

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

**MODÉLISER LES COUVERTS CULTURES : ADVENTICES POUR ÉTUDIER LE RÔLE DE LA
DIVERSIFICATION DES CULTURES DANS LES SYSTÈMES DE CULTURE AGROÉCOLOGIQUES**

N. COLBACH, F. COLAS, S. CORDEAU, T. MAILLOT, D. MOREAU, W. QUEYREL, J. VILLERD

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

Correspondance : Nathalie.Colbach@inra.fr

RESUME

La diversification des cultures est un levier majeur de gestion agroécologique des bioagresseurs. Ce papier illustre avec l'exemple de FLORSYS le rôle des modèles mécanistes de dynamique des adventices pour synthétiser les connaissances, les appliquer à la conception de systèmes de culture, et les transférer vers les acteurs. Des cas d'étude illustrent comment ce modèle sert à évaluer et promouvoir les bénéfices de la diversification des cultures en (1) identifiant les caractéristiques de cultures qui seraient idéales ("idéotypes") pour la gestion agroécologique des adventices, (2) traquant des stratégies de gestion basées sur la diversification des cultures dans des réseaux de parcelles agricoles, (3) évaluant ces stratégies proposées par des experts et acteurs pour des cas concrets, et (4) alimentant les réflexions lors d'ateliers de co-conception avec les agriculteurs. Ces exemples illustrent que les bénéfices de la diversification des cultures dépendent des situations de production et des systèmes de culture. Les règles encadrant la diversification des cultures doivent donc être flexibles et des modèles comme FLORSYS sont indispensables pour établir ces règles.

Mots-clé : interactions biologiques, conception de systèmes de culture, CIMS, association de cultures, idéotype

ABSTRACT

MODELLING CROP-WEED CANOPIES AS A TOOL TO INVESTIGATE THE ROLE OF CROP DIVERSIFICATION IN AGROECOLOGICAL CROPPING SYSTEMS

Crop diversification is a key lever for integrated crop protection. This paper illustrates with the example of the "virtual field" FLORSYS how mechanistic weed-dynamics models can be used to synthesize knowledge of crop diversification, to apply this knowledge to cropping-system design and to transfer it to stakeholders. Case studies illustrate how this model can be used to evaluate and promote the benefits of crop diversification by (1) identifying the crop features ("ideotypes") needed for agroecological weed management, (2) tracking crop-diverse strategies in farm-field networks, (3) identifying such strategies designed by experts and stakeholders, and (4) hosting participatory workshops with farmers. These examples demonstrate that the benefits of crop diversification depend on the production situation and the cropping systems. The rules for guiding crop diversification must therefore be flexible, and models such as FLORSYS are essential to establish these guidelines.

1 INTRODUCTION

La diversification des cultures (de rente et de services), dans le temps et dans l'espace, est un levier majeur de la protection intégrée. Il s'agit d'un des leviers à effet partiel qui permet de remplacer des pesticides hautement efficaces par une combinaison de techniques culturales partiellement efficaces (Liebman & Dyck, 1993). À cause de la multiplicité des techniques et combinaisons de techniques à évaluer et de leurs effets long terme, les modèles de simulation sont utilisés de plus en plus fréquemment pour évaluer et concevoir des systèmes de culture (Dury *et al.*, 2012). Ce sont aussi des outils performants pour synthétiser des connaissances produites par différentes équipes et disciplines.

Les modèles mécanistes de dynamique adventice sont particulièrement appropriés pour étudier la diversification de cultures car les adventices sont très nuisibles pour la production (Oerke, 2006), et la diversification des cultures est un levier majeur pour la gestion intégrée des adventices (Liebman &

Dyck, 1993). Mais surtout, les interactions plante-plante dans un mélange de cultures ou de variétés sont les mêmes que dans un couvert culture-adventice, et les cultures d'une année ont, tout comme les adventices, des arrière-effets sur les cultures à venir. Or, historiquement, les modèles de culture traitent de couverts génétiquement homogènes et fonctionnent à l'échelle annuelle (Keating & Thorburn, 2018), tandis que les modèles d'adventices sont nécessairement au moins bispécifiques, avec un focus sur les effets des techniques culturales à l'échelle pluriannuelle (Holst *et al.*, 2007) puisque les semences adventices survivent pendant plusieurs années dans le sol (Lewis, 1973).

Peu de modèles adventices (Holst *et al.*, 2007) sont adéquats pour analyser et implémenter la diversification des cultures. Les modèles idéaux doivent être plurispécifiques et pluriannuels, représenter l'hétérogénéité spatiale des couverts et inclure toutes les techniques culturales, y compris les interactions entre techniques et avec le pédoclimat. Ces modèles doivent être mécanistes pour faciliter la synthèse de connaissances sur les processus, fonctions et réponses. L'intérêt des modèles mécaniste est leur domaine de validité étendu (sans besoin de reparamétrage en cas de changement de région en France), et la prise en compte des processus sous-jacents aux effets des techniques qui rend les conclusions plus robustes. Les modèles mécanistes sont toutefois lents pour exécuter les simulations et peu ergonomiques pour les utilisateurs (Colbach, 2010). De plus, en tant qu'outils de recherche, il est essentiel de les adapter pour les rendre utiles et utilisables directement par les conseillers et agriculteurs (Prost *et al.*, 2012).

Cet article illustre avec le modèle FLORSYS (Gardarin *et al.*, 2012; Munier-Jolain *et al.*, 2013; Colbach *et al.*, 2014; Mézière *et al.*, 2015) comment un modèle mécaniste peut être utilisé pour évaluer et promouvoir les bénéfices de la diversification des cultures. Les cas d'étude présentés (1) identifient les caractéristiques de cultures qui seraient idéales ("idéotypes") pour la gestion agroécologique des adventices, (2) identifient des stratégies de gestion basées sur la diversification des cultures dans des réseaux de parcelles agricoles, (3) évaluent ces stratégies proposées par des experts et acteurs pour des cas concrets, et (4) alimentent les réflexions lors d'ateliers de co-conception avec les agriculteurs.

