

Agronomie

environnement & sociétés



**Démarches cliniques
en agronomie
et outils pour les agriculteurs
Et leurs conseillers**

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : afa@inrae.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Antoine MESSÉAN, président de l'Afa, Ingénieur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Christine RAWSKI, Rédactrice en chef Cahiers Agricultures, Cirad

Guy TRÉBUIL, chercheur Cirad

Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Héloïse BOURREAU, ingénierie à la Bergerie de Villarceaux
- Camille DUMAT, enseignante chercheuse à l'ENSAT/INPT
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- Laure HOSSARD, ingénierie de recherche Inra Sad
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Antoine MESSEAN, Ingénieur de recherches, Inra
- Adeline MICHEL, Ingénierie du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Marc MIQUEL, consultant
- Bertrand OMON, Chambre d'agriculture de l'Eure
- Thierry PAPILLON, enseignant au lycée agricole de Laval
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
- Bruno RAPIDEL, Cirad
- Jean-Marie SERONIE, consultant

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistante éditoriale

Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément
(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Péodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

P-7- Avant-propos

A. MESSÉAN (Président de l'Afa) et O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef)

P-9- Éditorial

P. PRÉVOST, H. BOIZARD, F. KOCKMANN, B. OMON et T. PAPILLON (coordonnateurs du numéro)

Mise en perspective des démarches cliniques en agronomie

P15- La démarche clinique en agronomie : sa mise en pratique entre conseiller et agriculteur

F. KOCKMANN, A. POUZET, B. OMON, L. PAVARANO et M. CERF

P27- Vers un diagnostic agronomique stratégique intégrant les enjeux environnementaux : mener l'enquête pour piloter le système de culture sur le temps long

M. CERF, V. PARNAUDEAU et R. REAU

P39- IDEA4 : une méthode de diagnostic pour une évaluation clinique de la durabilité en agriculture

F. ZAHM, J.M. BARBIER, S. COHEN, H. BOUREAU, S. GIRARD, D. CARAYON, A. ALONSO UGAGLIA, B. DEL'HOMME, M. GAFSI, P. GASSELIN, L. GUICHARD, C. LOYCE, V. MANNEVILLE et B. REDLINGSHÖFER

Les outils de diagnostic de la qualité des sols : du profil cultural aux méthodes et outils actuels

P55- Les méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol au service d'une démarche clinique en agronomie

H. BOIZARD, J. PEIGNE, J.F. VIAN, A. DUPARQUE, V. TOMIS, A. JOHANNES, P. METAIS, M.C. SASAL, P. BOIVIN et J. ROGER-ESTRADE

P77- Apprentissage et pratique du test bêche VESS par application mobile

A. JOHANNES, K. GONDRET, A. MATTER et P. BOIVIN

P81- Evaluer visuellement la structure à l'échelle de l'échantillon : méthode et exemple d'application

A. JOHANNES et P. BOIVIN

P87- Des méthodes bêches dérivées de la méthode du profil cultural

J. PEIGNE, S. CADOUX, P. METAIS et J.F. VIAN

P95- L'utilisation de la méthode du profil cultural en Argentine : quel apport à la connaissance du fonctionnement des systèmes de culture ?

J.J. DE BATTISTA, M.C. SASAL

P99- La complémentarité de deux méthodes : le Profil Pénétrométrique Interpolé du SOL (PPIS) et le profil cultural en contexte de chantiers lourds

O. SUC et O. ANCELIN

P101- Témoignages sur l'utilisation et la complémentarité des méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol dans le cadre du projet Sol-D'Phy

V. TOMIS et A. DUPARQUE

La démarche clinique au service de l'évolution d'une technique culturale : la gestion des adventices

P105- La gestion durable de la flore adventice des cultures (B. CHAUVEL, H. DARMENCY et C. MUNIER-JOLAIN et A. RODRIGUEZ, coordonnateurs, Ed. QUAE, 2019)

P. PRÉVOST

P111- Du champ virtuel au champ réel – Ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies durables de gestion des adventices et reconcevoir des systèmes de culture

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

P131- Utilisation du modèle FLORSYS comme outil d'aide à la conception de systèmes de culture innovants performants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure

N. CAVAN, B. OMON, N. COLBACH, F. ANGEVIN

P145- Agriculteurs et conseillers, réunis autour d'une source karstique, actionnent l'agronomie avec pragmatisme

A. HERMANT, A. FAIVRE, V. LE MOING, C. DIVO, V. LAVILLE

P153- Le stock de semences adventices peut-il être utilisé dans les études de terrain sur l'effet des systèmes de culture

I. MAHE, D. DERROUCH, E. VIEREN, B. CHAUVEL

D'autres expériences de terrain illustrant des démarches cliniques en agronomie

P163- Les essais systèmes, support pour accompagner le changement des pratiques

P. HUET et L. GUILLOMO

P169- La végétation des bordures de parcelles agricoles, des espaces importants pour le contrôle biologique

A. POLLIER, A. BISCHOFF, M. PLANTAGENEST, Y. TRICAULT

P175- Vers une gestion adaptée des prairies multi-espèces et une maximisation du pâturage dans les systèmes herbagers du sud-ouest de la France

X. BARAT

Varia

P187- Indésirables, tolérées, revendiquées : à chacun ses plantes messicoles. Perceptions des acteurs du monde agricole vis-à-vis des plantes des moissons

R. GARRETA, B. MORISSON, J. CAMBACEDES et A. RODRIGUEZ

Notes de lecture

P195- Les typologies agronomiques des sols, indispensables pour valoriser les référentiels régionaux en pédologie

F. KOCKMANN

P199- Agroecosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environmental quality

J. BOIFFI



Utilisation du modèle FLORSYS comme outil d'aide à la conception de systèmes de culture innovants performants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure

Nicolas Cavan⁽¹⁾, Bertrand Omon⁽²⁾, Nathalie Colbach⁽³⁾, Frédérique Angevin⁽¹⁾

⁽¹⁾ Eco-Innov, INRA, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁽²⁾ Chambre d'Agriculture de l'Eure, CS 80882, 27008 Évreux, France

⁽³⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

Correspondance : nicolas.cavan@inrae.fr

Résumé

Les systèmes de culture d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure, majoritairement spécialisé en grande culture, ont été évalués avec le modèle de dynamique de la flore adventice FLORSYS. Les objectifs de ce groupe sont l'amélioration de la durabilité de leurs systèmes et le maintien ou la réduction de leur utilisation de produits phytosanitaires, dont les herbicides (avec un Indice de Fréquence de Traitement herbicides de 1,2 en moyenne). L'évaluation porte sur une étape de l'innovation, en comparant le système de culture actuellement pratiqué aux systèmes innovants envisagés pour chaque agriculteur membre du groupe. Sur 17 systèmes innovants évalués, 7 permettraient une réduction de la nuisibilité des adventices et 6 un maintien de cette nuisibilité en réduisant l'usage des herbicides. L'utilisation de ce modèle mécaniste dans un groupe DEPHY Ferme a permis en premier lieu de susciter une nouvelle boucle d'innovation des systèmes de culture du groupe. Cela a également contribué à évaluer les effets de combinaisons de pratiques innovantes pour la gestion durable des adventices, à court et long terme. Pour mieux répondre aux préoccupations des agriculteurs, l'ajout d'une espèce adventice à celles simulées par le modèle (le ray-grass, *Lolium multiflorum*) et la définition d'un nouvel indicateur de résilience des systèmes de culture innovants face à des pics de pression adventices ont constitué un enrichissement nécessaire du modèle ou de la présentation de ses résultats. Enfin, la combinaison de ces résultats avec une évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture innovants a relativisé certains doutes vis-à-vis de la qualité du sol, pour les systèmes concernés par la réintroduction du labour ou un travail du sol plus intensif. Le principal inconvénient d'une telle démarche, à savoir le temps de réalisation des simulations avec le modèle FLORSYS, pourrait être contourné par l'utilisation de DECIFLORSYS, outil d'aide à la décision mobilisable directement au cours des ateliers de conception de systèmes de culture innovants.

