Décembre 2019
volume n° 9 / numéro 2
www.agronomie.asso.fr

Agronomie
environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie

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, ingénieure 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, ingénieure 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, Ingénieure 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/)

Périodicité
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. PREVOST
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

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 ?

Nathalie Colbach, Stéphane Cordeau*, Wilfried Queyrel*, Thibault Maillot*, Jean Villerd*, Delphine Moreau**

*Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France. Nathalie.Colbach@inra.fr

Résumé

La transition vers une gestion agroécologique des adventices requiert des modèles pour explorer les nombreuses combinaisons de techniques culturales, évaluer leurs effets à long terme et les (dys)services des adventices. Le modèle FLORSYS est une parcelle virtuelle simulant la croissance et reproduction des adventices et cultures au fil des années, basée sur une représentation détaillée des processus par jour et en 3D, à partir du système de culture en interaction avec le climat. Des cas d'étude montrent comment FLORSYS sert à (1) des expérimentations virtuelles pour diagnostiquer des techniques culturales, (2) démêler les effets cumulatifs et interactifs des systèmes de culture dans des réseaux de parcelles agricoles virtuelles, (3) soutenir la conception de systèmes de culture. Identifier les causes des performances des systèmes de culture est essentiel pour améliorer ces systèmes, déterminer le domaine de validité des règles de gestion des adventices, et favoriser des innovations adaptées aux besoins des agriculteurs. Afin de faciliter la reconception de systèmes de culture, FLORSYS a été transformé en un outil d'aide à la décision (DECIFLORSYS) destiné à être utilisé en atelier de co-conception avec des conseillers et agriculteurs.

Abstract

From virtual to actual fields: how to use a simulation model to diagnose sustainable weed management strategies and redesign cropping systems

Switching from intensive herbicide-based to agroecological weed management needs models to explore the vast range of possible combinations of cropping techniques, to assess long-term effects and weed (dis)services. FLORSYS is a mechanistic "virtual field" model simulating daily weed and crop growth and reproduction over the years, on which arable cropping systems can be experimented in temperate climates. The model inputs include a detailed description of the cropping system, soil characteristics, weather and the regional weed species pool. A detailed life cycle predicts daily state variables for weeds, crops and soil conditions. Effects of techniques depend on weather and soil conditions as well as crop and weed features (species, morphology, stage). This is essential to understand why given technique has a certain effect. The detailed daily and 3D outputs are translated into indicators of crop production and weed (dis)services to evaluate the cropping-system performance. Case studies show how FLORSYS is used to (1) run virtual experiments to investigate individual cropping techniques, (2) disentangle cumulative and interacting effects of cropping systems in virtual farm-field networks, (3) support cropping-system design in participatory workshops with farmers. Identifying the causes of cropping-system performance was essential to (1) improve the systems, (2) determine the domain of validity of weed management rules, (3) promote novel management solutions adapted to farmers' needs. In order to support cropping system redesign, FLORSYS was transformed into a decision support system (DECIFLORSYS) to be used in participatory workshops with crop advisors and farmers.

Mots-clés. Gestion agroécologique, adventice, modèle, simulation, évaluation multicritère
Agroecological management, weed, model, simulation, multicriteria evaluation

Introduction

Les stratégies de gestion des adventices doivent être reconçues pour réduire leurs impacts sur l'environnement et répondre aux nouvelles règlementations françaises et européennes, notamment le plan Ecophyto et la directive 2009/128/CE (https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest). Au lieu de se focaliser sur l'emploi d'herbicides, ces nouvelles stratégies doivent combiner l'ensemble des composantes du système de culture pour aboutir à une gestion intégrée souvent appelée "many little hammers" (Liebman and Gallandt, 1997 ; Bonin, 2009 ; Wezel *et al.*, 2014). De plus, l'évaluation des impacts de la flore adventice ne doit pas se limiter à ses seuls dysservices, comme la compétition pour les ressources ou la contamination des récoltes. Elle doit aussi inclure les services rendus par les adventices, notamment la contribution à la biodiversité végétale, l'offre trophique à d'autres organismes comme les pollinisateurs ou les insectes granivores (Marshall *et al.*, 2003 ; Petit *et al.*, 2011), ou encore la protection de l'environnement comme la réduction de l'érosion (Kervroëdan *et al.*, 2018 ; Neyret *et al.*, 2018).

Plusieurs méthodes existent pour concevoir de nouveaux systèmes de culture (Loyce and Wéry, 2006). Les approches *in silico* permettent de tester une large gamme de systèmes agricoles, à long terme, sans limitation par les connaissances et l'imagination des concepteurs des systèmes, pour identifier ceux répondant aux objectifs (Meynard *et al.*, 2012). Parmi ces modèles, ceux basés sur une représentation des processus biophysiques permettent de comprendre et prédire la variabilité des effets observés pour les différentes techniques culturales, et ce dans une large gamme de situations sans reparamétrage (Colbach *et al.*, 2005 ; Colbach, 2010). Prédire non seulement les effets moyens mais aussi leur variabilité en fonction des états du milieu et des autres techniques culturales est essentiel parce que les agriculteurs ont besoin de connaître les probabilités de succès de leurs décisions ainsi que le risque d'effets secondaires.

Dans ce cas particulier de la gestion agroécologique des adventices, un tel modèle mécaniste doit comprendre l'ensemble des composantes du système de culture même si elles ne visent pas directement les adventices comme le font les herbicides ou le désherbage mécanique. En effet, tout effet sur la culture ou le milieu affecte aussi les adventices. Ce modèle doit décomposer les effets de ces composantes en processus élémentaires interagissant avec le pédoclimat pour prendre en compte les spécificités régionales et, surtout, intégrer les interactions entre techniques culturales et états du milieu (Colbach, 2010). Comme les semences adventices peuvent survivre pendant plusieurs années dans le sol (Lewis, 1973), le modèle doit permettre des simulations pluriannuelles afin d'évaluer si une décision prise un jour donné va impacter la flore adventice et les cultures des années à venir (Colbach *et al.*, 2014a). Ce modèle doit fonctionner avec un pas-de-temps journalier pour être cohérent avec l'échelle temporelle des opérations culturales et des interactions avec les états du milieu. Enfin, le modèle doit être plurispécifique aussi bien pour les adventices que pour les cultures. En effet, les champs de grandes cultures sont colonisés par des dizaines voire centaines d'espèces adventices (Fried *et al.*, 2008) et la diversification des cultures est un levier majeur de la gestion intégrée des adventices (Liebman and Gallandt, 1997).