2 SYNTHÉTISER LES CONNAISSANCES SUR LES EFFETS DE LA DIVERSIFICATION DES CULTURES

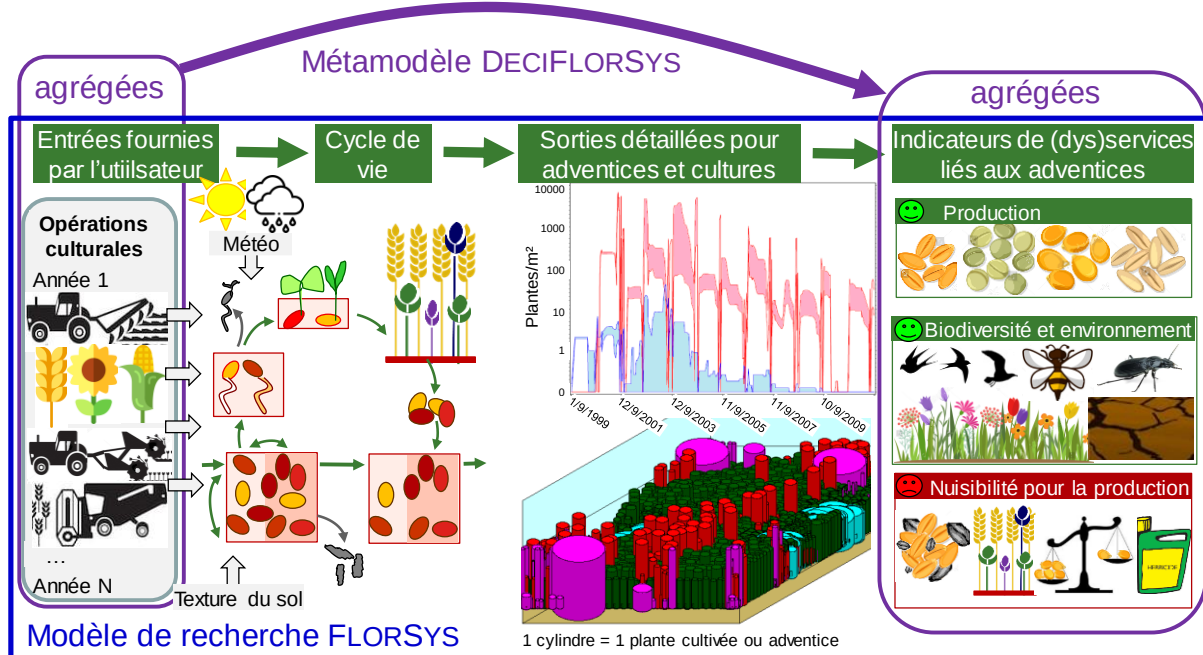
FLORSYS est une parcelle virtuelle où des systèmes de culture peuvent être testés et évalués en termes de production et de services et dys-services dus aux adventices. L'utilisateur entre une liste d'opérations sur une rotation similaire à l'enregistrement des opérations d'une parcelle d'une station expérimentale ou d'une exploitation agricole, le tout accompagné de la météo journalière et de caractéristiques du sol (Figure 1). Cette liste comprend toutes les opérations (travail du sol, semis, désherbage mécanique, fertilisation, pesticides, fauche, récolte) décrites en détail en termes de dates et options (par exemple pour une opération de semis : date, densité, profondeur, largeur inter-rang, orientation, semoir, espèces et variétés, traitement de semences, impureté dans le lot de semences).

Ces données d'entrées affectent le cycle de vie des cultures et adventices en fonction de différents processus (survie, dormance, germination des semences ; levée, développement et croissance des plantes). Ces processus sont modulés en fonction des techniques culturales, des caractéristiques biologiques de chaque semence ou plante, et de leur environnement qui dépend lui-même du pédoclimat, des techniques culturales et de la présence de plantes voisines. La version actuelle de FLORSYS ne considère que la compétition plante-plante pour la lumière, celle pour l'azote est en cours d'intégration. Cette représentation détaillée produit des sorties détaillées, au jour le jour et en 3D, permettant de diagnostiquer les performances d'une technique ou d'un système. Le modèle permet ainsi de tester la diversification des cultures dans le temps et dans l'espace, en simulant différentes rotations (y compris les plantes de services en interculture) et mélanges de culture (y compris les plantes services associées aux cultures de rente).

Le modèle est actuellement paramétré pour 26 espèces adventices fréquentes et contrastées ainsi que 33 espèces cultivées (de rente et de service) de grandes cultures. Pour inclure une telle diversité dans FLORSYS, une représentation générique du cycle de vie est nécessaire, c'est-à-dire une représentation valable pour n'importe quelle espèce (cultivée/adventice, mono/dicot...). Dans FLORSYS, chaque espèce, qu'elle soit cultivée ou adventice, est décrite par une combinaison de paramètres qui rendent compte de ses caractéristiques biologiques (ex. taux de mortalité des semences, température de base, hauteur de plante par unité de biomasse en l'absence d'ombrage à plusieurs stades-clé, efficience de la photosynthèse, sensibilité à différents herbicides etc.). La mesure