Mots-clés : herbicides, systèmes de culture, conception, évaluation multicritère, modèle, DEPHY Ferme

Introduction

La constitution du réseau DEPHY (Démonstration et Expérimentation pour la Réduction de l'usage des produits Phytosanitaires) Ferme est une des actions phare du plan Ecophyto, prolongé en 2015 (CAN DEPHY, 2018).

Le groupe d'agriculteurs considéré dans cette étude s'est investi dans une démarche de réduction de l'usage des produits phytosanitaires – particulièrement des herbicides – et plus globalement d'amélioration de la durabilité de leur système de culture. Cette démarche de conception innovante pas-à-pas (Meynard et al., 2012) a été aidée à deux reprises par l'usage de modèles d'évaluation multicritère de la durabilité de système de culture : MASC 2.0 (Craheix et al., 2012) puis DEXiPM (Pelzer et al., 2012). L'évaluation des systèmes pratiqués des agriculteurs, puis des systèmes innovants mis en place a permis, entre autres, d'identifier les forces et faiblesses des innovations proposées.

L'usage d'herbicides est aujourd'hui relativement faible dans le groupe (IFT herbicides = 1,2) avec une pression adventice faible à moyenne pour la majorité des agriculteurs du groupe. Cependant, la gestion durable des adventices reste une des préoccupations majeures de ce groupe, renforcée par la probable interdiction à venir du glyphosate. La principale espèce problématique est le ray-grass (*Lolium multiflorum*).

Une nouvelle étape de conception innovante a été initiée en 2017, dans l'intention de mobiliser un nouvel outil : le modèle de simulation de la dynamique de la flore adventice FLORSYS (Colbach et al., 2014; Gardarin et al., 2012; Mézière et al., 2015; Munier-Jolain et al., 2014, 2013). Ce dernier est une parcelle virtuelle qui simule

le développement de 26 espèces adventices et des cultures de rente en fonction des pratiques culturelles et du pédo climat.

L'utilisation de modèles d'évaluation multicritère (MASC 2.0, puis DEXIPM) dans ce groupe DEPHY Ferme a été un support du raisonnement des pratiques à l'échelle du système de culture, ainsi qu'un outil d'animation pour identifier les points forts et faibles, les synergies et les antagonismes dans les performances de leurs systèmes de culture. L'apport de connaissances complémentaires par des acteurs extérieurs ou l'usage de modèles est considéré comme important pour élargir le champ des possibles lors de la conception innovante (Salembier et al., 2018). Par ailleurs, comme Meynard et al. (2012) le soulignent, la conception innovante à l'échelle du système de culture nécessite une évaluation multicritère des systèmes conçus, les objectifs des différents acteurs étant très divers et parfois difficilement conciliables. Une des préoccupations ressorties au sein du groupe concerne les agriculteurs ayant abandonné le labour depuis longtemps. En effet, la réintroduction de celui-ci, même à des fréquences faibles, est censée avoir des effets bénéfiques pour la gestion de la flore adventice (Colbach and Vacher, 2014), tout en ayant potentiellement de nombreuses conséquences positives et négatives sur la fertilité du sol, comme l'augmentation de la restructuration mécanique du sol (Boizard et al., 2014) ou la diminution de l'activité biologique du sol (Bouthier et al., 2014).

Matériels et méthode

Systèmes de culture simulés avec FLORSYS

FlorSys est une parcelle virtuelle, simulant la dynamique d'une flore adventice composée de 25 espèces adventices annuelles en fonction des conditions pédo climatiques et des pratiques culturelles du système de culture. Les contacts avec les membres du groupe et leur animateur ont conduit à rajouter une espèce supplémentaire, problématique pour presque tous les agriculteurs du groupe : le ray grass (*Lolium multiflorum*). 27 systèmes de culture ont été simulés dans cette étude, dont 16 systèmes de culture innovants conçus par les 9 agriculteurs volontaires. Un des systèmes innovants ayant été conçu pour remplacer deux systèmes de culture pratiqués différents, les conséquences de 17 trajectoires d'évolution de système de culture ont pu être étudiées dans ce groupe DEPHY Ferme.

Chaque système de culture a été simulé sur une période de 30 ans, avec les données climatiques de la base de données Climatik de l'Inra (le Pin-au-haras, coordonnées 48.725 ° N ; 0.181 ° E). 10 répétitions climatiques (début de simulation avec une année climatique différente) ont été faites pour chaque système.

Indicateurs de performance de gestion des adventices

FLORSYS calcule une série d'indicateurs annuels, dont ceux qui nous permettront de caractériser la nuisibilité des adventices pour la production (2 indicateurs), la contribution des adventices à la biodiversité (3 indicateurs) et l'intensité d'usage des herbicides (1 indicateur : l'Indice de Fréquence de Traitement herbicides – IFTh) :

- indicateurs de nuisibilité des adventices :
 - o le logarithme du ratio de biomasse adventice sur la biomasse de la culture au début de la floraison des cultures comme proxy de la perte de rendement de l'année n (RBAC_n) ;
 - o un indicateur de pollution de la récolte par les adventices (sans unité).
- Indicateurs de contribution des adventices à la biodiversité :
 - o la richesse spécifique de la flore adventice (nombre d'espèces présentes, entre 0 et 26).
 - o L'équitabilité de la flore adventice, c'est-à-dire la répartition de la population adventice entre les différentes espèces, nombre sans unité entre 0 et 1. Si ce nombre est égal à 1, alors il y a exactement le même nombre d'individus de chaque espèce adventice dans le champ ;
 - o un indicateur composite caractérisant les ressources trophiques pour la faune sauvage. Il s'agit de la première composante d'une Analyse en Composantes Principales portant sur les indicateurs de ressources trophiques pour les oiseaux, carabes, abeilles, bourdons, syrphes, et papillons prédis par FLORSYS (Mézière et al., 2015). Cette composante explique 75 % de la variabilité de ces six indicateurs.