Dans cet article, nous allons présenter un tel modèle développé par notre équipe et comment il peut être utilisé pour évaluer et diagnostiquer des systèmes de culture existants ou prospectifs. FLORSYS (Gardarin *et al.*, 2012 ; Munier-Jolain *et al.*, 2013 ; Colbach *et al.*, 2014b ; Mézière *et al.*, 2015) est une parcelle virtuelle qui simule la phénologie, croissance et reproduction des cultures et adventices au jour le jour sur plusieurs années en grandes cultures des régions tempérées. On peut y expérimenter de nombreux et divers systèmes de culture pour les évaluer en termes de production, services (ex. biodiversité) et dysservices (ex. perte de rendement) liés aux adventices (Figure 1). Des modèles mécanistes comme FLORSYS permettent aussi une continuelle synthèse des connaissances produites par différentes équipes et disciplines. Afin de faciliter la reconception de systèmes de culture, FLORSYS a été transformé en un outil d'aide à la décision (DECIFLORSYS) destiné à être utilisé en atelier de co-conception avec des conseillers et agriculteurs.

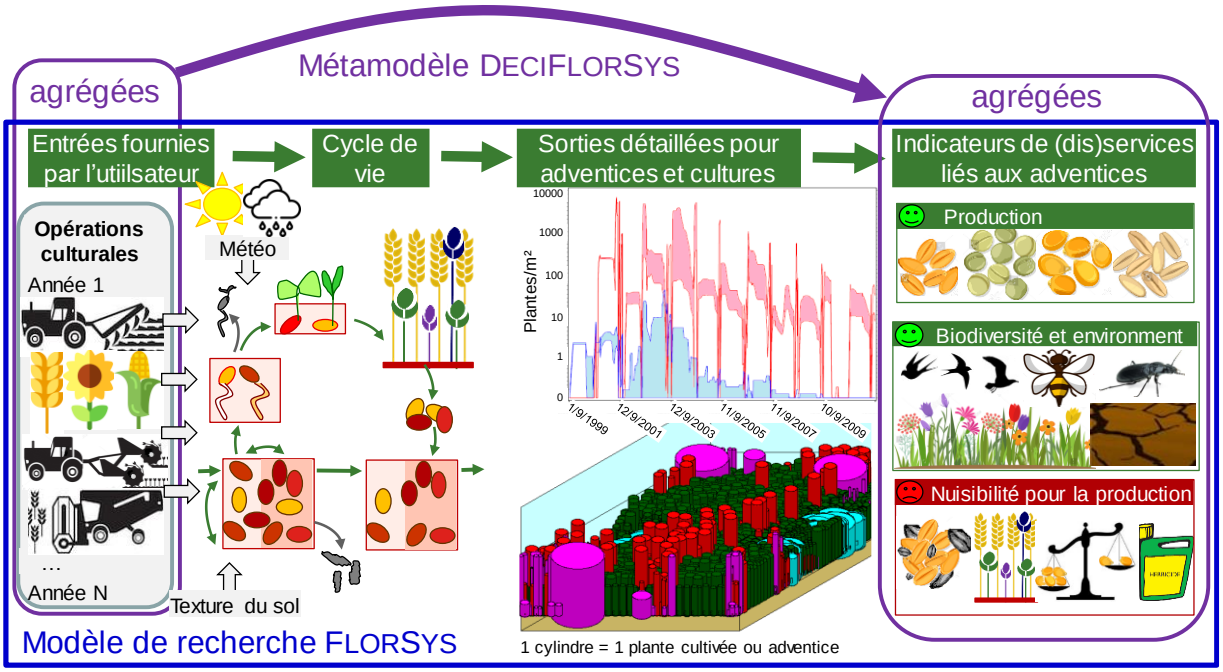


Figure 1. Présentation générale du (1) modèle de recherche FLORSYS (rectangle bleu) qui simule le développement et la croissance des cultures et des adventices à partir du système de culture, la météo et du sol, avec une représentation mécaniste des processus biophysiques au jour le jour et en 3D individu-centré (Gardarin et al., 2012; Munier-Jolain et al., 2013; Colbach et al., 2014b; Mézière et al., 2015), (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, 2018) (Nathalie Colbach © 2018).

General representation of the (1) research model FLORSYS which simulates crop growth and weed dynamics from cropping system, weather and soil inputs based on a mechanistic representation of biophysical processes at a daily time step (3-D individual-based representation), and the (2) metamodel DECIFLORSYS which directly estimates weed services and disservices from cropping system inputs

Le modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS

Les variables d'entrée

L'utilisateur entre une liste d'opérations culturales couvrant plusieurs années, similaire à l'enregistrement des opérations d'un champ réel en station expérimentale ou dans une exploitation agricole, le tout accompagné de la latitude, de relevés météo 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). La parcelle virtuelle doit aussi être initialisée avec un pool d'espèces adventices dans le stock semencier du sol (ou banque de semences), soit mesuré par des prélèvements de sol, soit estimé à partir de la flore adventice régionale (Colbach *et al.*, 2016).

Le cycle de vie des adventices et des cultures

Ces entrées influencent le cycle de vie des adventices et des cultures en fonction de différents processus, avec un pas de temps journalier (Figure 2). Pour inclure une diversité d'espèces dans FLORSYS, une représentation générique du cycle de vie et des plantes est nécessaire, c'est-à-dire une représentation valable pour n'importe quelle espèce (cultivée/adventice, mono/dicot...). Les stades pré-levée dépendent de la structure, la température et du potentiel hydrique du sol. Le couvert cultures-adventices est représenté en 3D avec une représentation simplifiée de chaque plante, qu'elle soit cultivée ou adventice. Cette représentation est nécessaire pour tenir compte de l'hétérogénéité des couverts, avec une flore adventice composée de dizaines voire centaines d'espèces réparties en tâches, avec des levées de chaque espèce échelonnées sur des semaines voire des mois. Cette approche est également adaptée pour simuler des associations de cultures. Les