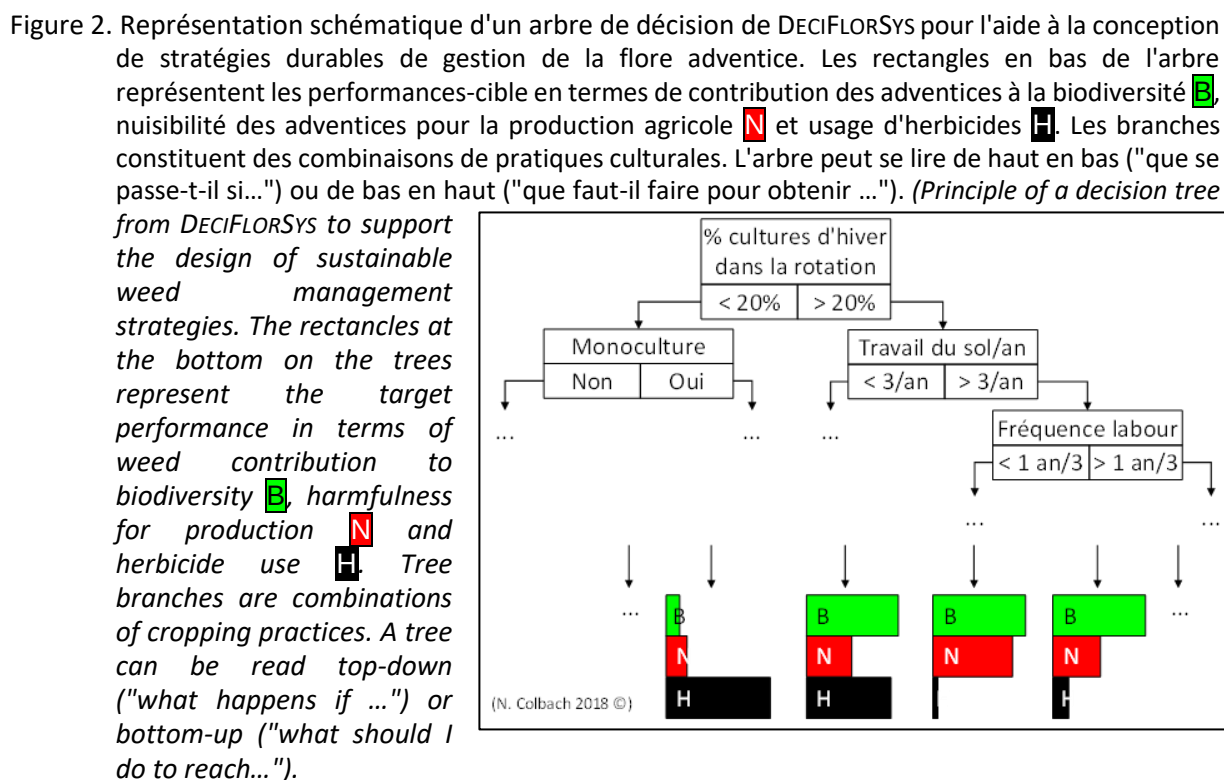
de ces paramètres nécessite des expérimentations relativement lourdes. Pour faciliter l'ajout de nouvelles espèces dans FLORSYS, nous avons donc développé une nouvelle méthode d'estimation des paramètres à partir de traits et caractéristiques faciles à obtenir (ex. estimer l'allongement de la plante pendant la phase pré-levée à partir de la masse des semences).

Figure 1. Présentation générale du (1) modèle de recherche FLORSYS (rectangle bleu) qui simule le développement et la croissance des cultures et adventices à partir du système de culture, la météo et du sol, avec une représentation mécaniste des processus biophysiques au jour le jour et en 3D, (2) du métamodèle DECIFLORSYS (cadres et flèches violets) qui calcule directement les (dys)services fournis par les adventices à partir des entrées de systèmes de culture (Colas *et al.*, 2016; Colas *et al.*, 2019) (General representation of (1) the "virtual field" model FLORSYS (blue rectangle) which simulates the development and growth of crops and weeds from cropping system, weather and soil inputs based on a mechanistic representation of biophysical processes at a daily time step and in 3D, (2) the metamodel DECIFLORSYS (purple rectangles and arrows) which directly calculates weed (dis)service indicators from inputs) (Nathalie Colbach © 2018)



Pour simplifier la comparaison de différents systèmes de culture, les sorties détaillées sont traduites en indicateurs de (dys)services des adventices (ex. perte de rendement de la culture, offre trophique pour abeilles). Malgré cette agrégation, FLORSYS reste un modèle de recherche. Pour faciliter le transfert vers les acteurs, nous avons transformé FLORSYS en un outil plus simple (DECIFLORSYS) imitant le fonctionnement du modèle de recherche ("métamodélisé"). Ces deux étapes, basées sur des analyses de sensibilité et de la fouille de données, réalisées avec des conseillers et agriculteurs pour s'assurer que les indicateurs et le nouvel outil d'aide à la décision répondent à leurs besoins et contraintes. Le nouvel outil, DECIFLORSYS, est composé (1) d'une grille de conseils classant les techniques culturales en fonction de leur impact sur les (dys)services liés aux adventices, (2) des arbres de décision pour répondre à la question : "quelles combinaisons de pratiques pour atteindre l'objectif X ?", (3) d'un calculateur évaluant instantanément la performance des systèmes de culture en termes de (dys)services des adventices (Colas *et al.*, 2016; Colas *et al.*, 2019).

FLORSYS a été évalué ("validé") à dire d'experts et en comparaison à des observations de terrain d'adventices (densité, biomasse, stock semencier) et de cultures (densité, biomasse, rendement) dans une large gamme de systèmes et de pédoclimats (Colbach *et al.*, 2016). Généralement, le rendement, les stocks semenciers, les densités adventices observés sont correctement prédits et classés en fonction des systèmes de culture et espèces, surtout à l'échelle de la rotation. La densité adventice tend à être surestimée en l'absence de tout travail du sol. La version actuelle du modèle ne prend en compte que partiellement l'effet de la sécheresse.



3 ÉVALUER LES BÉNÉFICES DE LA DIVERSIFICATION DES CULTURES

Au fil des années, FLORSYS et son dérivé DECIFLORSYS ont été utilisés dans des études de simulation pour répondre à différentes questions liées à la diversification des cultures.

