

Végéphy – 24^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
ORLÉANS – 3, 4 et 5 DÉCEMBRE 2019

**SIMPLIFICATION D'UN MODELE COMPLEXE POUR LE DEVELOPPEMENT D'UN MODELE D'AIDE A LA
DECISION POUR LA GESTION AGROECOLOGIQUE DE LA FLORE ADVENTICE**

F. COLAS, W. QUEYREL, B. VAN INGHELANDT, J. VILLERD, N. COLBACH

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

Correspondance : Nathalie.Colbach@inra.fr

RÉSUMÉ

Afin de réduire l'utilisation d'herbicides, nous avons besoin de nouveaux outils pour aider à concevoir des stratégies de gestion des adventices économes en herbicides. Dans ce but, nous avons développé un Outil d'Aide à la Décision (OAD) pour la conception de systèmes de culture réconciliant protection des cultures et respect des écosystèmes. La démarche fait intervenir en parallèle le développement de la structure de l'outil en interaction avec les futurs utilisateurs (conseillers et agriculteurs) et une simplification du contenu biophysique du modèle FLORSYS concernant les impacts des systèmes de culture et des adventices. FLORSYS est une « parcelle virtuelle », où sont simulés les impacts du système de culture sur le développement, la croissance et la dynamique des cultures et des adventices à l'échelle de la parcelle et les conséquences pour la production et la biodiversité. L'OAD résultant, DECIFLORSYS, est composé de guides pour la conception ainsi qu'un évaluateur rapide de systèmes de culture combinant de nombreuses techniques pour gérer la flore adventice.

Mots-clefs : outil d'aide à la décision, fouille de donnée, évaluation multicritère, arbre de décision, modèle

ABSTRACT

SIMPLIFYING A COMPLEX MODEL TO DEVELOP A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR AGROECOLOGICAL WEED MANAGEMENT

To reduce herbicide use we need new tools to help design weed management strategies with sparing herbicide use. For this aim, we developed a Decision Support System (DSS) for designing cropping systems to reconcile both crop and ecosystem protection. The project combined the development of the tool structure with future users (crop advisors and farmers) with the simplification of the biophysical knowledge of the FLORSYS model on impacts of cropping systems on weeds. FLORSYS is a "virtual field" where cropping system impacts on development, growth and dynamics of crops and weeds are simulated, as well as the consequences for crop production and biodiversity. The resulting DSS, DECIFLORSYS, consists of guides for designing cropping systems combining numerous cropping practices to manage weeds and a fast cropping-system evaluation tool.

Keywords: Decision support system, data mining, multicriteria evaluation, decision tree, model

INTRODUCTION

La conception de systèmes de culture est complexe car les systèmes de culture doivent répondre à de nombreux enjeux (économique, environnementaux...) alors que les pratiques culturales ont des impacts nombreux et sont en interaction les unes avec les autres. En se focalisant sur la gestion des adventices, il est essentiel d'envisager la conception de systèmes de culture sur le long terme (Menalled *et al.*, 2001), là où les experts ont des difficultés pour prévoir avec précision les effets de toutes les pratiques culturales (et de leurs interactions) sur la flore adventice. En effet, pour la gestion intégrée des adventices il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques curatives (chimiques, mécaniques ou thermiques) et des méthodes préventives telles que la diversification de la rotation, le travail du sol pour réduire le stock semencier, le retard de semis en automne pour éviter le pic de germination des

adventices etc. (Wezel *et al.*, 2014). La gestion des adventices est également complexe car elles ont un rôle à jouer dans l'écosystème en fournissant des services écosystémiques, notamment en tant que ressources alimentaires pour les abeilles ou en tant que composante de la biodiversité végétale propre aux champs cultivés (Marshall *et al.*, 2003). La prise en compte ces services rendus lors de la conception de système de culture est en général difficile et rare.

La conception de systèmes de culture est un exercice difficile où des outils d'aide la décision (OAD) peuvent être très utiles. Il existe déjà de nombreux OAD qui répondent à des besoins spécifiques, par exemple : aider à reconnaître les espèces adventices (InfloWeb, Terres Inovia *et al.*), guider les traitements herbicides (DECID'herb, Munier-Jolain *et al.*, 2005) ou guider la conception de nouveaux systèmes de culture économes en herbicides (ECOHERBI, Rodriguez *et al.*, 2014 ou OdERA-Systèmes, Agro-Transfert Ressources et Territoires). Cependant, aucun outil à l'échelle du système de culture et permettant de prendre des décisions stratégiques sur le long terme n'a été identifié par le GIS GC HP2E (Journée de réflexion sur la création d'OAD pour la profession agricole, 2011). De même, il n'existe aucun outil prenant en compte à la fois les services et disservices liés aux adventices ainsi que leurs effets sur le long terme, d'où le besoin d'un outil de gestion agroécologique.