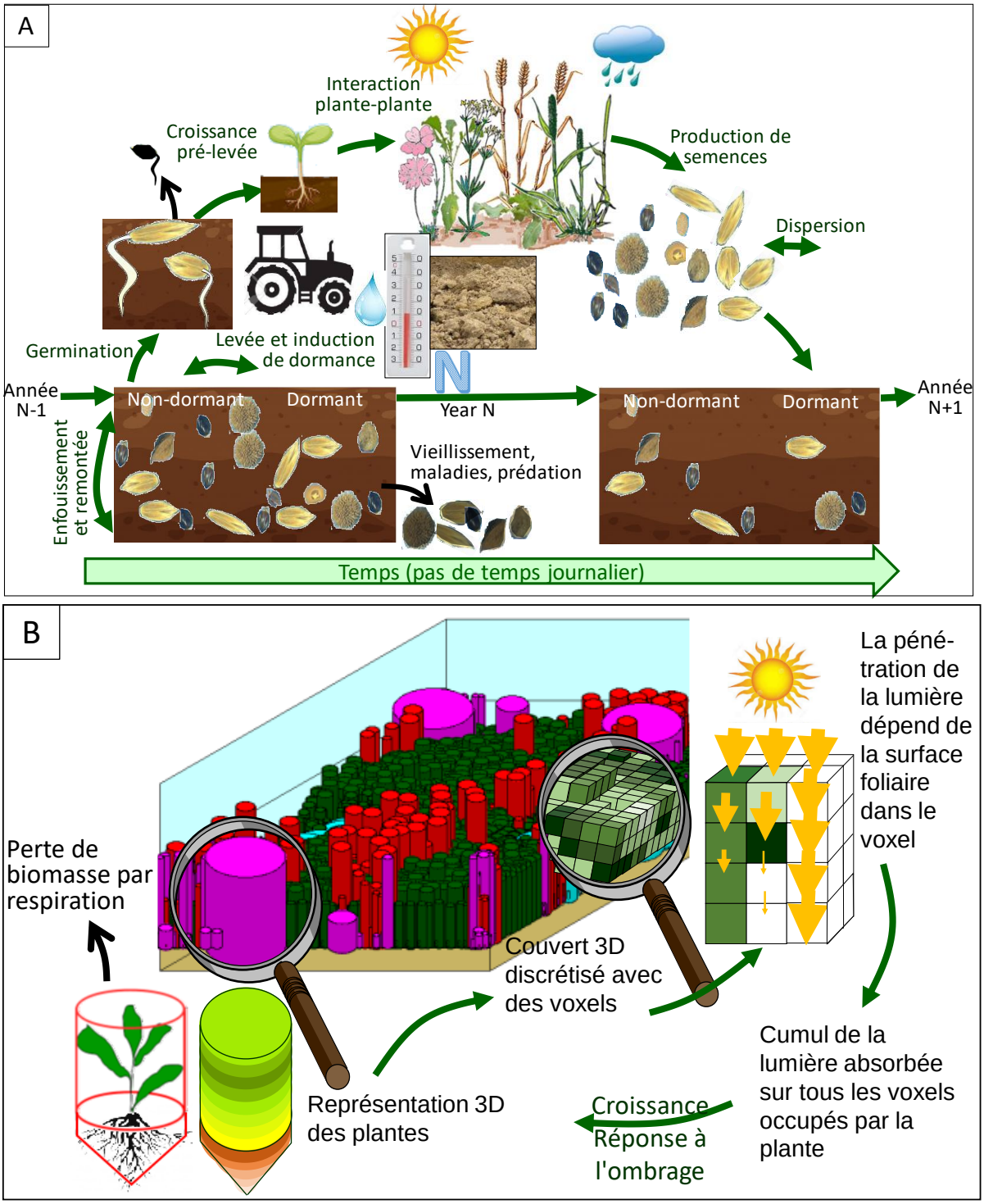


Figure 2. Représentation simplifiée des stades et processus spatio-temporels dans le modèle FLORSYS (Gardarin et al., 2012; Munier-Jolain et al., 2013; Colbach et al., 2014b). A. Représentation temporelle du cycle de vie annuel des cultures et adventices, montrant la représentation 1D du stock semencier. B. Représentation 3D individu-centré du couvert cultures-adventices, avec un focus sur la compétition plante-plante pour la lumière (Nathalie Colbach © 2019)

Simplified representation of spatio-tempral stages and processes in the FLORSYS model. A. Temporal representation of annual life-cycle of crops and weeds, showing the 1D representation of the soil seed bank. B. 3D individual-based representation of the crop-weed canopy, focusing on plant-plant competition for light

processus post-levée dépendent de la lumière, de la température de l'air et de l'azote du sol (en cours d'implémentation). À la maturité des plantes, les semences adventices sont retournées au stock semencier du sol tandis que les graines des cultures sont récoltées pour calculer le rendement. Le modèle est actuellement paramétré pour 26 espèces adventices fréquentes et contrastées (y compris des populations différant en termes de résistance aux herbicides) ainsi que 33 espèces cultivées (de rente et de services).

Effet des techniques culturales

Les processus du cycle de vie 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. Par exemple, les probabilités de survie des plantes adventices sont calculées en fonction des (1) opérations culturales (travail du sol, herbicides, désherbage mécanique, fauche, récolte) et de leurs options (ex. profondeur, outil et vitesse de travail du sol), (2) des états du milieu (ex. humidité du sol, densité du couvert), et (3) de la morphologie, du stade et, dans les cas des herbicides, du génotype de la plante. Ensuite, cette probabilité est comparée à une probabilité tirée au hasard pour déterminer si la plante meurt ou survit.

Paramétrer des espèces diverses et nombreuses

L'approche mécaniste est indispensable pour synthétiser de nouvelles connaissances dans le modèle (Colbach, 2010) mais requiert un grand nombre de paramètres, ce qui limite l'addition de nouvelles espèces dans le modèle. Par conséquent, Gardarin et *al.* (2012 ; 2016) ont développé une nouvelle méthode pour estimer des paramètres à partir de proxys plus faciles à mesurer (ex. estimer l'allongement de la plante pendant la phase pré-levée à partir de la masse des semences) ou disponibles dans des bases de données.

Des critères d'évaluation conçus avec les acteurs et inspirés de l'écologie des communautés

L'approche mécaniste de FLORSYS permet de produire des sorties très détaillées (par jour et en 3D) semblables à des mesures réalisées sur des couverts réels dans des champs expérimentaux ou agricoles (Figure 1). Ces sorties sont essentielles pour comprendre le fonctionnement de l'agroécosystème et diagnostiquer la performance des systèmes de culture testés. Pour simplifier la comparaison des systèmes de culture, ces sorties détaillées sont traduites en indicateurs de (dys)services des adventices.

Les indicateurs de dysservices ont été développés (Mézière *et al.*, 2015) puis évalués (Colas, 2018 ; Colas *et al.*, accepted) avec des conseillers et agriculteurs en enquête et dans des ateliers. Ils intègrent la nuisibilité directe (ex. perte de rendement) et indirecte (ex. augmentation du risque de maladies) des adventices pour la production, ainsi que des problèmes techniques (ex. bourrage de la moissonneuse par des adventices) et des blocages sociologiques (ex. un champ "sale" peut nuire à la réputation de l'agriculteur même s'l n'y a pas d'impact sur le rendement) liés aux adventices.

Les indicateurs de services ont été développés avec des écologues et des agronomes (Mézière *et al.*, 2015 ; Moreau *et al.*, in revision ; Colbach *et al.*, In revision) et reflètent la contribution des adventices à la biodiversité et à l'environnement physique. Ils concernent la biodiversité végétale sauvage, le rôle des adventices pour nourrir des organismes bénéfiques ou neutres (pollinisateurs, oiseaux, carabes) et pour réduire l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement (lixiviation d'azote, transfert de pesticides, érosion du sol).