3.1 Les caractéristiques optimales des cultures de diversification : recherche d'idéotypes

Afin de déterminer les caractéristiques biologiques des cultures qui déterminent la production en présence ou absence d'adventices, 272 systèmes de 7 régions ont été collectés à partir d'enquêtes auprès d'agriculteurs, du réseau Biovigilance-Flore, conseillers agricoles etc. Ces systèmes varient en termes de rotation, niveau d'usage d'herbicides, travail du sol etc. (Colbach *et al.*, 2019). Deux séries de simulations étaient réalisées pour chaque système : une utilisant un ensemble d'adventices représentatif du pool régional (donnant le rendement de la culture en présence d'adventices), et une sans adventices (donnant le rendement potentiel de la culture en l'absence d'adventices). La comparaison des deux donne la perte de rendement due à la compétition par les adventices. Chaque système était simulé sur 30 ans consécutifs et répété avec 10 scénarios climatiques.

Les résultats montrent que les combinaisons optimales de valeurs de paramètres des cultures ("idéotypes") dépendent de l'objectif visé (Tableau I). Le rendement potentiel (donc en situation sans adventices) est plus élevé dans des cultures qui ont de faibles exigences hydrothermiques, ce qui leur permet un démarrage plus rapide. Des feuilles petites et épaisses, concentrées vers le haut de la plante, des plantes poussant verticalement plutôt que latéralement et une faible réponse à l'ombrage produisent des couverts homogènes, avec des plantes étroites et hautes, évitant d'ombrer les voisins. Parmi les cultures testées dans la simulation, le blé cv Caphorn était l'espèce la plus proche de cet idéotype. Au contraire, la perte de rendement due aux adventices est la plus faible dans des cultures qui ombrent beaucoup (larges feuilles, large plantes) et qui répondent fortement à l'ombrage (ex. colza). Ces résultats permettent d'identifier des espèces et variétés à combiner dans une rotation, en termes de productivité et de compétitivité vis-à-vis des adventices. Mais ce raisonnement doit aussi tenir compte du risque d'adventices pour les cultures suivantes qui diminuait ici essentiellement avec le raccourcissement de la durée du cycle cultural et l'augmentation des exigences thermiques. En d'autres mots, les cultures de printemps réduisaient le plus le risque pour les cultures futures (ex. lin de printemps).

Tableau I : Les paramètres de cultures déterminant la production de la culture et la nuisibilité des adventices (perte de production entre des situations avec ou sans adventices). Corr.: Coefficients de corrélation de Pearson (> 0.35 en valeur absolue) entre paramètres et rendement potentiel ou perte de rendement due aux adventices à l'échelle annuelle sur 272 systèmes de culture x 30 ans x 10 séries climatiques (basé sur Colbach *et al.*, 2019) (*Crop parameters driving crop production and yield loss due to weeds. Corr. = Pearson correlation coefficients (> 0.35 in absolute values) between parameters and potential yield or yield loss at annual scale in 272 cropping systems x 30 years x 10 weather series*)

	Paramètre de culture	Unité	Rendement potentiel (MJ/ha)		Perte de rendement (T/T)	
			Corr.	Profil idéal	Corr.	Profil idéal
Besoins écologiques	Température de base	°C	-0.43			
	Potentiel hydrique de base	MPa	-0.82			
Morphologie en l'absence d'ombrage	Surface foliaire spécifique [§] – phase végétative	cm ² /g	-0.50		-0.45	
	Surface foliaire spécifique – reproduction	cm ² /g	-0.80			
	Largeur spécifique des plantes ^{&}	cm/g	-0.82		-0.44	
	Ratio biomasse foliaire [#] – reproduction	g/g	-0.77			
	Hauteur médiane des feuilles [@] – reproduction	m ² /m ²	0.77			
	Hauteur de plante maximum	cm	-0.57			
	Largeur de plante maximum	cm	-0.51			
Réponse à l'ombrage : capacité à accroître la...	Hauteur spécifique des plantes ^φ – après levée		-0.82		-0.36	
	Hauteur spécifique des plantes – reproduction		-0.73			
	Hauteur médiane des feuilles – après levée		-0.57			
	Surface foliaire spécifique – phase végétative		-0.78		-0.37	

[§] Surface foliaire par unité de biomasse foliaire ; [&] Largeur de plante par unité de biomasse aérienne ; [#] Biomasse foliaire par unité de biomasse aérienne ; [@] Hauteur relative de la plante sous laquelle se trouve 50% de la surface foliaire de la plante ;

^φ Hauteur de plante par unité de biomasse aérienne

3.2 Traquer des stratégies de gestion des adventices avec une forte diversité culturelle

L'étude précédente montrait que les caractéristiques des cultures déterminaient seulement une petite partie de la performance des systèmes de culture (résultats non montrés). Ici, nous illustrons trois approches d'utilisation de FLORSYS pour combiner des cultures dans le temps et l'espace et identifier les pratiques de gestion des adventices adaptées.

Réseau de parcelles agricoles virtuelles. L'étude de simulation du chapitre 3.1 permet de réaliser des mesures virtuelles sur de nombreuses années et avec différents climats sur des pratiques agricoles existantes pour traquer l'innovation chez les agriculteurs. Au lieu de lier des paramètres de culture aux performances des systèmes, ce sont les combinaisons de techniques culturales que nous avons liées aux performances. Cette analyse a démontré l'importance de la diversité de cultures pour contrôler les adventices avec peu d'herbicides (Tableau II). Trois stratégies ont été identifiées. La stratégie S1 comprenait des monocultures de maïs et comptait fortement sur des traitements herbicides à doses réduites et du désherbage mécanique pour contrôler les adventices. La stratégie S2 était basée sur des rotations diversifiées dans le temps (durant au moins 4 ans) et dans l'espace (avec des mélanges de cultures et/ou des couverts d'interculture), comprenant à la fois des cultures d'hiver et d'été. Cette diversité, combinée avec du travail du sol fréquent et du labour occasionnel a permis de réduire l'intensité d'usage herbicide. La stratégie S3 allait encore plus loin dans la diversification des cultures, en réduisant la part des cultures d'hiver au profit de prairies temporaires. La durée annuelle du couvert cultivé était cependant plus courte, laissant plus de temps au faux semis et au labour.