Il est donc nécessaire de développer un outil qui représente la complexité des interactions entre le système de culture et les adventices mais aussi de développer un outil qui soit utile et utilisé par les acteurs. Pour le développement d'un tel outil, il est essentiel d'intégrer les futurs utilisateurs le plus tôt possible (Cerf *et al.*, 2012). C'est pourquoi, notre but est de développer un OAD pour la gestion agroécologique des adventices en optant pour une démarche faisant intervenir les futurs utilisateurs dès les premières étapes du développement. Afin d'avoir un outil représentant la complexité des interactions du système de culture, la démarche fait également intervenir la simplification d'un modèle complexe issu de la recherche. Il s'agit du modèle FLORSYS (Gardarin *et al.*, 2012; Munier-Jolain *et al.*, 2013; Colbach *et al.*, 2014) qui est celui qui rassemble à ce jour le plus de connaissances sur les effets des systèmes de culture et du pédoclimat sur les adventices, et les conséquences pour la production et la biodiversité. Les interventions avec les utilisateurs nous ont donné le type d'OAD à produire ainsi que la structure et la forme de l'OAD, tandis que la simplification du modèle FLORSYS nous a fourni le contenu du nouvel OAD, appelé DECIFLORSYS (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

MATERIEL ET METHODES

Le modèle complexe FLORSYS

FLORSYS est une « parcelle virtuelle », où sont simulés les impacts du système de culture sur la phénologie, la croissance et la dynamique des cultures et des adventices à l'échelle de la parcelle et en fonction du pédoclimat, ainsi que les conséquences pour la production et la biodiversité. Afin d'analyser finement les effets des techniques culturales, différentes variables sont prédites chaque jour: 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. Ces nombreuses sorties ont été traduites en indicateurs d'impact de la flore adventice qui ont été développés avec des agriculteurs, des experts en écologie et par la recherche bibliographique (Mézière *et al.*, 2015 ; Colbach *et al.*, 2017). Ces indicateurs de services et disservices des adventices permettent d'estimer la nuisibilité directe et indirecte des adventices sur la production agricole (par exemple la perte de rendement due aux adventices ou les problèmes lors de la récolte en cas de "bourrage" de la moissonneuse-batteuse par des adventices immatures). Les indicateurs estiment aussi les services écosystémiques comme la contribution des adventices aux ressources trophiques des oiseaux, des carabes granivores et des pollinisateurs ou la biodiversité végétale avec la richesse en espèce adventices différentes.

L'évaluation du modèle FLORSYS avec des données indépendantes provenant d'observations sur le terrain dans différentes régions de France a montré que le modèle était efficace pour comparer des systèmes de culture entre eux. FLORSYS, par sa capacité à tester virtuellement des systèmes de culture très détaillés et à les évaluer par de nombreux indicateurs, en fait un outil intéressant pour aider à la conception de systèmes de culture multiperformants. Cependant, FLORSYS est un modèle de recherche

très détaillé, requérant de nombreux fichiers d'entrée et relativement lent à utiliser. Par exemple, une simulation « standard » sur 30 ans avec 10 répétitions climatiques, en demandant l'ensemble des fichiers de sortie avec un pas-de-temps journalier, prend entre 6 et 20 h suivant les systèmes de culture avec un ordinateur performant. En l'état, FLORSYS est difficilement utilisable comme outil d'aide à la décision, d'où l'idée d'utiliser les données issues des simulations de FLORSYS afin de créer un outil plus simple.