Domaine de validité

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 et les densités adventices observés sont correctement prédits et classés en fonction des systèmes de culture et des espèces adventices, surtout à l'échelle de la rotation.

Expérimentations virtuelles

Dans cette section sont présentés différents cas d'étude illustrant comment FLORSYS est utilisé pour des expérimentations virtuelles à différentes échelles temporelles et spatiales, avec l'objectif d'évaluer et de comprendre l'impact des systèmes de culture sur les (dys)services liés aux adventices.

L'impact des techniques culturales dépend du pédoclimat

La gestion intégrée des adventices retarde souvent le semis des cultures, afin de laisser plus de temps au faux semis estival pour augmenter le nombre d'adventices germant en interculture et ainsi de réduire le stock semencier adventice présent au semis. Le faux semis n'est efficace que si les semences adventices ne sont pas dormantes avant le semis de la culture. De plus, son efficacité varie avec les états du milieu, particulièrement l'humidité du sol, puisque les semences ne peuvent germer que si elles sont imbibées. Enfin, si l'opération de semis est combinée avec un travail du sol superficiel en conditions humides, ce travail stimule une vague de germination additionnelle qui se traduit par une augmentation des levées d'adventices en culture (Figure 3).

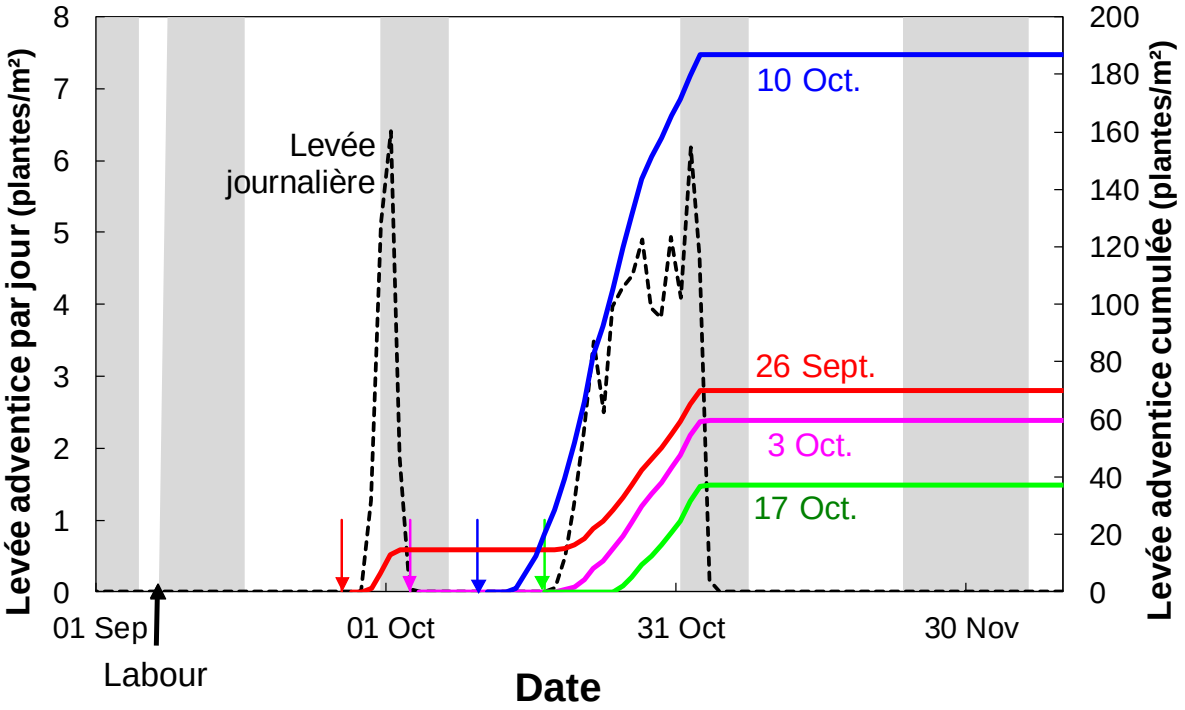


Figure 3. Effet de la date du dernier travail du sol associé à l'opération de semis (26 Sept., 3 Oct. 10 Oct., ou 17 Oct) sur la levée cumulée d'adventices graminées automnales comme le vulpin (Alopecurus myosuroides Huds.) en blé d'hiver en Bourgogne (simulé avec le prototype monospécifique de FLORSYS). Les flèches indiquent les dates de semis ; la levée adventice journalière (----) correspond à un semis au 26 Sept. Les zones grises indiquent les jours où le sol est trop sec pour la germination. Retarder le semis permet d'éviter les levées précoces d'adventices et réduit la levée des adventices en culture (semis du 3 Oct et 17 Oct vs 26 Sept). Si la culture est semée peu après une pluie (10 Oct), le travail du sol associé au semis déclenche une vague de germination qui augmente considérablement la levée adventice après le semis. Un travail en conditions sèches (3 Oct) ou dans un sol continuellement humide (17 Oct) ne déclenche pas de germinations additionnelles (basé sur Colbach et al., 2005) (Nathalie Colbach ©)

Effect of the last tillage date associated with the sowing operation (carried out on 26 Sept; 3 Oct.; 10 Oct.; or 17 Oct) on the cumulated autumnal emergence of grass weeds (e.g. Alopecurus myosuroides Huds.) in winter wheat in Burgundy (simulated with the monospecific prototype of FLORSYS). The arrows indicate the sowing date; daily weed emergence (----) corresponds to the earliest sowing (26 Sept). Grey areas indicate days where the soil was too dry for germination. Delayed crop sowing allows avoiding the earliest weed emergence flush and reduces in-crop weed emergence (sowing on 3 Oct and 17 Oct vs 26 Sept). If the crop is sown shortly after the soil was remoistened by rain (10 Oct), the associated tillage triggers a germination flush resulting in a huge increase in weed emergence after sowing. No additional triggering occurs if the soil is tilled in dry conditions (3 Oct) or in continuously moist soil (17 Oct)

Pour évaluer le taux de succès du retard de semis et le risque d'effets secondaires néfastes, une expérimentation virtuelle a été réalisée avec FLORSYS (Tableau 1). Cinq dates de semis de blé d'hiver ont été testées dans deux régions dans des champs infestés par du vulpin. Chacune était répétée avec dix séries météo différentes. L'analyse fréquentielle des sorties simulées montre que retarder le semis du blé d'hiver réduit en moyenne la levée adventice en culture dans les deux régions. Cependant, dans le Nord, il fallait retarder le semis au-delà du 7 novembre pour éviter tout risque d'augmenter la levée. En Bourgogne, où le sol est souvent trop sec pour une germination au début octobre, un risque résiduel d'augmentation de levée persiste jusque mi-novembre.