Tableau II : Typologie de systèmes de culture d'agriculteurs en fonction de leur performance en termes de réduction de la perte de rendement due aux adventices (< 20%) et de l'usage d'herbicides (IFT < 1.2). Pratiques principales des trois meilleures stratégies identifiées avec des arbres de classification parmi 272 systèmes de culture de 7 régions et simulés avec FLORSYS sur 30 ans et 10 séries climatiques (basé sur Colbach & Cordeau, 2018) (*Typology of farmers' cropping systems based on performance in terms of reduced yield loss (< 20%) and reduced herbicide use (TFI < 1.2). Main practices of the 3 best strategies identified with classification trees on 272 cropping systems from 7 regions and simulated with FLORSYS over 30 years and 10 weather repetitions*)

		Stratégie	S1	S2	S3
Rotation	% cultures d'hiver		0%	25-75%	15%-64%
	% cultures de printemps		100% (maïs)	25-75%	> 36%
	% prairies temporaires		0%	< 20%	> 20%
	Nombre de cultures & variétés		1	> 4	§
	Durée du couvert cultivé (/an)		< 6 mois	> 8.3 mois	< 8 mois
Travail du sol	Opérations superficielles/an		< 3.4	> 3.4	> 3.4
	En été / an (avril-sept)		< 2.4	> 2.4	> 2
	1 ^{ère} opération (depuis récolte)		> 24 jours	< 24 jours	
	Fréquence de labour		< 1 an / 2	< 1 an / 2	
	Fréquence de labour oct-mars			> 1 an / 5	> 1 an / 3
Herbicides	1 ^{er} herbicide (depuis semis)		< 5 mois	< 5 mois	
	Dose (% dose pleine)		31-58%	< 58%	
	Nombre de produits par an		1.3-3	1.3-2.1	
	Variable entre années		Non	Oui	
	% Systémique Racinaire		> 82% < 12%	< 82% < 12%	< 83%
Désherbage mécanique	Opérations par an		0.25-1.6	0.25-1.6	
	Variable entre années		Oui	Oui	

§ Les cellules vides indiquent que les systèmes de la stratégie n'ont rien en commun pour cette technique

Tableau III : Impact des adventices sur la biodiversité et la production dans un essai "système" simulé avec FLORSYS sur 30 ans et 10 séries climatiques. Les chiffres d'une colonne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différents à p=0.05 (*Weed impact on biodiversity and crop production in a system trial simulated with FLORSYS over 30 years and 10 weather repetitions. Numbers of a column followed by the same letter are not significantly different at p=0.05*)

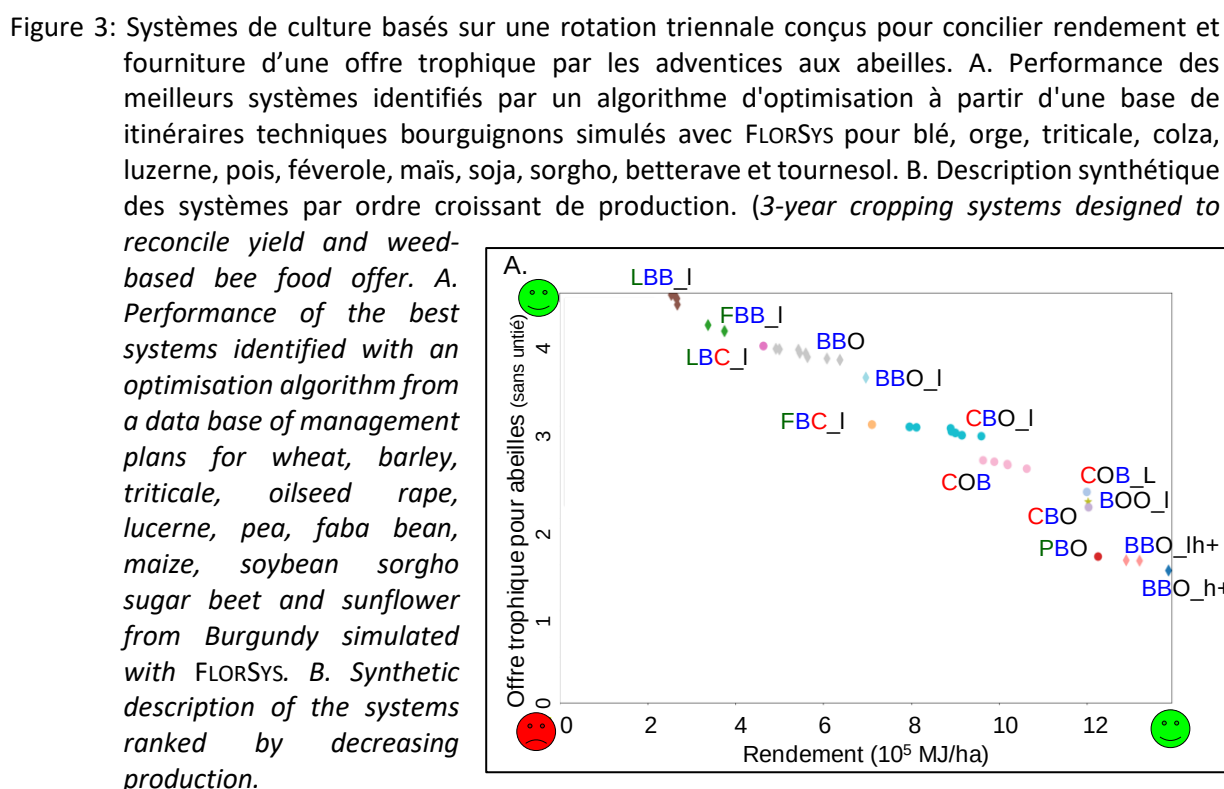
Système de culture [§]	Diversité de cultures sur 12 ans			Intensité d'usage herbicide (IFT)	Rendement (MJ/ha)	Impact des adventices			
	Nombre d'espèces & variétés	% cultures d'hiver	% années avec couvert d'interculture			Perte de rendement (%)	Offre trophique pour abeilles		
Référence	4	100%	8%	1.6	63563	c	50.9	d	2.30
PIC-simplifié	18	77%	39%	1.7	51067	ed	58.4	c	2.42
PIC-intermédiaire	10	63%	8%	0.8	54443	d	55.3	dc	2.74
PIC-complet	8	55%	0%	0.7	67402	bc	40.9	fe	2.05
PIC - sans herbicide	12	63%	16%	0	69077	bc	50.5	d	2.10

§ Les scénarios PIC (protection intégrée des cultures) sont : *simplifié* (sans labour ni désherbage mécanique, peu de travail du sol, herbicides), *intermédiaire* (labour, travail du sol, sans désherbage mécanique, herbicides), *complet* (labour, travail du sol, désherbage mécanique, herbicides), *sans herbicides* (labour, travail du sol, désherbage mécanique, sans herbicides).