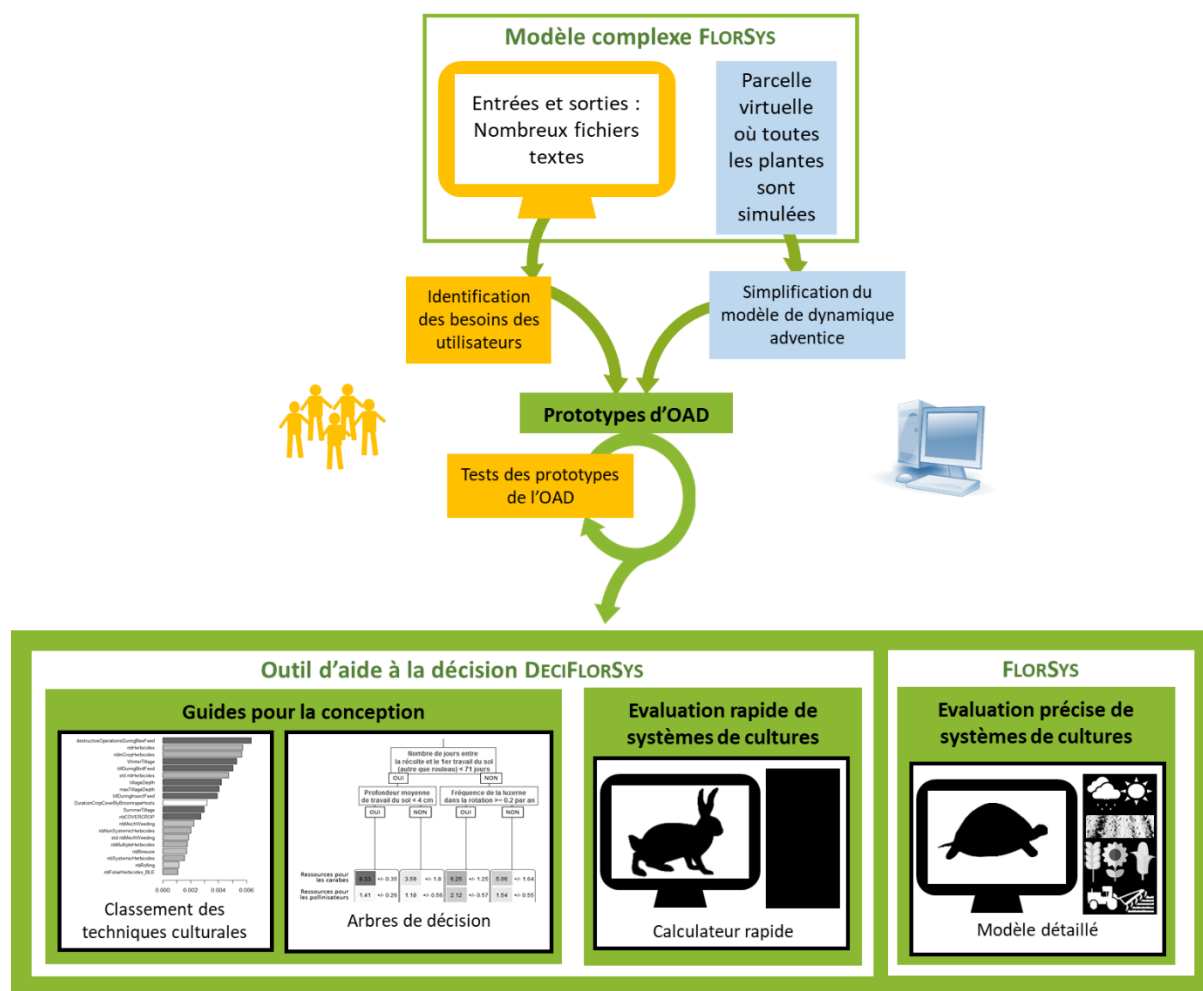


Figure 1 : Détail de l'outil d'aide à la décision (OAD) et déroulé de la conception d'un OAD à partir de la simplification d'un modèle complexe et en interaction avec les futurs utilisateurs de l'OAD.

(Decision Support System (DSS) breakdown and design process of DSS from complex model simplification and interactions with future DSS users.)

Simplification avec les futurs utilisateurs

Nous avons défini la structure du nouvel OAD avec ses futurs utilisateurs : agriculteurs et conseillers agricoles. C'est via un questionnaire en ligne, que conseillers agricoles (40 réponses) et agriculteurs (6 réponses complètes) ont été consultés dans toute la France pour définir l'objectif de l'OAD. Notamment, les questions auxquelles l'outil devrait répondre ont été définies, ainsi que la manière dont les utilisateurs appréhendent les stratégies de gestion à l'échelle du système de culture. Lors de réunions avec des agriculteurs, nous avons ensuite testé différentes sorties possibles pour le nouvel outil, qui doivent répondre aux besoins des utilisateurs, mais qui doivent aussi être réalisables avec le modèle FLORSYS. Différents ateliers avec des conseillers agricoles et des agriculteurs ont également été organisés afin de tester l'OAD dans des situations de conception de système de culture. Un système de culture de référence était défini avec les participants à l'atelier, soit le système actuel d'un agriculteur soit un système rencontré fréquemment dans la région. À partir de ce système de référence, différents

systèmes alternatifs étaient proposés puis évalués avec les outils à disposition. Ces ateliers avaient pour but d'améliorer l'utilisation de l'outil notamment en identifiant le format préféré de sortie et en ajoutant des entrées plus parlantes pour les utilisateurs, et ce pour les différents guides de conception et les outils d'évaluation.

Simplification par fouille de donnée

Afin de créer un modèle plus simple à partir du modèle complexe FLORSYS, nous avons utilisé FLORSYS comme réseau de parcelles virtuelles en simulant plusieurs milliers de systèmes de culture. Les entrées et résultats de ces simulations ont ensuite été utilisés pour créer des nouveaux modèles plus simples, liant directement système de culture et impacts des adventices. En guise d'entrées pour décrire le système de culture, le nouvel OAD, DECIFLORSYS, utilise des méta-règles de décision, par exemple : la proportion des cultures de printemps dans la rotation ou la fréquence de travail du sol. Parmi les nombreuses sorties fournies par FLORSYS, seuls les indicateurs de (dis)services de la flore adventice ont été retenus pour DECIFLORSYS.

Les nombreux systèmes de culture simulés correspondent à : (1) des systèmes de culture existants issus d'enquêtes en exploitation agricole, du réseau Biovigilance-Flore, du réseau DEPHY-FERME, d'essais systèmes de culture et d'experts, (2) des systèmes extrêmes, sans herbicides ou sans travail du sol, et (3) des systèmes de culture aléatoires pour rechercher l'innovation inattendue. Au total, 4102 systèmes ont été simulés sur 30 ans, afin de capter les effets à long terme. Ils ont été répétés avec 10 séries climatiques différentes afin d'évaluer la robustesse des systèmes face aux aléas climatiques.