En plus de ces indicateurs annuels, les agriculteurs et l'animateur du groupe ont exprimé leur intérêt pour une estimation de l'évolution de la nuisibilité des adventices à moyen et long terme, ce qui avait été identifié dans d'autres études (e.g. Macé et al., 2007). A partir du ratio biomasse adventice sur biomasse de la culture (RBAC), deux nouveaux indicateurs ont été calculés pour chaque répétition climatique sur la durée totale de simulation (30 ans) :

- o le manque de résilience du système face à un pic de nuisibilité des adventices estimée par le nombre de pics de nuisibilité \times leurs durées respectives, définis ci-dessous :
 - les pics de nuisibilité des adventices sont définis comme les années de simulation telles que $RBAC_n > 1,01$ (Colbach et Cordeau, 2018) et $RBAC_n > RBAC_{n-1}$
 - la durée d'un pic est le nombre d'années nécessaires pour un retour à $RBAC_n < 1,01$.
- o le risque de non-maîtrise des adventices à moyen ou long terme ("dérive"), estimé par la corrélation de Spearman entre la médiane de $RBAC_n$ pour les 10 répétitions climatiques et l'année de simulation n.

Tous les indicateurs présentés ici sont sans unité et leur gamme de valeurs est présentée dans le Tableau 1. Les résultats présentés par la suite ne se focalisent pas sur les valeurs numériques déterminées pour chaque indicateur, mais sur les différences significatives obtenues par un test LSD (package emmeans R).

Tableau 1 : Gammes de variation de chacun des indicateurs (sans unité) utilisés pour décrire les performances des systèmes de culture. Un système de culture multiperformant minimisera (respectivement maximisera) les variables dont la valeur maximale est colorée en rouge (respectivement vert).

Variables		Minimum	Maximum
Nuisibilité des adventices	Log10(Ratio biomasse adventices sur biomasse culture)*	-Inf	+Inf
	Pollution de la récolte	0	+Inf
	Manque de résilience du système de culture	0	465
Usage herbicides	Risque de dérive de la pression adventice	-1	1
	IFT herbicides	0	+Inf
	Richesse spécifique des adventices	0	26
Contribution à la biodiversité	Equitabilité : Indice de Piérou	0	1
	Contribution des adventices à l'offre trophique**	-Inf	+Inf

* La valeur 0 représente une perte moyenne de rendement de 50 % calculée par le modèle. ** La valeur 0 représente la moyenne de la contribution des adventices à l'offre trophique pour l'ensemble des systèmes de culture simulés.

Enfin, la version de FLORSYS utilisée (v2, 11/09/2018) ne simule pas actuellement l'apparition de résistance aux inhibiteurs de l'ALS, pourtant évoquée par certains agriculteurs du groupe et leur accompagnateur. De nouvelles simulations, avec une version ultérieure, permettront de prendre en compte l'apparition de ce type de résistances, ainsi que des progrès dans le paramétrage de la phénologie de certaines cultures.

Evaluation multicritère des systèmes de culture

L'évaluation multicritère des systèmes de culture a été réalisée pour la troisième fois dans ce groupe, en utilisant pour la seconde fois le modèle DEXiPM (Pelzer et al., 2012). La question des effets de l'intensification du travail du sol sur la fertilité du sol, exprimée par les agriculteurs membres du groupe DEPHY Ferme, a poussé à utiliser le modèle DEXiSOL (Thibault et al., 2018 ; Thibault, 2017), conçu afin de mieux décrire les effets de changements de pratiques de travail du sol sur la multi-performance des systèmes de culture. L'architecture du critère « Qualité physique du sol » est présentée en Figure 1.

Chaque critère de DEXiSOL et DEXiPM possède de 2 à n classes (n variant entre 3 et 5 pour les critères nous intéressants dans cette étude). Il s'agit donc de variables ordinaires, avec une valeur allant de 1 (classe la plus défavorable pour la durabilité) à n (classe la plus favorable).

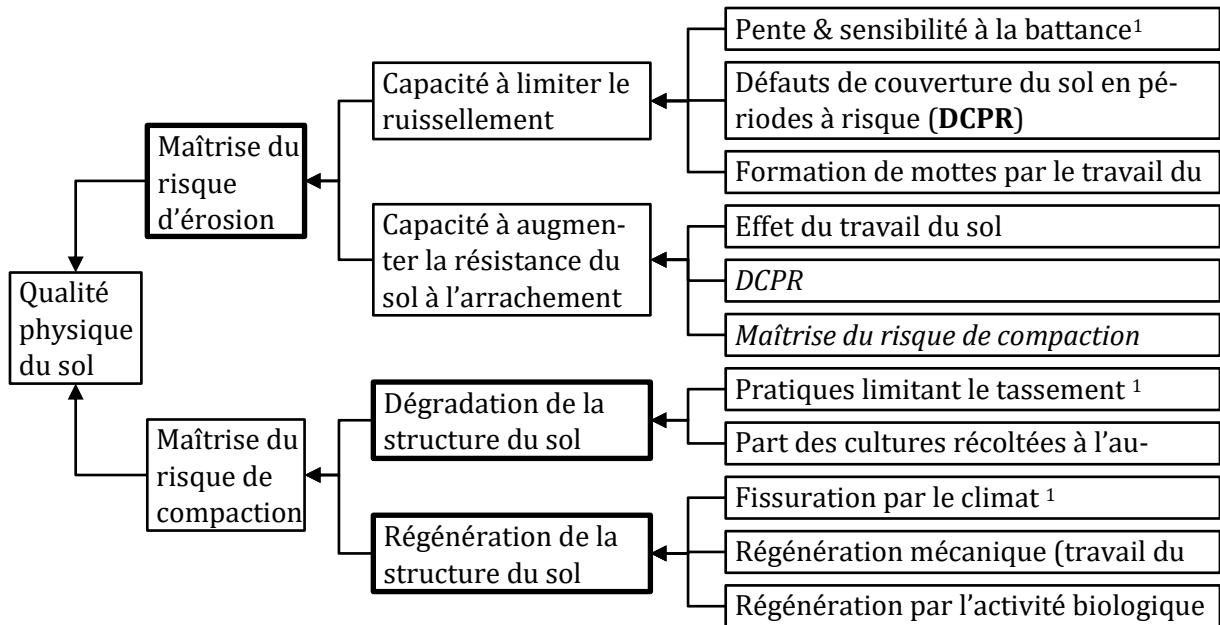


Figure 1: Définition du critère « Qualité physique du sol » du modèle DEXiSOL (Thibault et al., 2018 ; Thibault, 2017). Les trois critères agrégés avec un cadre épais seront ceux utilisés pour étudier l'effet des trajectoires sur la qualité physique du sol. ¹Ces critères sont agrégés et définis par au moins deux critères basiques (i.e. des critères à renseigner par l'utilisateur, en utilisant des indicateurs). Les critères dont le nom apparaît en italique sont définis à un endroit, mais ont des effets sur plusieurs critères agrégés.

Analyses statistiques

Pour la performance de gestion des adventices et la qualité physique du sol, ce sont les évolutions induites par les trajectoires (c'est-à-dire le passage d'un système de culture pratiqué à un système innovant) qui sont présentées ici.