Évaluer des prototypes proposés par des experts. FLORSYS peut être utilisé pour évaluer des systèmes de culture prospectifs conçus par des experts et acteurs (notamment les agriculteurs, chapitre 3.3) ou résultant de nouvelles réglementations (Tableaux III et IV). Les simulations peuvent compléter alors des essais *système*, en allant plus loin dans le temps tout en étant plus rapides, accédant à des mesures impossibles ou difficiles sur le terrain (ex. : offre trophique pour les abeilles par les adventices) et augmentant la généricité des résultats en testant avec différentes séries climatiques. Le Tableau III montre par exemple que le système avec la meilleure performance en termes de rendement (élevé) et de perte de rendement (faible) n'utilisait pas d'herbicides mais était basé sur une forte diversité de cultures en termes d'espèces et variétés, saisons de semis et fréquence de plantes de service (PIC – sans herbicides). Une diversité d'espèces n'est cependant pas suffisante sans travail du sol et sans diversité de saisons de semis (PIC-simplifié). De plus, une forte diversité de cultures n'assure pas nécessairement une forte biodiversité sauvage, comme illustré par l'offre trophique pour abeilles.

Tableau IV : Cas d'étude utilisant FLORSys pour étudier la diversification des cultures, avec les conclusions majeures (*Case studies using FLORSys to study crop diversification, with main conclusions*)

Sujet: évaluer l'effet de...	Méthode : comparer des scénarios de systèmes de culture		Conclusions majeures	Références
	Basés sur	Différents en termes de ...		
A. Identifier des idéotypes multiperformants				
Traits des cultures et variétés	Cultures et pratiques agricoles existantes	Traits des cultures et variétés, situation de production, systèmes agricoles, diversité de cultures, pratiques de gestion	Les caractéristiques biologiques des cultures qui maximisent le rendement potentiel (en l'absence d'adventices) sont différentes de celles qui favoriser l'étouffement des adventices	Tableau I
B. Traquer des solutions avec forte diversification de cultures parmi les pratiques agricoles	Pratiques agricoles existantes	Situation de production, systèmes agricoles, diversité de cultures, pratiques de gestion		
Intensité d'usage herbicides des agriculteurs			Plusieurs stratégies contrastées en termes de diversité de cultures concilient faible usage herbicide et faible perte de rendement	Tableau II
C. Ex ante evaluation of innovations proposed by experts				
Protection Intégrée des Cultures	Essai système	Diversité de cultures, intensité de travail du sol, désherbage mécanique, herbicides (Bourgogne, dominante de colza et céréales d'hiver)	La diversification de cultures (espèces/variétés, alternance de saisons de semis, plantes de service, prairies temporaires) compense la réduction d'usage herbicides mais ne garantit pas une forte biodiversité sauvage	Tableau III
Motifs de semis du blé d'hiver	Experts	Couverts d'interculture, interrang, date et densité de semis, association féverole (Bourgogne, rotation colza/blé/orge)		
Prototypes	Agriculteurs	Diversité de cultures, travail du sol, désherbage mécanique (Champagne crayeuse, rotation colza - céréales)	Associer des cultures pendant une seule année réduit la perte de rendement dans plusieurs cultures à venir, les couverts d'inter-culture peuvent augmenter la perte si elles empêchent le faux semis	(Colbach et al., 2014)
Assolement	Experts	Assolement dans un îlot de parcelles (Aquitaine, rotation à base de maïs)	La diversification des cultures réduit la perte de rendement due aux adventices, la performance des rotations incluant des cultures pluri-annuelles est meilleure que celle incluant des associations de cultures	(Van Inghelandt, 2018)
D. Évaluation ex ante d'innovations résultant de changement de réglementations				
Autorisation de nouveaux types de variété de maïs	Statistiques agricoles, conseillers	Diversité de cultures, variétés de maïs, changement de pratiques accompagnant les nouvelles variétés (Aquitaine, Catalogne, rotation à base de maïs)	La diversité de cultures augmente les (dys)services liés aux adventices	(Colbach et al., 2018)
Bandes enherbées	Experts	Diversité de cultures et bandes enherbées dans un îlot de parcelles (Aquitaine, rotation à base de maïs)	Les rotations simplifiées et la simplification du travail du sol augmentent les (dys)services des adventices, les couverts d'interculture les réduisent	(Colbach et al., 2017)
E. Optimisation à base d'algorithmes pour atteindre des objectifs contrastés				
Rotation triennale à base de céréales à paille	Algorithme	Rotation et itinéraires techniques (Bourgogne, rotations à base de céréales à paille)	10% de bandes enherbées peuvent compenser la monoculture et sont plus efficaces que la diversification des cultures pour concilier production et biodiversité	(Colbach et al., 2018)
Le plan de simulation consistait à simuler chaque système de culture sur 10-30 ans, avec 10 scénarios climatiques différents. La perte de rendement due aux adventices était la différence relative du rendement en grains dans les simulations avec vs sans adventices.			Les monocultures de blé maximisent la production au détriment de la biodiversité, les rotations les plus diverses présentent une production et une biodiversité intermédiaire	Figure 3