Les entrées (les méta-règles des systèmes de culture) et les sorties (les indicateurs) de ces simulations ont été analysées par des méthodes de fouille de données. La fouille de donnée permet, dans un ensemble de données d'origines variées et non paramétriques, d'extraire, de quantifier et de synthétiser ces données. Tout d'abord, des arbres de classification et régression (CART, Breiman *et al.*, 1984) ont été utilisés afin de classer les systèmes de culture entre eux et de quantifier leurs performances en termes de (dis)services des adventices. Les arbres permettent également d'identifier les combinaisons de pratiques qui ont de l'effet sur les (dis)services. Ensuite, la méthode de la forêt aléatoire (Breiman, 2001), qui s'appuie sur le même principe que les arbres en les multipliant, permet de classer de façon robuste les pratiques en fonction de leur impact sur les (dis)services des adventices et de prédire rapidement les valeurs de ces (dis)services en fonction des systèmes de culture. Ce calculateur rapide a été évalué avec des données indépendantes. Les systèmes de culture du réseau DEPHY ont constitué un jeu de données test dont les performances ont d'abord été simulées avec FLORSYS, afin d'obtenir des observations virtuelles, puis évaluées avec le calculateur rapide de DECIFLORSYS. La comparaison des deux sorties a permis de déterminer l'erreur de prédiction de DECIFLORSYS (RMSEP : qui varie de 0, peu d'erreur de prédiction, à 1, beaucoup d'erreur de prédiction) et sa capacité à classer des systèmes de culture en fonction de leur performance (corrélation de Pearson : qui varie de 0, mauvais classement, à 1, bon classement). Un avantage supplémentaire de ces méthodes est qu'elles peuvent être mises en œuvre sous R et donc être hébergées dans une application web R-shiny (Chang *et al.*, 2017) rendant le calculateur rapide de DECIFLORSYS accessible facilement sur internet.

RESULTATS

Structure de DECIFLORSYS grâce aux futurs utilisateurs

Via le questionnaire en ligne, deux types de besoins sont ressortis de l'enquête. Un premier type d'outil correspondant à des usages de conception d'un nouveau système de culture, en décrivant le système de culture à une échelle synthétique sur la base de méta-règles de décision. Le second type d'outil vise à ajuster finement des systèmes de culture. Ce deuxième type d'outil décrit de façon complète le système de culture, via une liste d'opérations détaillée.

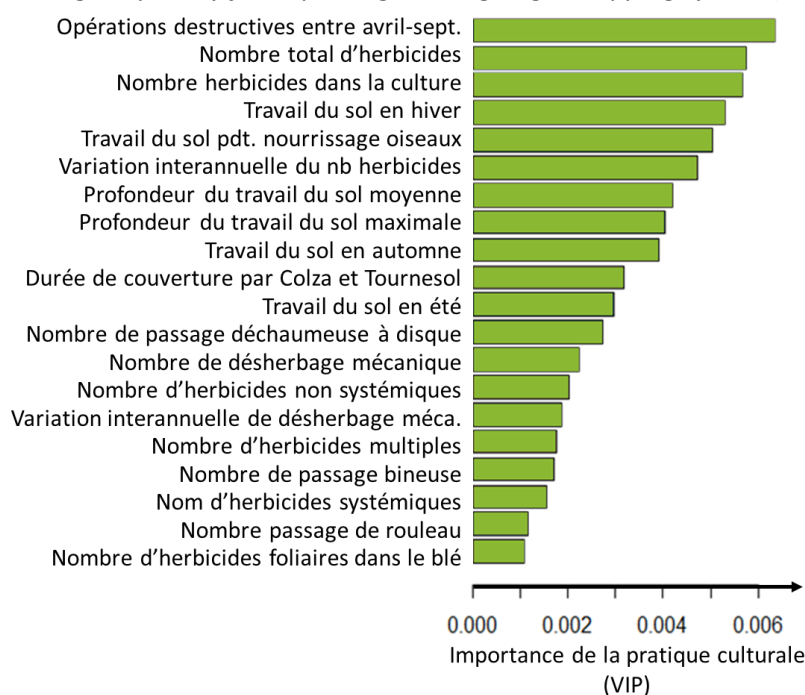
Parmi les indicateurs de (dis)services des adventices proposés en sortie pour DECIFLORSYS, les conseillers agricoles et les agriculteurs sont principalement intéressés par les indicateurs évaluant la nuisibilité des adventices pour la production agricole, en termes de quantité et qualité (Colas *et al.*, 2018). Cependant, ils sont nombreux à vouloir également inclure des critères d'évaluation des impacts environnementaux (comme la contribution des adventices à réduire la lixiviation de l'azote dans le sol) ou

des critères liés à la biodiversité (comme la présence de ressources alimentaires pour les carabes ou les abeilles). Également, de nouveaux indicateurs ont été suggérés comme le coût économique, le potentiel de production des semences adventices comme menace potentielle ou encore l'impact sur le calendrier de travail.

Sur la base de ces retours, nous proposons donc une combinaison d'outils (Figure 1) : (1) un nouvel outil appelé DECIFLORSys, issu de la simplification de FLORSys, guidant les utilisateurs dans la conception de nouveaux systèmes de culture à partir de méta-règles de décision, pour choisir les techniques culturales à modifier, les combiner puis connaître leurs performances, et ce en fonction des situations de production, (2) un outil de diagnostic détaillé qui correspond à FLORSys. Les deux outils proposent l'ensemble des indicateurs de (dis)services des adventices en sortie afin que les utilisateurs puissent composer un bouquet de critères d'évaluation correspondant au mieux à leurs objectifs et contraintes.

Figure 2 : Classement des techniques culturales ayant le plus fort effet sur un bouquet de (dis)services 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 à l'importance de la variable (VIP) 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.

(Key cropping system practices driving weed (dis)services, here yield loss, field infestation, harvest pollution, food resources for bees and carabids. The values correspond to the variable importance (VIP) estimated with the data mining method of random forest. This ranking helps identifying cropping practices to change in priority for improving or designing a cropping system.)



