire résultat (faible biodiversité, forte nuisibilité) au vert pour le meilleur résultat (forte biodiversité, faible nuisibilité)

Bibliographie

- Colas, F., 2016. Which decision-support systems for sustainable weed management : why, how and when to use it ?, 7. International Weed Science Congress: Prague.
- Colbach, N., Bockstaller, C., Colas, F., Gibot-Leclerc, S., Moreau, D., Pointurier, O., Villerd, J., 2017. Assessing broomrape risk due to weeds in cropping systems with an indicator linked to a simulation model. *Ecological Indicators* 82(Supplement C) 280-292.
- Colbach, N., Favrelière, E., Munier-Jolain, N., Pernel, J., à paraître. Quels outils pour piloter la gestion durable de la flore adventice ?, In: Chauvel, B., Darmency, H., Munier-Jolain, N., Rodriguez, A. (Eds.), *Gestion durable de la flore adventice des cultures*. Éditions Quae.
- Mézière, D., Colbach, N., Dessaint, F., Granger, S., 2015a. Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators. *European Journal of Agronomy* 68 22-37.
- Mézière, D., Petit, S., Granger, S., Biju-Duval, L., Colbach, N., 2015b. 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.