B.	Rotation	Gestion de l'interculture [§]							Herbicides	Désher-
Système de culture [§]	Nombre d'espèces	Fabacées (%)	Céréales (%)	Broyage de résidus	Labour	Travail superficiel ^{&}	Rou-leau	Glyphosate	sur culture de rente ^{&}	bage mécanique
LBB_I	2	33	66	1 an/3	1 an/3	1/an	2 ans/3	0	1.33/an	0
FBB_I	2	33	66	1 an /3	1 an/3	1.33/an	2 ans/3	0	1.33/an	3 an/3
LBC_I	3	33	33	1 an /3	1 an/3	1.33/an	3 ans/3	1 an/3	1.33/an	0
BBO	2	0	100	0	0	1.67/an	1 an/3	1 an/3	2.66/an	0
BOO_I	2	0	100	0	1 an/3	4.33/an	0	2 ans/3	2.66/an	2 an/3
FBC_I	3	33	33	1 an /3	1 an/3	2.66/an	2 ans/3	0	1.67/an	3 an/3
CBO_I	3	0	66	0	1 an/3	4/an	1 an/3	1 an/3	2.33/an	2 an/3
COB	3	0	66	0	0	3/an	1 an/3	1 an/3	3/an	0
COB_I	3	0	66	0	1 an/3	4.33/an	1 an/3	2 ans/3	2.33/an	2 an/3
BBO_I	2	0	100	1 an /3	1 an /3	2/an	1 an/3	1 an/3	2.66/an	0
CBO	3	0	66	0	0	2/an	0	1 an/3	3/an	0
PBO	3	33	66	0	0	3.66/an	0	2 ans/3	2.66/an	0
BBO_lh+	2	0	100	0	1 an /3	3.66/an	2 ans/3	3 ans/3	3.33/an	0
BBO_h+	2	0	100	0	0	3.66/an	0	1 an/3	3.33/an	0

[§] B=blé, O=orge, T=triticale, C=colza, L=luzerne, P=pois, F=féverole; h+= plus fort usage d'herbicides que dans les autres rotations BBO; l= labour. [§] Aucun système sélectionné n'inclue des plantes de service. [&] Nombre d'opérations par an moyenné sur la rotation.

Dans l'exemple précédent, les prototypes testés étaient conçus par des experts (scientifiques, conseillers, agriculteurs). Ceux-ci sont imbattables pour optimiser des techniques individuelles dans un lieu donné pour un objectif à court terme. En revanche, ils ne peuvent pas jongler avec toutes les techniques pertinentes à l'échelle pluriannuelle pour la gestion des adventices, tenant compte des (dys)services multiples. Pour éviter que les systèmes innovants soient limités par l'imagination des experts, FLORSYS peut être combiné avec des algorithmes d'optimisation. Cette approche consiste à démarrer d'un ensemble de systèmes diversifiés, existants ou construits au hasard, à (1) les évaluer avec FLORSYS, puis (2) à se servir de cette évaluation pour les ajuster afin de les rapprocher de l'objectif défini par l'utilisateur. Les systèmes modifiés sont à nouveau évalués puis ajustés, et ainsi de suite. L'algorithme d'optimisation automatise ce processus. L'exemple de la Figure 3 avait comme objectif

d'identifier des rotations triennales qui concilient forte production et forte offre trophique pour abeilles fournie par les adventices. Les monocultures de céréales y maximisaient le rendement au détriment de la biodiversité (en bas à droite de la Figure 3) tandis que les rotations à base de légumineuses tendaient à améliorer cette biodiversité (en haut à gauche). Les rotations avec la plus grande diversité culturale sont plutôt au milieu, présentant à la fois une production et une biodiversité intermédiaire. Cependant, la performance des systèmes dépendait aussi fortement de l'itinéraire technique. Par exemple, le labour augmentait la production au détriment de la biodiversité dans certaines rotations (BBO, blé/blé/orge) tandis que l'inverse arrivait dans d'autres (CBO, colza/blé/orge).

3.3 Promouvoir la diversification des cultures

Les innovations proposées par la recherche sont fréquemment ignorées par les agriculteurs car incompatibles avec leurs contraintes (Meynard *et al.*, 2018) ou leur perception et gestion du risque (Wilson *et al.*, 2008). Les conseillers peuvent aussi être réticents pour promouvoir des ruptures dans les systèmes (Pasquier & Angevin, 2017). Dans ce contexte, les modèles sont des outils pédagogiques essentiels pour promouvoir des connaissances et innovations via des formations, des ateliers participatifs et des jeux de rôle (Martin *et al.*, 2011; Hossard *et al.*, 2013). Ceci est particulièrement le cas d'outils simplifiés comme DECIFLORSYS (Colas *et al.*, 2019).

Les ateliers de co-conception comportent plusieurs étapes (Van Inghelandt, 2018). (1) Les objectifs et contraintes des agriculteurs sont identifiés, notamment les cultures acceptables pour la diversification, ainsi qu'un système de culture de référence (dans cet exemple, une rotation colza et céréales fortement infestées par des graminées automnales). (2) Des alternatives sont proposées par différents groupes d'agriculteurs, travaillant avec le jeu de plateau MISSION ECOPHYT'EAU® (<http://www.agriculture-durable.org/ressources/mission-ecophyteau/>) et les arbres de décision de DECIFLORSYS. Ces systèmes alternatifs sont immédiatement évalués avec le calculateur de DECIFLORSYS, stimulant ainsi des nouvelles propositions de systèmes. (3) FLORSYS était utilisé hors atelier (car trop lent) pour diagnostiquer les systèmes et ajuster finement les pratiques en termes de dates et options. (4) Les résultats de ces simulations sont présentés lors d'une nouvelle journée d'atelier, stimulant encore des nouvelles propositions de systèmes.