Les outils résultants pour le nouvel OAD DECIFLORSys et leurs utilisations

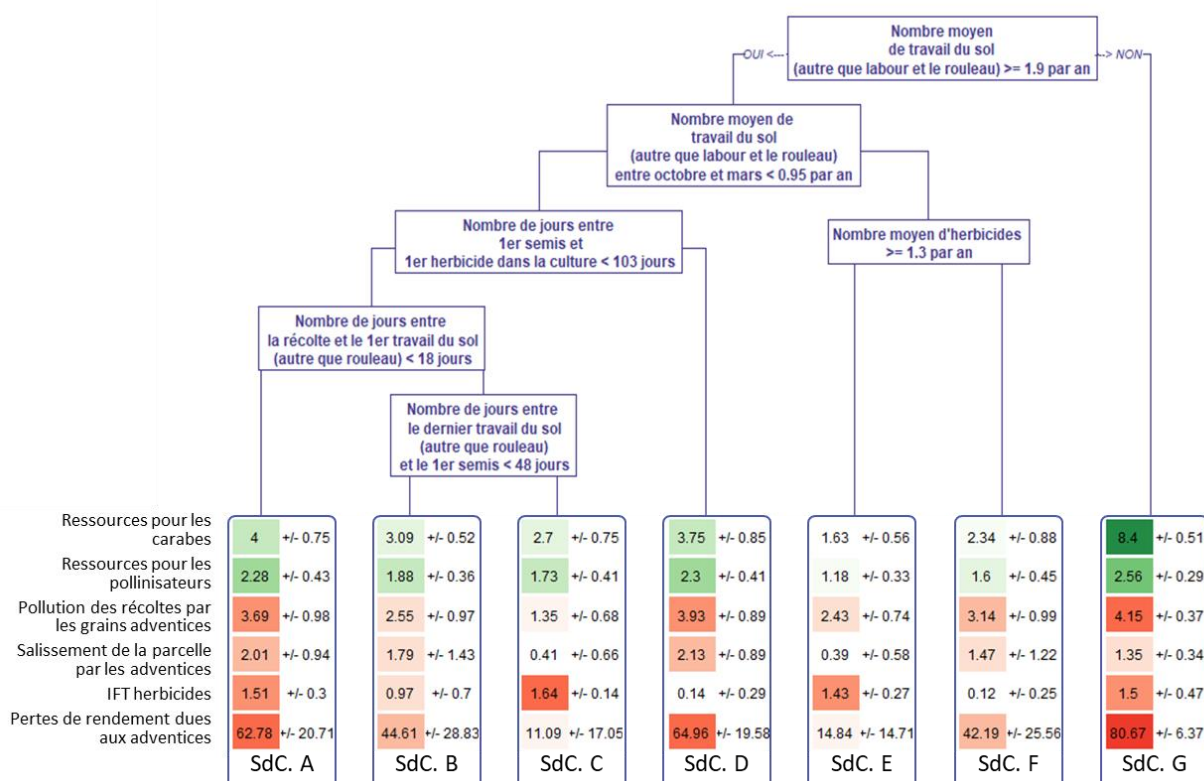
a. Classer et choisir les techniques culturales

Comme guide de conception, DECIFLORSys propose tout d'abord un classement des techniques culturales ayant le plus d'effet sur les (dis)services de la flore adventice. Il s'agit ici non pas d'une description détaillée des techniques, mais de méta-règles de décision correspondant à une description synthétique du type de système de culture. Ce classement permet de guider l'utilisateur dans le choix des techniques à modifier en vue d'améliorer ou concevoir un système de culture. Ce classement dépend de la combinaison des (dis)services de la flore adventice retenus par l'utilisateur ainsi que de sa situation de production. Par exemple, Figure 2, l'objectif est de réconcilier production agricole, faible usage

d'herbicide et biodiversité. Dans cette situation, le choix des opérations estivales détruisant la flore adventice (herbicides, fauches, travail du sol) est crucial, suivi du nombre d'applications herbicides, surtout en culture, puis de la fréquence de travail du sol en hiver et automne principalement.

Figure 3 : Arbre de décision, issu des simulations de FLORSYS, pour la situation de production Champagne humide. Les "feuilles" en bas de l'arbre constituent les performances-cible en termes de (dis)services des adventices choisies par l'utilisateur. Les « branches » constituent des combinaisons de pratiques culturales qui mènent aux feuilles. 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...").

(Decision tree, from FLORSYS simulations, for production situation damp Champagne region (France). The "leaves" at the bottom of the tree are target performances for weed (dis)services chosen by the user. The "branches" are combinations of agricultural practices leading to the leaves. The tree can be read from the top down ("what happens if ...") or from the bottom up ("what should we do to obtain...").