Pour ce faire, nous étudions pour chaque indicateur de FLORSYS ou critère de DEXiPM la différence (D) entre la valeur de cet indicateur ou critère pour le système de culture innovant (V_i) et celle pour le système pratiqué (V_p) : $D = V_i - V_p$. Ainsi, une valeur de D positive (respectivement négative) indique une augmentation (respectivement une baisse) de l'indicateur ou du critère considéré avec la trajectoire envisagée par un agriculteur. Les différences significatives entre système pratiqué et innovant de chaque trajectoire sont évalués avec un test HSD de Tukey ($p.value=0,05$), réalisé avec le package R « emmeans » (version 1.4). Les coefficients de corrélation de Spearman, entre indicateurs de performance de gestion des adventices et entre ces mêmes indicateurs et des descripteurs des pratiques culturales sont calculés avec le package R « Hmisc » (version 4.1.1).

Résultats

Evolutions des performances de gestion des adventices pour l'ensemble du groupe DEPHY

Pour l'ensemble des systèmes de culture des agriculteurs du groupe DEPHY, les corrélations entre indicateurs de performance de gestion des adventices sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Corrélations entre les évolutions des indicateurs de performance de gestion des adventices calculés avec l'ensemble des 17 trajectoires. Les coefficients de corrélation de Spearman présentés dans ce tableau ont une p.value < 0,05.

Indicateurs FLORSYS		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Nuisibilité des adventices pour la production	1. Pertes de rendement		0,83				0,80	0,65	
	2. Pollution de récolte	0,83					0,69	0,56	0,60
	3. Manque de résilience								
	4. Risque de dérive								
Contribution à la biodiversité	5. IFT herbicide						-0,62		
	6. Richesse spécifique			0,69		-0,62		0,76	
	7. Equitabilité	0,80	0,56					0,66	
	8. Offre trophique	0,65	0,60			0,76	0,66		

Seule la richesse spécifique adventice est corrélée négativement à l'IFT herbicide. Ainsi, un usage plus intense d'herbicides tend à sélectionner une flore adventice spécifique. Cela indique également qu'il est possible de réduire l'usage d'herbicides sans augmenter la nuisibilité moyenne et à long terme des adventices pour la production.

L'évolution des deux indicateurs annuels de nuisibilité des adventices pour la production (pertes de rendement et pollution de récolte) sont corrélées. En revanche, l'évolution des indicateurs de nuisibilité à moyen et long terme (manque de résilience du système de culture et risque de dérive de la pression adventice) sont non corrélés aux deux premiers, ce qui indique des évolutions différentes de la nuisibilité moyenne annuelle et de celle à moyen et long terme.

Enfin, l'évolution des indicateurs de nuisibilité annuelle sont corrélés positivement aux indicateurs de contribution des adventices à la biodiversité : lorsque la nuisibilité augmente, la contribution des adventices pour la biodiversité augmente également. Réduire la nuisibilité des adventices tout en augmentant leur contribution à la biodiversité semble compliqué.

Effets des trajectoires d'évolution des systèmes de culture

Les moyennes des indicateurs FLORSYS calculées pour chaque système de culture sont présentées en Annexe 1. Le tableau 3 présente un classement des trajectoires du groupe en fonction de leur réalisation ou non des trois objectifs (réduction de la nuisibilité des adventices, de l'usage d'herbicides et augmentation de la contribution des adventices à la biodiversité).

Tableau 3 : Evolutions des performances de gestion des adventices (nuisibilité des adventices pour la production, usage d'herbicides et contribution des adventices à la biodiversité) associées aux principaux changements de pratiques culturelles. Le lecteur est invité à se référer au tableau 2 pour le numéro de chaque indicateur. Seules les différences significatives (test HSD de Tukey) sont indiquées.

Trajettoire (Annexe 1)	Nuisibilité pro- duction				Usage her- bicides		Contribution biodiversité		Principales évolutions du système de culture			
	Indicateurs		IFT ^h	G [†]	Indicateurs		Suc- ces- sion cul- tures	Labour	désher- bage mé- canique	Intercul- ture asso- ciations		
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.				
9	-	-			-0,5	-	-	-	oui	oui		
2			-		-0,4	oui	+		(oui)	oui ¹	oui ¹	
13	-				-0,3	oui	+	-		oui ¹	oui ¹	
6	-				-0,2		+			oui	oui	
8	-	-	-		ns		-		oui			
14	-				ns	oui	-		oui	oui ¹	oui ¹	
16	-	-			ns			+	oui	oui		
3					-0,5	oui	+	+	(oui)	oui ¹	oui ¹	
11					-0,5		+		oui			
12					-0,2				oui		oui ¹	
1					-0,1	oui	+	+	(oui)	oui ¹	oui ¹	
15					-0,1						oui	
17					ns				oui	oui		
10	+				-0,5		+		oui			
5		+			-0,3		+		oui	oui	oui	
7	+	+			-0,2	oui	+		oui	oui		
4	+	+	+		-0,1		+	+	oui	non	oui	

IFT^h : IFT herbicide. ns : diminution non significative. [†]G : glyphosate. oui : l'agriculteur envisage une réduction de l'usage de cet herbicide. Succession de cultures. (oui) : changement de la succession, sans ajout/suppression de cultures. oui : ajout d'une culture de diversification ou réduction de la part des cultures de rente les plus présentes (blé tendre d'hiver et betterave). oui : ajout ou suppression de plusieurs cultures dans la succession. Augmentation de la fréquence de labour et de désherbage mécanique. ¹Introduction ou réintroduction de cette technique dans le système de culture. Interculture et/ou association : augmentation de la couverture du sol notable, par des couverts en interculture ou des associations de culture dans la rotation.

Sur les 17 trajectoires d'évolution de système de culture (passage du système pratiqué à un système de culture innovant), 13 permettent une réduction de l'usage d'herbicides. La réduction est en moyenne de 0,2 IFT. L'IFT herbicide moyen du groupe passe ainsi de 1,2 à 1.

Sept trajectoires permettent une réduction significative de la nuisibilité des adventices (dont 3 avec un effet de réduction à moyen ou long terme) :

- Trois trajectoires (n° 2, 6 et 13) permettent d'atteindre simultanément les trois objectifs de conception (réduction de la nuisibilité, réduction de l'usage d'herbicides et augmentation de la contribution des adventices à la biodiversité par la richesse spécifique). Dans ces trois cas, les leviers mobilisés sont la réintroduction du labour (ou l'augmentation de la fréquence de labour), l'introduction ou l'intensification du désherbage mécanique, et pour deux trajectoires des changements notables dans la succession de culture.
- Une trajectoire (n° 16) permet de réduire la nuisibilité et d'augmenter la contribution à la biodiversité des adventices, sans réduction significative de l'usage d'herbicides, en augmentant la fréquence de labour et en supprimant un blé tendre d'hiver de la rotation.
- Trois trajectoires conduisent à une diminution de la nuisibilité et de la contribution à la biodiversité. Dans deux cas (n° 8 et 14), ce résultat est obtenu sans réduction de l'usage des herbicides, mais avec une réduction forte (-0,5 IFT) dans le 3^{ème} cas (n° 9).