Date de semis décalée du 3 octobre au	Nord de la France		Bourgogne	
	Probabilité (en %) que le décalage de semis			
	diminue la levée d'adventices d'au moins 10 %	augmente la levée d'adventices d'au moins 10 %	diminue la levée d'adventices d'au moins 10 %	augmente la levée d'adventices d'au moins 10 %
10 octobre	7	7	14	14
17 octobre	14	0	14	14
24 octobre	7	14	0	36
31 octobre	29	7	14	14
7 novembre	43	0	79	14
14 novembre	86	0	79	14

Tableau 1. Effet simulé d'un décalage du semis du blé d'hiver combiné avec une herse animée sur la levée de vulpin des champs en culture simulée avec la version monospécifique de FLORSYS (basé sur Colbach et al., 2014a). L'effet du décalage est estimé par la probabilité (% d'années) d'avoir une diminution ou une augmentation de la levée adventice par rapport à la levée qui aurait eu lieu si le semis avait été effectué le 3 octobre.

Effect of delayed winter-wheat sowing (combined with a power harrow) on autumnal grass weed emergence (e.g. Alopecurus myosuroides *Huds.) in the crop simulated with the monospecific prototype of FLORSYS. Probability of occurrence (% years) that weed emergence increases or decreases relatively to the initial sowing date on 3 Oct.*

Une solution à court terme peut avoir des effets néfastes à long terme

Dans tous les cas, il est indispensable de raisonner la gestion des adventices à l'échelle pluriannuelle, car une technique efficace pour contrôler les adventices à court terme peut avoir des effets secondaires inattendus à plus long terme. L'implantation de cultures de couverture est très intéressante pour étouffer les adventices en interculture et réduire ainsi l'infestation de la culture qui suit immédiatement (Figure 4). Mais elle peut conduire à des augmentations de l'infestation les années suivantes, si la culture de couverture limite les possibilités de faux semis pendant l'année où elle est implantée. Ceci est surtout un risque pour les intercultures courtes, comme celles précédant le blé d'hiver ; les cultures de printemps et d'été, comme le maïs, laissent plus de temps pour réaliser des faux semis avant l'implantation des couverts intermédiaires.

Au contraire, l'effet bénéfique d'une pratique peut également être visible pendant les cultures suivantes. Ici, c'est le cas de l'association de la féverole avec le blé qui concurrence les adventices, réduisant fortement leur production de semences.

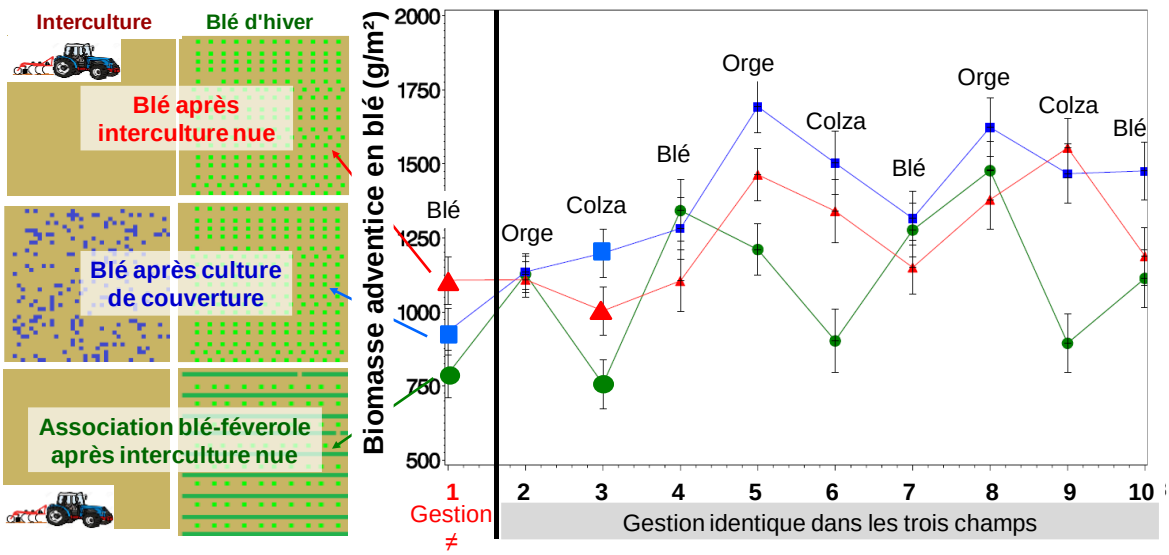


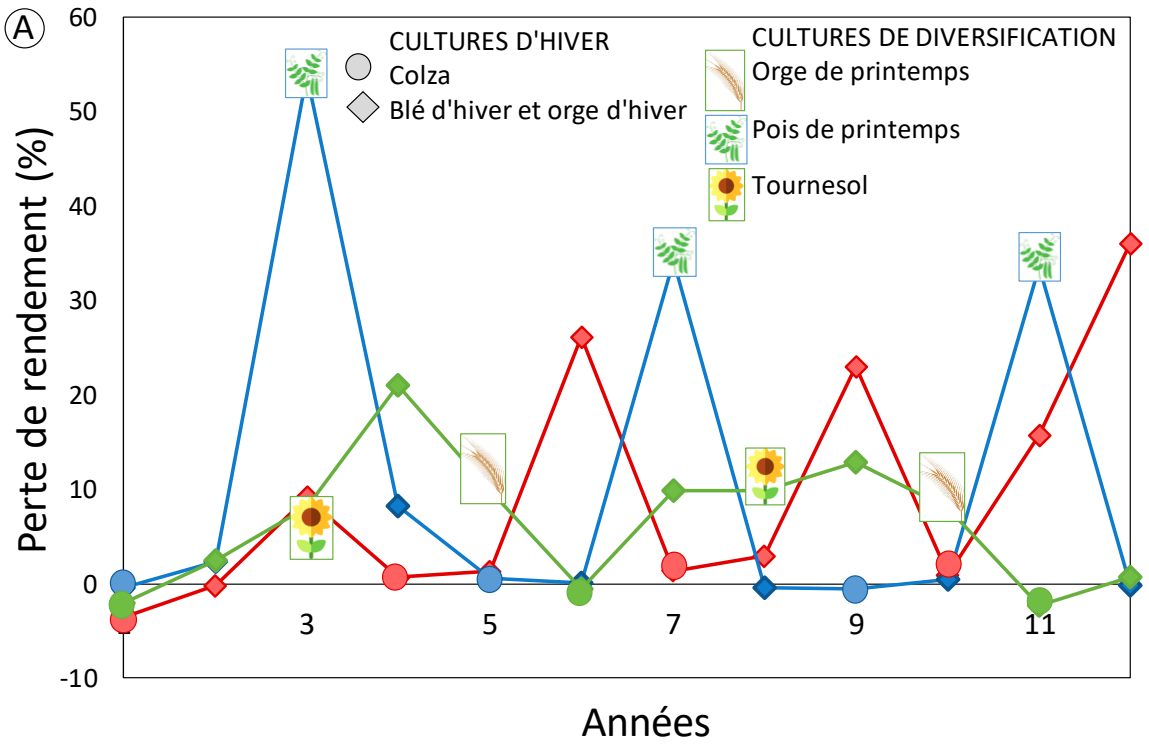
Figure 4. Effet de l'implantation d'un blé d'hiver sur l'infestation adventice de ce blé et des cultures suivantes simulé avec FLORSYS dans trois champs avec une rotation colza/blé/orge en Bourgogne. Les champs ne se distinguent que par la gestion du blé en année 1 (interculture nue avec faux semis ▲● ou couvert d'interculture ■ ; blé seul ▲■ ou semé en rangs alternés avec de la féverole ●) ; la gestion pendant les années suivantes est identique. Chaque courbe est la moyenne et l'écart-type sur dix répétitions climatiques (basé sur Colbach et al., 2014b) (Nathalie Colbach ©)