b. L'arbre de décision pour combiner les techniques culturales

Les arbres de décision de DECIFLORSYS sont des guides permettant de répondre à la question "quelles combinaisons de pratiques pour atteindre l'objectif X ?", pour chaque situation de production et bouquet de (dis)services des adventices. Ces arbres sont composées de branches combinant différentes méta-règles de décision et menant à des « feuilles » correspondant à différentes performances en termes d'un ensemble d'indicateurs de (dis)services des adventices choisis par l'utilisateur. Ces feuilles regroupent un ensemble de systèmes de culture aux performances similaires. Par exemple, l'arbre de la Figure 3 correspond à la Champagne humide, région d'un groupe d'agriculteurs avec qui nous avons réalisé un atelier de conception de système de culture. La combinaison d'indicateurs y a été choisie par la conseillère du groupe d'agriculteurs, avec trois indicateurs de disservices des adventices (perte de rendement, pollution des récoltes et salissement du champ), deux indicateurs de services (ressources trophiques pour abeilles et carabes) et l'usage herbicide (IFT herbicide). Dans cet exemple, les « feuilles » SdC B et SdC C correspondent à des combinaisons de pratiques similaires, c'est-à-dire : un nombre moyen de travail du sol total supérieur ou égal à 1.9 opérations par an en moyenne sur la rotation, mais inférieur à 0.95 entre octobre et mars, des traitements herbicides dans les 3 mois qui

suivent le semis, et un premier travail du sol au plus tôt 18 jours après la récolte. Dans cette situation, le décalage entre le dernier travail du sol et le semis de la culture de rente est déterminant pour diminuer la nuisibilité des adventices sans trop affecter la biodiversité. En effet, pour passer de la feuille SdC B à la feuille SdC C, il faut éviter de travailler le sol pendant les 48 jours précédant le semis. Cependant, ce changement va de pair avec une forte augmentation de l'intensité d'usage herbicide (IFT herbicide).

Tableau I : 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 calculateur rapide de DECIFLORSYS. Les cellules de chaque colonne sont colorées du rouge, pour le pire résultat de production agricole (forte nuisibilité), au blanc (faible nuisibilité) et du vert, pour le meilleur résultat pour la biodiversité (fortes ressources trophiques), au blanc (faible ressources trophiques).

(Evaluation of weed impacts on biodiversity and crop production of cropping systems designed by farmers during a workshop, using the fast predictor of DECIFLORSYS. Table cells are coloured from red for worst crop production results (high harmfulness) to white (low harmfulness) and from green for best biodiversity results (high trophic resources) to white (low trophic resources).)

Système de culture (cultures de printemps en italique, <u>couverts soulignés</u>)	Offre trophique pour		Nuisibilité pour la production agricole		
	Carabes	Abeilles	Perte de rendement	Pollution Récolte	Salissement de la parcelle
Référence (colza/blé/blé/orge)	46.21	2.84	1.53	4.61	1.6
Prototype (P) [§]	22.67	1.98	0.82	4.77	1.57
P avec lentilles au lieu des luzernes	33.79	2.42	1.11	4.53	1.57
P avec semis direct des <i>orges</i>	22.64	1.99	0.82	4.76	1.57
P avec semis de luzerne dans la 1 ^{ère} orge et tournesol au lieu de la 2 ^{ème} <i>orge</i>	14.44	1.92	0.67	4.06	1.48

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

c. Le calculateur rapide pour évaluer la performance

Le dernier élément de DECIFLORSYS est un calculateur évaluant en moins d'une seconde un nouveau système de culture en termes de (dis)services des adventices à partir des méta-règles de décision (par exemple, labourer un an sur trois, avec 20% de cultures de printemps dans la rotation). 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 s'approcher de ses objectifs en termes de (dis)services des adventices. Par exemple, les résultats de la Table I sont issus de l'évaluation de systèmes de culture avec le calculateur rapide lors d'un atelier de conception de systèmes de culture économes en herbicides avec des agriculteurs. Le prototype P proposé par les agriculteurs était meilleur que le système de référence actuel, sauf pour la pollution de la récolte. Comme ce système ne correspondait pas totalement aux objectifs des agriculteurs, ces derniers ont suggéré et testé des améliorations en direct au cours de l'atelier comme des lentilles à la place de la luzerne ou le semis direct des orges de printemps. L'utilisation des lentilles améliore la biodiversité par rapport au prototype B, mais augmente la perte de rendement uniquement par rapport au système de culture de référence. Les effets du semis direct sont peu marqués. En revanche, le semis de la luzerne dans l'orge, suivi par un tournesol, améliore les performances pour la production mais pas pour la biodiversité. Ce calculateur, évalué avec des données indépendantes, a montré une erreur de prédiction moyenne entre 0.15 et 0.30 selon les indicateurs, avec 0.30 d'erreur pour les pertes de rendement. Il permet de bien classer les systèmes de culture en fonction de leurs performances (coefficients de Pearson entre 0.37 pour la pollution de la récolte à 0.59 pour l'intensité d'utilisation d'herbicides), sauf pour les

pertes de rendement (coefficient de Pearson de 0.08). L'ajout de systèmes de culture aléatoires, qui parfois ne permettaient pas la pousse des cultures a contribué à des performances moins bonnes.

d. L'outil de diagnostic détaillé : FLORSYS

L'utilisation du modèle FLORSYS, bien que complexe, est intéressante dans le cas de la conception car les nombreuses variables d'état permettent de faire un diagnostic détaillé du système de culture testé, en recherchant par exemple les pratiques qui n'ont pas été suffisamment efficaces pour gérer les adventices à différentes étapes de la rotation. Cette utilisation du modèle est possible lorsqu'un atelier de conception de système de culture peut se dérouler en au moins deux séances, avec du temps entre les deux séances pour faire les simulations et un support des agriculteurs ou conseillers agricoles pour préciser les informations nécessaires pour l'entrée des systèmes de culture dans le modèle. Une formation au modèle FLORSYS est également nécessaire. L'outil a été mis en œuvre au cours de l'atelier de conception de systèmes de cultures économes en herbicides avec des agriculteurs de la Champagne humide. Ceux-ci avaient proposé au cours de l'atelier deux prototypes de systèmes de culture et des variantes. Le système de culture de référence, les prototypes et des variantes ont été simulés, évalués précisément, notamment en regardant de plus près le rendement de la culture et la production de semences adventices, afin de mieux comprendre les performances de production agricole. Ils ont été présentés aux agriculteurs qui ont pu tirer leurs conclusions sur les pratiques qu'ils avaient proposés, tout en imaginant de nouvelles améliorations aux prototypes des systèmes de culture.