Six trajectoires permettent quant à elles de maintenir la nuisibilité à des niveaux similaires, dont cinq en réduisant simultanément l'usage d'herbicides :

- Trois trajectoires permettent également une augmentation de la contribution des adventices à la biodiversité, dont deux grâce à la réintroduction du labour dans la rotation (n° 1 et 3). La dernière consiste en l'introduction du maïs grain dans la rotation (une année sur 12 à la place d'un pois de printemps) et la réalisation de quelques opérations de faux-semis supplémentaires (n° 11). Ces changements permettent de diviser par deux l'usage d'herbicide (passage d'un IFT de 0,9 à un IFT de 0,4).
- Deux trajectoires conduisent uniquement à une réduction de l'usage d'herbicides (n° 12 et 15). Une trajectoire (n° 12) est caractérisée par l'introduction du lin textile et le retrait de l'orge d'hiver de la rotation, ainsi que par l'introduction du désherbage mécanique (binage) sur les cultures de betterave et maïs grain. L'autre trajectoire (n° 15) comporte très peu de changements, mis à part l'introduction plus fréquente de couverts en interculture.

Enfin, quatre trajectoires conduisent à une augmentation de la nuisibilité :

- Deux d'entre elles (n° 4 et 7) concernent des rotations intégrant des cultures pérennes (mélange de graminées pendant trois ans ou mélange de graminées deux ans + luzerne deux ans). Si la part de la prairie diminue fortement dans un cas (50% à 33% de la durée de la rotation en années), elle augmente dans l'autre cas (introduction de la luzerne).
- Les deux autres trajectoires (n° 5 et 10) sont des alternatives à des trajectoires déjà présentées (n° 6 permettant de réduire la nuisibilité, n° 11 la maintenant), avec quelques impasses sur des opérations de désherbage chimique ou de faux-semis. Dans ces deux cas, l'augmentation de la nuisibilité ne concerne pas les pertes de rendement moyennes, mais la pollution de la récolte ou le risque de dérive de la pression adventice à long terme.

La trajectoire non évoquée jusqu'à présent (n° 17) représente des changements non significatifs pour l'usage d'herbicides, la nuisibilité des adventices ou leur contribution à la biodiversité.

Evolutions de la qualité physique du sol

L'augmentation de l'intensité du travail du sol (réintroduction du labour et/ou augmentation du nombre moyen d'opérations de travail du sol) constitue un des leviers principaux utilisés par les agriculteurs. Ce levier a permis de (ou contribué à) réduire la nuisibilité des adventices pour la production. Deux systèmes de culture sur trois avec l'atteinte des trois objectifs de gestion des adventices ont réintroduit le labour dans leurs pratiques. Les conséquences de l'intensification du travail du sol sur la fertilité de ce dernier est une des préoccupations importantes du groupe.

L'évolution de la qualité physique du sol et de ses composantes (dégradation de la structure, régénération de la structure et maîtrise du risque d'érosion) est présentée dans la figure 2.

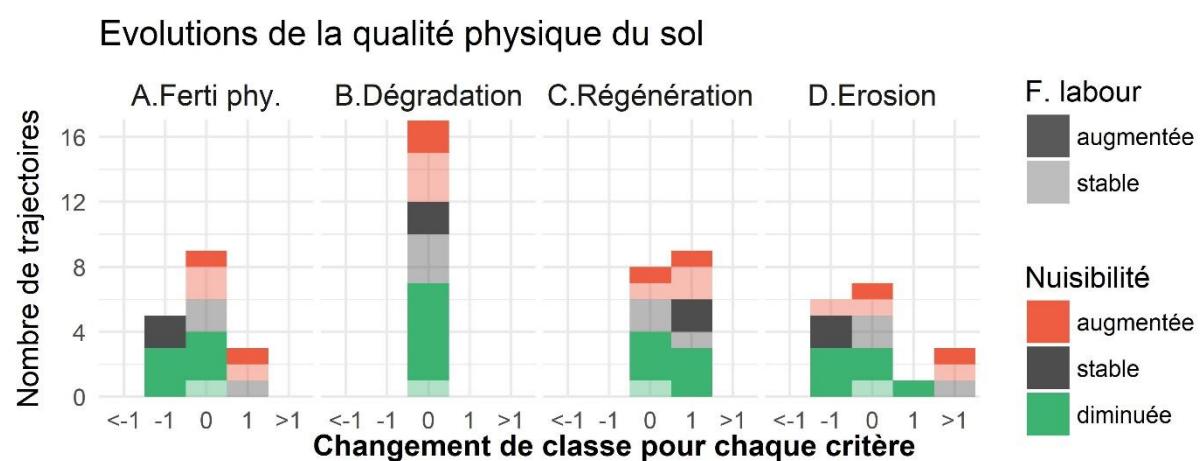


Figure 2 : Evolutions de la qualité physique du sol, de la dégradation et la régénération de la structure du sol et du risque d'érosion en fonction des trajectoires envisagées par les agriculteurs calculées avec le modèle DEXiSOL (Thibault, 2017). Les évolutions sont présentées en changement de classes pour chaque critère (une augmentation constituant une amélioration de ce critère). Chaque trajectoire d'évolution est représentée par l'évolution de la nuisibilité des adventices qu'elle provoque (couleur) et l'augmentation de la fréquence de labour (nombre d'années avec labour divisée par la durée de la rotation) ou non (transparence).

La qualité physique du sol reste stable avec la majorité des trajectoires (9/17). Néanmoins, elle diminue d'une classe pour 5 trajectoires, toutes concernées par l'augmentation de la fréquence de labour (Figure A).

Ces diminutions de la qualité physique des sols ne sont pas dues à une augmentation du risque de dégradation de la structure (Figure B). En effet, ce critère est évalué en fonction des équipements que les agriculteurs utilisent pour limiter les risques de tassements (pneu basse pression, double essieux, etc.) et de la fréquence des récoltes réalisées en automne (en conditions humides). Les rotations ayant relativement peu changé avec les trajectoires envisagées, ce critère n'a pas évolué.

A l'inverse, la régénération de la structure du sol est améliorée pour une majorité de trajectoires (9/17) et reste stable pour les 8 autres. La régénération de la structure par le travail du sol permet d'améliorer ce critère, y compris pour six trajectoires comprenant une augmentation de la fréquence de labour (Figure C). Ce critère est défini par plusieurs indicateurs, incluant la régénération biologique, par les cultures et par les vers de terre. Concernant ces derniers, leur activité ne semble pas réduite par l'augmentation de la fréquence de labour si elle ne devient pas trop élevée.

Ainsi, c'est la dégradation du critère « Maîtrise de l'érosion » qui essentiellement cause la dégradation de la qualité physique du sol (Figure D). Les cinq systèmes concernés par une dégradation de ce critère sont ceux ayant réintroduit le labour. Les trois systèmes ayant augmenté la fréquence de labour (d'environ 10%) tout en réduisant la nuisibilité des adventices n'ont quant à eux pas augmenté le risque d'érosion.