Effect of winter-wheat sowing strategy on weed infestation in this wheat and subsquent crops simulated with FLORSYS for three fields with an coilseed rape/wheat/barley rotation in Burgundy. The fields only differ in their first-year management (summer fallow with false seed bed technique ▲● or cover crop ■; wheat only ▲■ or in alternating rows of faba bean ●); management during the subsequent year is the same. Each line is the mean and standard-deviation of 10 weather repetitions.

Évaluation multicritère et long terme des systèmes de culture

L'intérêt majeur d'utiliser un modèle comme FLORSYS réside dans l'évaluation à long terme et multicritère de systèmes de culture. La Figure 5 montre un exemple d'utilisation du modèle en interaction avec des conseillers agricoles pour évaluer les avantages de la diversification des cultures, en introduisant différentes cultures de printemps dans la rotation triennale habituelle colza/blé d'hiver/orge d'hiver. Tout comme l'exemple de la section précédente, l'analyse de la dynamique de perte de rendement due aux adventices au cours du temps démontre la nécessité d'évaluation les innovations sur le long-terme. Par exemple, le pois de printemps présentait la perte de rendement la plus élevée de toutes les cultures testées (Figure 5.A) mais la perte du blé suivant était systématiquement plus faible que la perte dans des blés suivant un colza ou un tournesol, même si ces deux dernières cultures avaient elles-mêmes une perte plus faible que le pois. Par conséquent, à l'échelle de la rotation, les systèmes de culture incluant du pois de printemps avaient une meilleure performance en termes de production et (dys)services d'adventices que la rotation triennale de référence (Figure 5.B). Et les systèmes avec pois de printemps avaient une performance équivalente à celle de la rotation quinquennale incluant du tournesol et de l'orge de printemps.

En plus des critères d'évaluation de biodiversité et de nuisibilité des adventices, FLORSYS permet également d'estimer des indicateurs quasi impossibles à estimer sur le terrain, comme l'offre trophique pour les pollinisateurs ou les oiseaux due aux adventices. Dans l'exemple de la Figure 5, la diversification des cultures a permis d'améliorer tous les indicateurs de performance, augmentant le rendement et la contribution des adventices à la biodiversité tout en réduisant la nuisibilité des adventices pour la production et l'usage d'herbicides.



B	Contribution à la biodiversité				Nuisibilité pour la production			Usage
Système de culture	Richesse spécifique sauvage	Équitabilité de la flore	Offre trophique aux abeilles	Rendement (MJ/ha)	Perte de rendement (%)	Contamination de récolte	Salissement du champ	d'herbicides (IFT§)
CBO labour	11.35	0.19	1.06	69391	11.87	2.70	0.24	1.72
CBO sans labour	10.19	0.23	1.04	68695	12.55	2.83	0.29	1.79
CBpB labour	11.99	0.23	1.00	95980	10.54	1.81	0.14	1.39
CBpB sans labour	12.22	0.24	1.03	96804	9.50	1.82	0.14	1.57
CBtBo labour	12.59	0.25	1.10	98957	4.36	1.97	0.18	1.12
CBtBo sans labour	12.43	0.27	1.06	98955	4.19	1.94	0.18	1.38

§ IFT est l'indice de fréquence de traitement (un herbicide à pleine dose sur l'ensemble du champ par an = 1)

Figure 5. Effet de la diversification des cultures sur les (dys)services des adventices simulés avec FLORSYS. A. Perte de rendement moyennée sur 10 répétitions climatiques de Bourgogne en fonction du temps en l'absence de labour. B. Évaluation multicritère des (dys)services des adventices moyennés sur la rotation. Les rotations testées sont colza/blé d'hiver/orge d'hiver (CBO, —), colza/blé d'hiver/pois de printemps/blé d'hiver (CBpB, —), et colza/blé d'hiver/tournesol/blé d'hiver/orge de printemps (CBtBo, —) (basé sur Colbach et al., 2010; Colbach and Cordeau, 2018) (Nathalie Colbach ©).

Effect of crop diversification on weed (dis)services simulated with FLORSYS. A. Annual yield loss averaged over 10 weather repetitions with a Burgundy pedoclimate as a function of time in unploughed fields. B. Multicriteria evaluation of weed (dis)services averaged over rotation. The tested rotations were winter oilseed rape/winter wheat/winter barley (CBO, —), winter oilseed rape/winter wheat/spring pea/winter wheat (CBpB, —), and winter oilseed rape/winter wheat/sunflower/winter wheat/spring barley (CBtBo, —)

Démêler les effets cumulatifs et interactifs des systèmes de culture

Les avantages de la modélisation mécaniste

Certaines des évaluations des sections précédentes auraient également pu être réalisées avec des modèles empiriques, liant directement des techniques culturales aux adventices et/ou au rendement, sans simuler les processus biophysiques responsables. Un avantage-clé de modèles mécanistes comme FLORSYS est leur capacité à démêler des interactions complexes dans l'agroécosystème, et ce souvent mieux que des expérimentations au champ. Par exemple, la perte de rendement est souvent difficile à estimer au champ parce

qu'il est quasi impossible de maintenir un témoin continuellement sans adventices et identique aux parcelles infestées, toutes choses égales par ailleurs. De même, des réseaux de parcelles agricoles ne permettent généralement pas de discriminer l'effet de techniques culturales individuelles, même aussi influentes que les herbicides, parce que les agriculteurs raisonnent chaque technique en fonction des autres composantes du système de culture comme le désherbage mécanique, le travail du sol ou la rotation (Colbach and Cordeau, 2018).