DISCUSSION

Les interactions avec les futurs utilisateurs combinées à de la fouille de donnée sont la richesse de ce développement d'OAD, permettant le meilleur compromis entre les demandes des utilisateurs et les possibilités de la modélisation mécaniste basée sur des processus biophysiques. Les contributions des futurs utilisateurs étaient indispensables pour déterminer puis améliorer la structure de l'outil, notamment les entrées et les sorties. Ce travail d'amélioration est continu. Par exemple, les utilisateurs ont suggéré de nouvelles méta-règles de description des systèmes de culture. Certaines ont déjà été intégrées, comme le nombre d'opérations de travail du sol effectuées avec une bineuse, dans le but d'indiquer s'il est pertinent d'investir dans une bineuse. D'autres ont encore besoin d'un travail supplémentaire pour savoir évaluer leur impact sur les processus biophysiques et les concilier avec FLORSYS. Par exemple, les utilisateurs aimeraient simplement indiquer un semis tardif ou précoce plutôt qu'une date effective. Pour en évaluer l'impact biophysique, il faut transformer cette information qualitative en une variable quantitative, en tenant compte des spécificités des cultures et des régions (un semis précoce de blé en Bourgogne ne correspond pas à la même date qu'un semis précoce de blé en Bretagne). Les méta-règles de décision peuvent aussi paraître éloignées du processus de prise de décision des agriculteurs, car il n'y a pas d'ordre logique entre les actions contrairement à d'autres modèles de prise de décision (ex. irrigation du foin, Merot *et al.*, 2008). Cependant, ces méta-règles permettent à la fois de traduire les nombreuses possibilités de gestion d'un système de culture tout en étant le fruit du compromis utilisateur/modèle. Une amélioration possible serait l'adaptation au contexte local en se basant sur l'expertise des participants en jouant sur la complémentarité entre l'outil et le savoir expert.

DECIFLORSYS est fonctionnel, cependant il demande encore du travail, par exemple sur l'ergonomie, l'interaction de ses différentes composantes et le développement d'une vraie interface graphique. En l'état, le classement des pratiques importantes (Figure 2) est difficile à utiliser. D'ailleurs lorsque des conseillers agricoles ont utilisé DECIFLORSYS par eux-mêmes, ils ont préféré tester d'autres pratiques que celles identifiées par ce classement. Afin d'améliorer l'utilisation de ce guide, il serait intéressant d'y ajouter l'explication des effets de chaque pratique ou le sens de variation de l'effet. Cependant, ceci n'est pas toujours possible comme les pratiques interagissent et que l'effet d'une pratique donnée dépend souvent fortement des autres pratiques. Cela démontre d'ailleurs l'intérêt des arbres de décision pour voir l'effet des combinaisons des pratiques.

Les arbres de décision ont aussi leurs limites, par exemple dans l'arbre de décision (Figure 3), on remarque que l'IFT herbicide a tendance à être plus élevé chez les systèmes de culture de feuille SdC C, indiquant que d'autres pratiques que celles présentes dans l'arbre, comme l'utilisation d'herbicides totaux à la place de travaux du sol tardifs, peuvent expliquer les performances de ces systèmes SdC C. Il pourrait être intéressant d'exploiter les variables de substitution (surrogates) de l'arbre (Colbach and Cordeau, 2018), ce sont des variables explicatives alternatives au niveau des embranchements, le problème est que si les arbres gagnent en information, ils perdent en facilité de lecture et ne peuvent plus être générés automatiquement.

L'arbre est très utile pour identifier des pistes de conception de systèmes de culture mais il est bien moins performant pour évaluer les performances des systèmes. C'est ici qu'intervient le calculateur rapide qui permet de connaître immédiatement les conséquences de modifications dans le système. Cependant, le calculateur rapide seul n'est pas suffisant, car il n'explique pas les causes des performances des systèmes de culture, indispensable pour prendre les bonnes décisions sur le terrain. D'autre part, tout comme les arbres de décision il gomme des différences entre systèmes puisque derrière une même valeur de méta-règle (ex. 25% de cultures de printemps dans la rotation) peuvent se cacher une diversité de systèmes (ex. nature des cultures de printemps et hiver dans la rotation, ordre dans la rotation). C'est ici qu'intervient la complémentarité entre DECIFLORSYS et FLORSYS. 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, tester des options détaillées se cachant derrière une méta-règle etc.