En plus des prototypes et de leurs performances prédites par nos outils, ces ateliers ont contribué à éliminer quelques fausses idées que les agriculteurs et conseillers se faisaient, notamment sur le rôle de la diversification des cultures et son effet sur la dynamique adventice. La nécessité d'évaluer les stratégies de gestion à une échelle pluriannuelle, et de considérer les effets de la météo sur l'efficacité des pratiques figurent parmi les conclusions majeures pour les agriculteurs. Les ateliers ont aussi montré aux chercheurs la demande des agriculteurs pour des explications des causes des performances des systèmes de culture, ce qu'un outil d'aide à la décision comme DECIFLORSYS, contrairement à FLORSYS, ne peut pas fournir.

4 CONCLUSION

FLORSYS permet de synthétiser des connaissances provenant de différentes équipes et disciplines, facilitant ainsi leur transfert vers les acteurs et offrant des outils pour déterminer des règles de diversification adaptées aux différentes situations de production et contraintes des agriculteurs. Malgré la complexité actuelle de FLORSYS, le travail de recherche continue pour y intégrer des processus liés à des techniques innovantes et des évolutions de pratiques (ex. compétition pour l'azote et réduction de la fertilisation azotée).

Les cas d'étude ont démontré que généralement (1) la diversification des cultures est essentielle pour réguler les adventices avec peu ou pas d'herbicides, (2) même si un choix judicieux des paramètres des cultures est essentiel, il est futile sans intégration dans un système de culture raisonné et adapté, (3) beaucoup de conclusions sur la diversification des cultures n'ont qu'une valeur locale (Tableau IV), ce qui démontre la nécessité pour les règles flexibles et le rôle des modèles comme FLORSYS et des algorithmes d'optimisation pour établir ces règles.

5 BIBLIOGRAPHIE

- Colas F., Cordeau S., Jeuffroy M.-H., Granger S., Queyrel W., Pointurier O., Rodriguez A., Villerd J. & Colbach N., 2016. Développement d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des adventices. In: AFPP, editor. AFPP - 23ème Conférence du COLUMA - Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France, 467-476
- Colas F., Villerd J. & Colbach N., 2019. Simplification d'un modèle complexe pour le développement d'un modèle d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventice. In: Végéphyll – 24e conférence du COLUMA - Journées Internationales sur la Lutte Contre Les Mauvaises Herbes, Orléans, France
- Colbach N., 2010 - Modelling cropping system effects on crop pest dynamics: how to compromise between process analysis and decision aid. *Plant Science*, 179, 1-13.
- Colbach N., Collard A., Guyot S. H. M., Mézière D. & Munier-Jolain N. M., 2014 - Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *European Journal of Agronomy*, 53, 74-89.
- Colbach N., Bertrand M., Busset H., Colas F., Dugué F., Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N. M., Noilhan C., Strbik F. & Gardarin A., 2016 - Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. *Environmental Modelling & Software*, 86, 184-203.
- Colbach N., Darmency H., Fernier A., Granger S., Le Corre V. & Messéan A., 2017 - Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. II. Effect on weed impacts on crop production and biodiversity. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 13121-13135.
- Colbach N. & Cordeau S., 2018 - Réduire les herbicides sans perte de rendement. *Phytoma*, 717, 8-12.
- Colbach N., Cordeau S., Garrido A., Granger S., Laughlin D., Ricci B., Thomson F. & Messéan A., 2018 - Landsharing vs landsparring: How to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 203-217.
- Colbach N., Gardarin A. & Moreau D., 2019 - The response of weed and crop species to shading: which parameters explain weed impacts on crop production? *Field Crops Research*, 238, 45-55.
- Dury J., Schaller N., Garcia F., Reynaud A. & Bergez J. E., 2012 - Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 567-580.
- Gardarin A., Dürr C. & Colbach N., 2012 - Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecological Modelling*, 240, 123-138.
- Holst N., Rasmussen I. A. & Bastiaans L., 2007 - Field weed population dynamics: a review of model approaches and applications. *Weed Research*, 47, 1-14.
- Hossard L., Jeuffroy M. H., Pelzer E., Pinochet X. & Souchere V., 2013 - A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Environmental Modelling & Software*, 48, 17-26.
- Keating B. A. & Thorburn P. J., 2018 - Modelling crops and cropping systems—Evolving purpose, practice and prospects. *European Journal of Agronomy*, 100, 163-176.
- Lewis J., 1973 - Longevity of crop and weed seeds: survival after 20 years in soil. *Weed Research*, 13, 179-191.
- Liebman M. & Dyck E., 1993 - Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological applications*, 3, 92-122.
- Martin G., Felten B. & Duru M., 2011 - Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling and Software*, 26, 1442–1453.
- Meynard J. M., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M. B., Charlier A. & Messeean A., 2018 - Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 13.
- Mézière D., Petit S., Granger S., Biju-Duval L. & Colbach N., 2015 - Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators*, 48, 157-170.
- Munier-Jolain N. M., Guyot S. H. M. & Colbach N., 2013 - A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies. Model structure and evaluation. *Ecological Modelling*, 250, 101-110.
- Oerke E.-C., 2006 - Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144, 31-43
- Pasquier C. & Angevin F., 2017. Freins et leviers à la réduction de l'usage d'herbicides en grande culture. In: N. Colbach, D. Moreau, F. Angevin, A. Rodriguez, S. Volan & F. Vuillemin, editors. Gestion des adventices dans un contexte de changement : Connaissances, méthodes et outils pour l'élaboration de stratégies innovantes, Séminaire de restitution à mi-parcours du projet de recherche ANR CoSAC, Paris, France, 67-69
- Prost L., Cerf M. & Jeuffroy M. H., 2012 - Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 581-594.
- Van Inghelandt B., 2018. *Comment combiner prototypage et modèles en ateliers de co-conception de systèmes de culture pour atteindre une gestion agroécologique des adventices?* Rapport de Master, AgroParisTech, Paris, France. 55 p.
- Wilson R. S., Tucker M. A., Hooker N. H., LeJeune J. T. & Doohan D., 2008 - Perceptions and beliefs about weed management: perspectives of Ohio grain and produce farmers. *Weed Technology*, 22, 339-350.