Adapter le plan de simulation pour discriminer les effets

FLORSYS peut être utilisé pour démêler certaines de ces interactions à l'aide de réseaux de parcelles virtuelles couvrant une large gamme de situations de production et de types de systèmes de culture. Colbach et Cordeau (2018) ont ainsi collecté des systèmes de culture provenant d'enquêtes en exploitation agricole, du réseau Biovigilance-Flore, de conseillers agricoles etc. Puis, ils ont discriminé l'effet des herbicides des effets des autres pratiques en comparant la flore adventice et le rendement simulés pour ces systèmes à des flores et rendements simulés pour ces mêmes systèmes mais sans aucun herbicide (et aucun autre changement de pratiques). Pour dissocier les effets des adventices sur la production de ceux des pratiques, les rendements de simulations avec et sans adventices étaient comparés. Pour séparer les effets des pratiques sur la flore adventice de la réciproque (c'est-à-dire les effets de la flore sur les pratiques), les pratiques enregistrées pendant les enquêtes ont été simulées sans les adapter à la flore simulée. Pour prendre en compte les effets à long terme de la flore adventice, la dynamique de la flore et sa nuisibilité ont été évaluées à l'échelle pluriannuelle, au lieu de considérer seulement des données annuelles.

Discriminer les composantes du tryptique herbicides-adventices-rendement

Le plan expérimental de Colbach et Cordeau (2018) composé de plusieurs séries de simulation a permis de mettre en évidence que (1) le ratio de la biomasse adventice sur la biomasse de la culture au début de la floraison de la culture était le meilleur indicateur de la perte de rendement due aux adventices de l'année (Figure 6), (2) l'intensité d'usage d'herbicides n'était corrélée ni à la flore adventice ni à la perte de rendement parce que les agriculteurs compensent la réduction d'usage d'herbicides par des moyens alternatifs préventifs (par ex : faux semis) et curatifs (par ex : désherbage mécanique), (3) la biomasse adventice en culture et la perte de rendement augmentaient de respectivement 116% et 62% (en moyenne sur la rotation) lorsque les herbicides étaient supprimés sans aucun autre changement dans les pratiques agricoles, (4) les effets étaient plus visibles à l'échelle pluriannuelle (rotation) qu'annuelle.

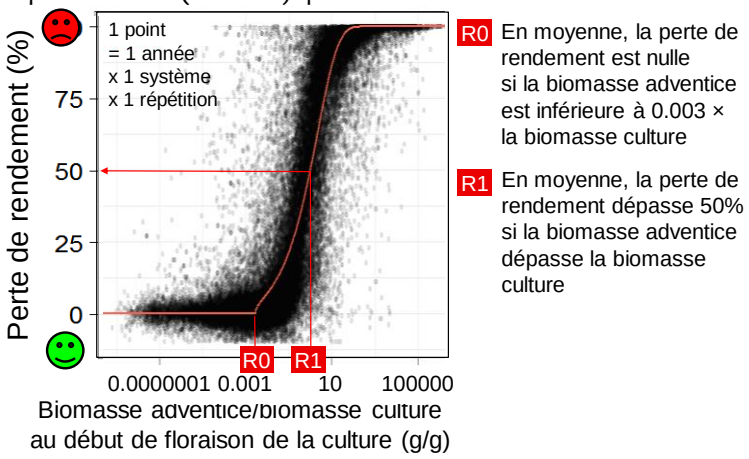


Figure 6. Fonction générique liant la perte de rendement en grain (%, càd 100 t t^{-1}) en cultures annuelles au ratio de la biomasse adventice sur la biomasse de la culture au début de la floraison de la culture, établie sur un réseau de parcelles virtuelles simulé avec FLORSYS. Chaque point est une année d'un système de culture et une répétition climatique, sur un total de 272 système x 30 années x 10 répétitions. La courbe rouge a été ajustée avec une régression non-linéaire (Nathalie Colbach © 2018) (basé sur Colbach and Cordeau, 2018)

Generic function predicting grain yield loss (%, i.e. 100 t t^{-1}) in annual crops from the ratio of weed biomass vs crop biomass at the onset of crop flowering established on a virtual farm-field network simulated with FLORSYS. Each data point is one year of one cropping system and one weather repetition out of a total of 272 cropping systems x 30 years x 10 weather repetitions. Red line fitted to data with non-linear regression

Identifier des innovations

Ce type de réseau de parcelles virtuelles peut aussi être utilisé pour d'autres objectifs, notamment pour traquer des innovations dans les pratiques des agriculteurs. Les simulations précédentes ont démontré par exemple l'importance de la diversification des cultures dans les rotations pour réduire la nuisibilité des adventices avec peu ou pas d'herbicides (Tableau 2). Trois stratégies ont été identifiées qui se différenciaient en termes de rotation, travail du sol etc. La stratégie S1 basée sur une monoculture de maïs reposait sur de nombreux traitements herbicides (mais à dose fortement réduite) et du désherbage mécanique pour contrôler la perte de rendement due aux adventices. En revanche, les deux autres stratégies diversifiaient les cultures, avec des rotations plus longues, des associations de cultures, couverts d'interculture et prairies temporaires. Combiné avec un travail du sol bien raisonné, cette diversification de cultures permettait de réduire l'usage d'herbicides sans augmenter la perte de rendement.

	Stratégie S1	Stratégie S2	Stratégie S3
Rotation	Monoculture de maïs	> 25% cultures de printemps > 25% cultures d'hiver Rotation > 4 cultures	> 36% cultures de printemps > 15% cultures d'hiver > 20% prairies temporaires
Couvert d'interculture	Non	Oui	Rare
Travail du sol	Pas de faux semis	> 3.4 opérations superficielles/an (dont > 2 faux semis/an)	
	Labour < 1 an/2	Labour oct-mars > 1 an/5	Labour oct-mars > 1 an/3
Herbicides	1.3-3 herbicides/an (doses réduites) Même programme chaque année	1.3-2.1 herbicides/an (doses réduites) Programme varie entre année	*Pas de point commun entre systèmes de culture appartenant à cette stratégie*
	Surtout des produits systémiques (> 82%)	Pas nécessairement des produits systémiques (< 82%)	
	Éviter les produits racinaires (< 12%)		*Pas de point commun*
Désherbage mécanique	0.25-1.6 opérations/an Programme varie entre année		*Pas de point commun*

Tableau 2. 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 27 ans et 10 séries climatiques. Les cellules vides indiquent que les systèmes de la stratégie n'ont rien en commun pour cette technique (basé sur Colbach and Cordeau, 2018)

Typology of farmers' cropping systems from their performance in terms of yield loss reduction (< 20%) and reduced herbicide use (TFI < 1.2). Main practices of the three best strategies identified with regression and classification trees from 272 cropping systems from six French and Spanish pedoclimates simulated with FLORSYS over 27 years and 10 weather repetitions. Empty cells indicate that the systems of the given strategy have nothing in common for the given technique.