Les différents outils présentés ici n'espèrent pas apporter la valeur exacte du rendement ou des ressources pour les abeilles mais ont pour but de comparer les performances des systèmes de culture entre eux afin d'être un support de discussion le plus objectif possible et de prise de décision. En effet, ces outils accompagnent le processus de conception, en permettant de prendre du recul sur les prototypes, en facilitant les discussions entre participants et en permettant l'association à la réflexion du savoir expert des conseillers et des agriculteurs (Van Inghelandt *et al.*, 2019). Le calculateur rapide ainsi que le classement des pratiques et l'arbre de décision ont été réunis dans une application en ligne, R-shiny. Cette application est accessible gratuitement en ligne, notamment pour les groupes d'agriculteurs et de conseillers participant au développement de l'outil. FLORSYS est disponible sur demande auprès des auteurs.

CONCLUSION

Afin d'aider à la conception de systèmes de culture permettant la gestion des adventices tout en prenant en compte leurs impacts sur la production agricole et leurs impacts sur l'environnement, nous avons développé ici un outil d'aide à la décision, DECIFLORSYS, composé de guides de conception et d'un évaluateur rapide de systèmes de culture synthétiques. Pour évaluer de façon détaillée les systèmes de culture, le modèle complexe FLORSYS est la meilleure solution. La conception avec utilisateurs et la simplification du modèle complexe étaient complémentaires afin de trouver des solutions conciliant au mieux les besoins et contraintes des futurs utilisateurs et du modèle. Cependant, en plus d'un travail pour insister sur l'articulation entre les outils et à quel moment les utiliser, un travail d'ergonomie et d'interfaçage est encore nécessaire. Enfin, une utilisation dans un cadre plus large de conception de systèmes de culture serait utile pour couvrir une plus large gamme de situations d'usage et continuer à améliorer les outils.

BIBLIOGRAPHIE

- Agro-Transfert Ressources et Territoires, OdERA-Systèmes.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Stone, C.J., Olshen, R.A., 1984. Classification and Regression Trees. CRC Press, New York.
- Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45(1) 5-32.

- Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., Meynard, J. M. (2012). Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (4), 899-910. , DOI : 10.1007/s13593-012-0091-z
- Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., McPherson, J., 2017. shiny: Web Application Framework for R, R package version 1.0.3 ed.
- Colas, F., Queyrel, W., Van Inghelandt, B., Villerd, J., Colbach, N. (2018). Un OAD pour la gestion agroécologique des adventices. *Phytoma. La Défense des Végétaux*, 719 (decembre), 14-18.
- Colbach, N., Collard, A., Guyot, S., Meziere, D., Munier-Jolain, N. (2014). Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *European Journal of Agronomy*, 53, 74 - 89. , DOI : 10.1016/j.eja.2013.09.019
- Colbach, N., Cordeau, S. (2018). Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy* 94, 67–78. DOI : 10.1016/j.eja.2017.12.008
- 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, 280-292. , DOI : 10.1016/j.ecolind.2017.05.070
- Gardarin, A., Durr, C., Colbach, N. (2012). Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecological Modelling*, 240, 123-138. , DOI : 10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004
- Marshall, E.J.P., Brown, V.K., Boatman, N.D., Lutman, P.J.W., Squire, G.R., Ward, L.K. (2003). The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields*. *Weed Research* 43, 77–89. DOI : 10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x
- Menalled, F.D., Gross, K.L., Hammond, M. (2001). Weed above ground and seedbank community responses to agricultural management systems. *Ecological Applications* 11, 1586–1601. DOI : 10.1890/1051-0761(2001)011[1586:WAASCR]2.0.CO;2
- Merot, A., Bergez, J.-E. (Auteur de correspondance), Capillon, A., Wéry, J. (2008). Analysing farming practices to develop a numerical, operational model of farmers' decision-making processes. *Agricultural Systems*, 98 (2), 108-118. , DOI : 10.1016/j.agsy.2008.05.001
- Meziere, D., Petit, S., Granger, S., Biju-Duval, L., Colbach, N. (2015). Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators*, 48 (0), 157-170. , DOI : 10.1016/j.ecolind.2014.07.028
- Munier-Jolain, N., Guyot, S., Colbach, N. (2013). A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies: Model structure and evaluation. *Ecological Modelling*, 250, 101 - 110. , DOI : 10.1016/j.ecolmodel.2012.10.023
- Munier-Jolain, N., Savoie, V., Kubiak, P., Maillet-Mézeray, J., Jouy, L., Quéré, L. (2005). DECID'Herb, a decision support system on the WEB, designed for sustainable weed management in cultivated fields, *13th International EWRS Symposium: Bari, Italy*.
- Rodriguez, A., Vuillemin, F., Brun, F. (2014). Guide ECOHERBI : des systèmes de culture pour réduire les herbicides, In: (2014-2015), A.L.R.d.I.d.f.a.e.v. (Ed.).
- Terres Inovia, Acta, Agrosup Dijon, Arvalis, Fnams, Inra, Itab, Itb, Infloweb - Connaître et gérer la flore adventice.
- Van Inghelandt, B., Queyrel, W., Cavan, N., Colas, F., Guyot, B., Colbach, N., 2019. Combiner expertise et modèles en ateliers de co-conception de systèmes de culture pour une gestion durable des adventices: apports méthodologiques et perspectives. Presented at the estion des adventices dans un contexte de changement-Séminaire CoSAC, Paris, France, pp. 39–41.
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 1–20. DOI : 10.1007/s13593-013-0180-7