Enfin, le critère « Maîtrise du statut organique » reste constant pour l'ensemble des trajectoires proposées. La qualité biologique du sol reste également constante pour plus des deux tiers des trajectoires (12/17). Les deux trajectoires avec une dégradation de ce critère (une classe) sont caractérisées par la réintroduction du labour avec aucune baisse ou une baisse très faible de l'usage des herbicides, soit -0,1 IFT herbicide au maximum (données non montrées).

Discussion

Appports de la démarche pour le groupe

L'utilisation de la parcelle virtuelle FLORSYS a permis de susciter une nouvelle étape de conception innovante dans ce groupe DEPHY Ferme, qui a apporté de nouveaux enseignements ou en a confirmé d'autres. En effet, dans le contexte de production de ce groupe DEPHY Ferme, il est possible de diminuer l'usage des herbicides, tout en maintenant ou réduisant la nuisibilité des adventices, comme il n'y a pas de corrélation positive entre intensité d'usage d'herbicides et nuisibilité des adventices, ce qui est cohérent avec des résultats obtenus sur des essais longue durée (e.g. Petit et al., 2015) comme par simulation (Colbach et Cordeau, 2018).

Par ailleurs, les indicateurs de nuisibilité des adventices pour la production à l'échelle annuelle (pertes de rendement et pollution de récolte) sont non corrélés aux indicateurs de nuisibilité à moyen et long terme (résilience du système de culture et risque de dérive de la pression adventice). Ce dernier indicateur a permis d'identifier deux améliorations significatives de la gestion de la nuisibilité des adventices parmi les 17 trajectoires étudiées. Ainsi, la modélisation via FLORSYS donne accès à des informations sur la nuisibilité des adventices à moyen et long terme, très peu accessibles sur le terrain en raison notamment du temps d'expérimentation nécessaire, et pourtant recherchées par les agriculteurs (Macé et al., 2007).

Afin de réduire simultanément la nuisibilité des adventices pour la production et l'usage des herbicides, il est en général nécessaire de combiner plusieurs types de changements au sein de ce groupe DEPHY Ferme. Cela renvoie aux résultats montrant que les méthodes de contrôle des adventices alternative aux herbicides sont individuellement moins efficace que l'usage de ces derniers (Marshall et al., 2003). Le labour, même occasionnel, s'avère être efficace, comme l'indique Colbach et Vacher (2014), associé à des changements dans la succession de cultures, une amélioration de la couverture du sol (en interculture avec des couverts, ou en association de cultures), et/ou l'introduction du désherbage mécanique. De plus, les résultats d'une étude sur 946 systèmes de culture du réseau DEPHY Ferme indiquent une corrélation positive entre intensité d'usage d'herbicides (IFT) et productivité (le rendement) dans 29 % des systèmes (Lechenet et al., 2017). Ainsi, pour ces systèmes, la réduction de l'usage d'herbicides doit s'accompagner de changements pour éviter une perte de productivité, et le contexte de ces systèmes ressemble fortement à celui du groupe DEPHY Ferme de cette étude : sols limoneux et profond, avec une réserve utile en eau élevée et une succession de culture avec des parts importantes de blé et betterave sucrière (48 et 15 % en moyenne, respectivement).

Certains systèmes innovants permettent d'illustrer cette corrélation entre productivité et niveau d'usage d'herbicides. En effet, l'ajout de quelques impasses sur des traitements herbicides à l'échelle du système de culture peut provoquer, sans autre changement, une augmentation de la nuisibilité des adventices pour la production. A l'inverse, un système de référence (celui des trajectoires 10 et 11) se démarque par la possibilité de réduire fortement l'usage des herbicides (-0,5 IFT, avec un IFT de 0,9) sans nuisibilité supplémentaire pour

la trajectoire n°10. L'identification de ces systèmes de culture constitue, en plus du recours à la modélisation, un moteur potentiel pour la conception innovante (Salembier et al., 2018).

Enfin, l'analyse multicritère sur la qualité physique du sol a permis de montrer que la réintroduction du labour, ou son intensification, ne provoque pas de diminution importante de ce critère, pour le contexte de ce groupe DEPHY. En effet, l'augmentation du travail du sol permet d'améliorer la régénération mécanique de la structure du sol (Boizard et al., 2014), sans affecter (ou en affectant peu) l'activité des vers de terre pour la régénération de la structure du sol. Néanmoins, la maîtrise du risque d'érosion peut diminuer avec la réintroduction du labour dans certains systèmes de culture, résultat que l'on peut lier notamment à la diminution de la teneur en matière organique des premiers centimètres de sol lors de la réintroduction du labour (Bouthier et al., 2014).

Limites d'utilisation de FlorSys et DEXiSOL dans ce contexte

FLORSYS a fait l'objet d'une évaluation complète (Colbach et al., 2016). Néanmoins, dans la version actuelle utilisée (11/09/2018), il n'y a pas de simulation de l'apparition de résistance à l'ALS, ni d'adventices vivaces, problématiques pour certains agriculteurs du groupe DEPHY Ferme. Il serait intéressant de réaliser les simulations avec une nouvelle version de FLORSYS intégrant la résistance. En effet, la réintroduction du labour occasionnel dans un système sans labour permettrait de retarder l'apparition de résistances (Renton and Flower, 2015). Par ailleurs, la simulation du développement des espèces pérennes cultivées (notamment des prairies) ainsi que de certaines espèces introduites pour diversifier les rotations (par exemple le chanvre) doivent être améliorées. La simulation d'espèces adventices vivaces serait également un plus, cette problématique conditionnant les pratiques de certains agriculteurs du groupe.

L'autre limite importante de l'utilisation de FLORSYS est le temps de préparation et de simulation avec le modèle. En effet, cela réduit le nombre d'échanges possibles avec de nouveaux résultats au cours du projet, alors que la conception innovante se base souvent (et dans ce groupe également) sur un processus itératif (Meynard et al., 2012). Plusieurs trajectoires alternatives proposées par certains agriculteurs à la vue des premiers résultats n'ont pour le moment pas été explorées. Le développement d'un outil d'aide à la conception dérivé de FLORSYS, DECIFLORSYS, est en cours de finalisation (Colas, 2018 ; Colas et al., 2018), plus simple et rapide d'utilisation, qui a déjà été mobilisé au cours d'ateliers de conception avec des agriculteurs (Queyrel et al., en préparation).

La branche de qualité physique du sol a fait l'objet d'une étude de sensibilité selon la méthode décrite par Carpani et al., (2012). Malgré cela, les résultats présentés dans cette étude peuvent être affectés par un manque d'information sur les matériels utilisés par les agriculteurs pour limiter le risque de tassemement (double essieux, usage de pneus basse pression, etc.), estimé nul ou insuffisant pour l'ensemble du groupe.

Perspectives supplémentaires

Si la réduction du glyphosate semble possible sans augmentation de la nuisibilité pour 5 agriculteurs sur les 6 l'envisageant, une étude plus approfondie des effets de sa suppression effective a été proposée, en simulant une application de glyphosate uniquement lorsqu'une densité d'une ou plusieurs espèces adventices ciblées par chaque agriculteur avec le glyphosate est dépassée. Si cette utilisation de FLORSYS était possible dans la V2.0 11/09/2018, elle nécessite de réaliser des simulations complémentaires pour calibrer cette fonction, ce qui n'a pas été possible dans cette étude, mais constituerait une perspective intéressante.

Il est possible d'apporter des éléments complémentaires au groupe avec l'utilisation de FLORSYS sur la dynamique à long terme de la flore adventice. En effet, l'indicateur « Résilience du système de culture face à des pics de pression adventice » a été défini de manière neutre, c'est-à-dire avec une même importance pour chaque pic, quelle que soit son année d'apparition au cours de la simulation. Cet indicateur pourrait évoluer pour mieux correspondre au point de vue des agriculteurs du groupe, dont la problématique est de savoir s'il doit ou non adapter son système de culture après un pic de pression adventice donné. Cela pourrait se faire en maximisant l'importance des pics précoces lors des simulations. En effet, les pics tardifs sont moins susceptibles de les concerner, l'application d'un même système de culture pendant 30 ans étant très peu probable.

Par ailleurs, l'utilisation du modèle FLORSYS, avec des scénarios climatiques futurs régionalisés (Boulard et al., 2017) donnerait des indications complémentaires sur la résilience des systèmes de culture de ces agriculteurs face au changement climatique à venir.

Enfin, si l'évolution de la qualité physique du sol est un résultat susceptible de conforter des agriculteurs membres du groupe DEPHY Ferme dans leur démarche d'innovation, une évaluation complète de la durabilité de ces systèmes de culture innovants a été réalisée (données non montrées ici). Pour les plus anciens membres de ce groupe DEPHY Ferme, cette troisième évaluation de la durabilité de leur système pourrait

alimenter une étude des trajectoires d'évolution à long terme, basée par exemple sur la typologie de trajectoires vers une réduction des intrants décrite par Chantre et al. (2015).

Conclusion

L'utilisation de FLORSYS dans un groupe DEPHY Ferme a permis de susciter un nouveau cycle de conception innovante par les agriculteurs. Trois agriculteurs parviennent à réduire la nuisibilité des adventices, réduire leur usage d'herbicides et augmenter la contribution des adventices pour la biodiversité, dont deux qui réintroduisent le labour dans leur rotation et limitent la quantité de glyphosate utilisée. Dans l'ensemble, tous les membres du groupe ont au moins une piste de système de culture permettant de réduire la nuisibilité des adventices, ou au moins la maintenir en réduisant l'usage des herbicides.

Les questions soulevées par les membres du groupe et leur animateur ont permis d'enrichir le modèle, en ajoutant une espèce adventice problématique dans le contexte rencontré ici (*Lolium multiflorum*). Le calcul de deux nouveaux indicateurs en sortie de FLORSYS, pour déterminer l'évolution à long terme de la dynamique de la flore adventice a permis d'identifier des systèmes de culture innovants réduisant ou augmentant la nuisibilité à long terme des adventices. Malgré son temps d'utilisation très long, la mobilisation de FLORSYS pourrait amener d'autres enseignements, notamment sur la résilience des systèmes de culture face au changement climatique. La mobilisation de DECIFLORSYS, outil d'aide à la conception innovante issu de FLORSYS, pourrait, quant à elle, permettre d'élargir la démarche à d'autres groupes d'agriculteurs, ou de susciter plus rapidement d'autres cycles d'innovation dans un même groupe.

Références bibliographiques

- Boizard, H., Chenu, C., Labreuche, J., Roger-Estrade, J., 2014. Dynamique de la structure du sol en travail et non travail du sol, in: Faut-il Travailler Le Sol ? Acquis et Innovations Pour Une Agriculture Durable, Savoir-Faire. Quae ; Arvalis - Institut du végétal, Versailles, France ; Paris, France, pp. 49–62.
- Boulard, D., Castel, T., Camberlin, P., Sergent, A.-S., Asse, D., Bréda, N., Badeau, V., Rossi, A., Pohl., B. 2017. Bias Correction of Dynamically Downscaled Precipitation to Compute Soil Water Deficit for Explaining Year-to-Year Variation of Tree Growth over Northeastern France. *Agricultural and Forest Meteorology* 232 : 247-64. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.021>.
- Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, C., Pérès, G., Hedde, M., Ranjard, L., Vian, J.F., Peigné, J., Cortet, J., Bispo, A., Piron, D., 2014. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique, in: Faut-il Travailler Le Sol ? Acquis et Innovations Pour Une Agriculture Durable, Savoir-Faire. Quae ; Arvalis - Institut du végétal, Versailles, France ; Paris, France, pp. 89–112.
- CAN DEPHY, 2018. Le réseau DEPHY FERME : 3000 agriculteurs engagés dans la réduction des phytos. Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto.
- Carpani, M., Bergez, J.-E., Monod H., 2012. Sensitivity Analysis of a Hierarchical Qualitative Model for Sustainability Assessment of Cropping Systems. *Environ. Model. Softw.* 27-28 : 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.10.002>.
- Chantre, E., Cerf, M., Le Bail., M. 2015. Transitional Pathways towards Input Reduction on French Field Crop Farms. *International Journal of Agricultural Sustainability* 13, n° 1 : 69-86. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.945316>.
- Colas, F., 2018. Co-développement d'un modèle d'aide à la décision pour la gestion intégrée de la flore adventice. Métamodélisation et analyse de sensibilité d'un modèle mécaniste complexe (FLORSYS) des effets des systèmes de culture sur les services et disservices écosystémiques de la flore adventice. PhD Thesis, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France, 334 p.
- Colas, F., Queyrel, W., Van Inghelandt, B., Villerd, J., Colbach, N., 2018. Un OAD pour la gestion agroécologique des adventices. De FlorSys à FLO², ou comment passer d'un modèle de recherche, complet mais compliqué à utiliser, à un outil d'aide à la décision fonctionnel. *Phytoma* 719, 14-18.
- 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. *Environ. Model. Softw.* 86, 184–203. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.020>

Colbach, N., Collard, A., Guyot, S.H.M., Mézière, D., Munier-Jolain, N., 2014. Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *Eur. J. Agron.* 53, 74–89. <https://doi.org/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. *Eur. J. Agron.* 94, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.008>

Colbach, N., Vacher, C., 2014. Travail du sol et gestion de la flore adventice, in: Faut-il Travailler Le Sol ? Acquis et Innovations Pour Une Agriculture Durable, Savoir-Faire. Quae ; Arvalis - Institut du végétal, Versailles, France ; Paris, France, pp. 113–125.

Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innov. Agron.* 20, 35–48.

Gardarin, A., Dürr, C., Colbach, N., 2012. Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecol. Model.* 240, 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004>

Lechenet, M., Dessaint, F., Py, G., Makowski, D., Munier-Jolain, N., 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nat. Plants* 3, 17008. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8>

Macé, K., Morlon, P., Munier-Jolain, N., Quéré, L., 2007. Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. *Agric. Syst.* 93, 115–142. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.04.007>

Marshall, E.J.P., Brown, V.K., Boatman, N.D., Lutman, P.J.W., Squire, G.R., Ward, L.K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields*. *Weed Res.* 43, 77–89. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x>

Meynard, J.-M., Dedieu, B., Bos, B., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices, in: Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic. pp. 405–429.

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. *Ecol. Indic.* 48, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.028>

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

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

Pelzer, E., Fortino, G., Bockstaller, C., Angevin, F., Lamine, C., Moonen, C., Vasileiadis, V., Guérin, D., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., 2012. Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecol. Indic.* 18, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.019>

Petit, S., Munier-Jolain, N., Bretagnolle, V., Bockstaller, C., Gaba, S., Cordeau, S., Lechenet, M., Mézière, D., Colbach, N., 2015. Ecological Intensification Through Pesticide Reduction: Weed Control, Weed Biodiversity and Sustainability in Arable Farming. *Environ. Manage.* 56, 1078–1090. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0554-5>

Queyrel W., Van Inghelandt B., Colas F., Cavan N., Granger S., Guyot B., Reau R., Derrouch D., Chauvel B., Maillot T., Colbach N., (in preparation), Cropping system design for agroecological weed management by combining farmers workshops with computer models.

Renton, M., Flower, K.C., 2015. Occasional mouldboard ploughing slows evolution of resistance and reduces long-term weed populations in no-till systems. *Agric. Syst.* 139, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.06.005>

Salembier, C., Segrestin, B., Berthet, E., Weil, B., Meynard, J.-M., 2018. Genealogy of design reasoning in agronomy: Lessons for supporting the design of agricultural systems. *Agric. Syst.* 164, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.agrsy.2018.05.005>

Thibault, C., 2017. Conception du modèle d'évaluation multicritère des effets du travail du sol (Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur). INP-ENSAT.

Thibault, C., Cavan, N., Labreuche, J., Métais, P., Angevin, F., 2018. Multicriteria Assessment of the Effects of Tillage Practices on Cropping Systems: Development of the Decision Support Tool DEXiSol. 21. International Soil Tillage Research Organization (ISTRO). 2018 ISTRO Conference (2018-09-24-2018-09-27) Paris (FRA). In : Proceedings of the 21th ISTRO International Conference. 2018. P. 93-94

Annexe 1 : Evolution de la nuisibilité des adventices pour la production, de l'usage d'herbicides et de la contribution des adventices à la biodiversité pour le groupe DEPHY Ferme de l'Eure, simulé avec la parcelle virtuelle FlorSys. Les indicateurs à minimiser (nuisibilité et usage d'herbicides) sont colorés en dégradés en nuances de rouge, les indicateurs de contribution à la biodiversité en vert. Les lettres représentent les groupes significativement distincts (test HSD de Tukey, p.value = 0.05). Pour le risque de dérive, il s'agit de la p.value associée au coefficient de corrélation de Spearman calculé : ** < 0.01 ; * < 0.05.

N°	trajec- toire	Agriculteur et SdC	Nuisibilité des adventices						Contribution à la biodiversité									
			Pertes de rendement		Pollution récolte		Manque de résilience		Risque de dérive		IFT herbi- cides		Richesse spécifique		Equitabilité		Offre tro- phique	
		1 - Pratique	-1,05	efg	2,76	fg	23,5	abcde	0,60	**	1,74	o	15,6	cd	0,3	ij	0,0	ghij
1	Piste A	-0,72	fgh	3,20	hij	27,2	bcde	0,36	*	1,63	n	17,0	hi	0,3	kl	0,2	j	
2	Piste B	-0,85	fg	2,99	gh	25,0	bcde	0,33		1,32	jk	16,6	gh	0,3	ijkl	0,1	hij	
3	Piste C	-0,91	fg	2,98	gh	22,5	abcde	0,37	*	1,26	ij	17,2	i	0,3	l	0,7	k	
		2 - Pratique	-1,59	cde	3,87	l	18,7	abcd	0,21		0,53	b	18,2	j	0,2	abcde	0,8	kl
4	Piste	-0,15	hij	4,56	m	22,1	abcde	0,17		0,40	a	18,6	jk	0,2	fg	1,2	mn	
		3 - Pratique	1,33	m	3,66	kl	46,8	f	0,05		1,36	kl	15,6	cd	0,3	hij	-0,3	f
5	Piste A	1,14	m	3,80	l	37,0	ef	0,37	*	1,01	e	16,3	fg	0,3	gh	-0,2	fg	
6	Piste B	0,25	jk	3,40	jk	36,3	ef	0,06		1,13	h	16,1	efg	0,3	gh	-0,2	fgh	
		4 - Pratique	-0,43	ghi	2,03	bcd	36,1	ef	0,19		0,66	c	17,4	i	0,2	cdef	-0,4	f
7	Piste	1,07	lm	3,36	ijk	29,9	de	0,45	*	0,43	a	18,8	k	0,3	fg	1,0	lm	
		5 - Pratique A	1,17	m	3,06	ghi	50,8	f	0,06		0,91	d	18,2	j	0,3	fg	0,3	j
8	Piste A	-2,65	ab	1,91	abc	15,8	abcd	0,23		1,01	defg	17,3	i	0,2	bcdef	-0,4	ef	
		5 - Pratique B	-1,24	def	2,33	de	13,6	abc	0,04		1,47	m	16,9	hi	0,3	gh	0,2	ij
9	Piste B	-2,95	a	1,63	a	18,1	abcd	0,30		0,98	de	16,0	def	0,2	ef	-1,2	c	
		6 - Pratique	-2,52	ab	2,09	bcd	18,7	abcd	-0,01		0,97	de	14,1	ab	0,2	ab	-2,2	a
10	Piste A	-2,19	bc	2,57	ef	16,3	abcd	-0,05		0,44	a	15,7	de	0,2	abcd	-1,7	b	
11	Piste B	-2,68	ab	2,13	bcd	8,7	a	-0,11		0,43	a	15,5	cd	0,2	ab	-2,0	ab	
		7 - Pratique	-2,19	bc	1,93	abc	12,2	ab	-0,09		1,41	lm	16,1	efg	0,2	a	-0,8	de
12	Piste	-1,92	bcd	2,32	cde	16,3	abcd	0,12		1,17	hi	15,9	def	0,2	abc	-0,9	cd	
		8 - Pratique A	0,00	ij	1,86	ab	27,2	bcde	-0,23		1,65	n	13,7	a	0,3	gh	-0,1	fghi
		8 - Pratique B	-0,87	fg	2,03	bcd	18,4	abcd	0,03		1,27	j	15,1	c	0,2	def	0,1	ij
13 & 14	Piste	-2,11	bc	1,89	ab	19,7	abcd	-0,02		1,34	jkl	14,4	b	0,2	ef	0,1	ghij	
		9 - Pratique	0,95	lm	3,41	jk	26,7	bcde	0,14		1,12	gh	19,7	lm	0,3	ijk	1,1	m
15	Piste A	0,87	klm	3,38	jk	29,4	cde	0,13		1,03	ef	20,1	m	0,3	ijkl	1,3	mn	
16	Piste B	0,42	jkl	2,79	fg	24,0	abcde	0,34		1,04	efg	19,4	l	0,3	jkl	1,5	n	
17	Piste C	1,16	m	3,40	jk	27,4	bcde	0,15		1,10	fgh	19,7	lm	0,3	hi	1,1	m	