Identifier les déterminants techniques de la performance

Les réseaux de parcelles virtuelles permettent aussi d'identifier les déterminants techniques des (dys)services liés aux adventices. Cette analyse peut se faire sur des réseaux de systèmes existants ou proposés par des experts, ou le réseau peut être étendu pour inclure aussi des systèmes randomisés construits dans un objectif d'analyse de sensibilité. C'est d'ailleurs l'approche utilisée lors de la métamodélisation de FLORSYS pour le développement de l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS (section L'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS plus bas).

Le Tableau 3 montre un exemple de déterminants techniques dans le cas de la contribution des adventices à protéger les sols de l'érosion et de la lixiviation d'azote. Cette analyse montre que le travail du sol, particulièrement les opérations profondes et/ou de retournement, est le déterminant majeur de cette protection du sol tandis que la rotation et les herbicides avaient moins d'impact.

Composantes du système de culture	Effet sur la contribution des adventices à réduire	
	Lixiviation d'azote	Érosion du sol
Délai (années) entre cultures en semis direct	-0.273	-0.356
Profondeur de travail du sol (cm)	-0.717	
Fréquence de labour en hiver (opérations/an)	-1.03	
Travail du sol superficiel (opérations/an)		
Total	-1.24	
En hiver (opérations/an)	-1.12	-12.3
Avec des disques	-9.91	-28.0
Avec un chisel	-4.49	-15.7
Avec une herse animée	-0.46	-23.9
Avec un rotavator		-30.7
Jours du semis jusqu'au premier travail du sol		0.0109
Hauteur de la broyage de résidus (cm)	-0.104	0.558
Jours du dernier roulage jusqu'au semis de la culture de rente	-0.0040	-0.0630
Rotation: proportion de		
Lin		1285
Triticale		35.8
Colza		-30.4
Orge	6.56	
Cultures de printemps	-2.43	
Pois	-10.1	
Diversité de saisons de semis[§]		16.1
Fréquence de couverts d'interculture (années/ années)	-4.57	58.3
Durée des couverts d'interculture (mois/12 mois)	-21.2	.
Date de semis des cultures de printemps	.	0.0784
Date de récolte des cultures de printemps	-0.0340	
Nombre de traitements par an avec des herbicides[&]		
Multi-entrée	-0.507	
Pseudo-racinaires	8.24	
Racinaires	-0.0853	
N (systèmes x années x répétitions)	2306	2590
R^2	0.69	0.61

[§]Proportion d'années où les cultures de rente successives n'appartiennent pas à la même catégorie (hiver, printemps ou pluriannuel)

[&]Les herbicides pénètrent dans les plantes via les feuilles ("foliaire"), méristèmes pendant la levée ("pseudo-racinaire") ou racines ("racinaire"). Plusieurs voies d'entrée sont possibles ("multi-entrée").

Tableau 3. Identification des déterminants techniques des services des adventices dans un réseau de 272 parcelles virtuelles de 6 régions simulés avec FLORSYS sur 27 ans et 10 répétitions climatiques. Exemple de la contribution des adventices à protéger le sol contre l'érosion et à réduire la lixiviation d'azote moyennée sur les 27 années simulées, en identifiant les techniques culturale-clé à l'aide de régressions LASSO. Seules les techniques dont l'effet était significatif à p=0.05 ont été retenues. Des corrélations négatives et positives indiquent respectivement les réductions et les augmentations des services liés aux adventices (basé sur Moreau et al., in revision)

Identification of key management techniques influencing weed services in a virtual farm-field network consisting of 272 cropping systems from six regions simulated with FLORSYS over 27 years and 10 weather repetitions. Example of weed-based protection from soil erosion and nitrate leaching averaged over 27 simulated years, identifying key techniques with LASSO regressions. Only techniques with a significant effect are shown. Negative and positive correlations indicate respectively decreases and increases in weed services (P < 0.05).

Identifier les traits des adventices et cultures

Une approche similaire peut être utilisée pour identifier les paramètres des adventices et cultures qui déterminent les (dys)services des adventices (Colbach *et al.*, 2014c; Colbach *et al.*, 2017; Colbach *et al.*, 2019). Le Tableau 4 montre un tel exemple où des méthodes statistiques habituelles en écologie ont été appliquées

aux données simulées pour identifier les paramètres de morphologie qui déterminent la nuisibilité des adventices pour la production en moyenne sur une large gamme de systèmes de culture et de pédoclimats. Les espèces nuisibles dans toutes les situations étaient celles qui occupaient le champ tôt et rapidement en démarrant avec une surface foliaire plus élevée à la levée et des feuilles plus fines et plus larges (surface foliaire spécifique SLA élevée dans le Tableau 4). Plus tard dans la saison, la capacité à ombrer les voisines avec des plantes plus grandes par unité de biomasse (HPS élevée) devient aussi important, même si l'occupation horizontale de l'espace reste cruciale puisque les plantes larges, indépendamment de leur biomasse (faible bLP), avec une distribution uniforme de surface foliaire (faible HMSF) sont plus nuisibles. En cas d'ombrage par les voisines, les adventices les plus nuisibles réagissent en déplaçant leurs feuilles vers le haut, pour se rapprocher de la lumière (augmentation du HMSF).

Paramètres des adventices	Stade (échelle BBCH)	Perte de rendement	Contamination des récoltes	Nuisibilité des adventices	
				Faible	Élevée
A. Paramètres de croissance précoce					
Surface foliaire à la levée (cm²)		0.21	0.17		
B. Paramètres de morphologie potentielle des plantes en conditions sans ombrage					
Surface foliaire spécifique SLA (cm²/g)	0	0.19	0.16		
	1	0.19	0.14		
	8	-0.21			
	9	-0.22			
	10	-0.20			
Hauteur de plante spécifique HPS (cm/g)	7	0.19	0.17		
	8	0.20	0.18		
	9	0.20	0.17		
	10	0.19	0.16		
Impact de la biomasse sur la largeur des plantes (bLP)	9		-0.15		
	10	-0.20	-0.17		
Hauteur relative médiane de la surface foliaire HMSF (cm/cm)	7	-0.19	-0.16		
C. Paramètres déterminant la réponse à l'ombrage					
Augmentation de la hauteur relative médiane de la surface foliaire HMSF	6		0.15		
	7		0.15		
	10		0.15		

Tableau 4. Identification des paramètres de morphologie des adventices qui déterminent leur nuisibilité pour la production. Coefficients de corrélation de Pearson entre paramètres des adventices et nuisibilité annuelle estimés par analyses RLQ et 4th corner liant les matrices de paramètres adventices, densités adventices et indicateur de dysservices simulés sur 272 systèmes de culture, 27 années et 10 répétitions climatiques. Seules les corrélations > 0.10 et significatives à p=0.05 sont listées. Les cellules sont colorées de vert (-1) à rouge (1) en fonction des valeurs de coefficients. Les images des deux dernières colonnes illustrent les caractéristiques morphologiques des adventices aboutissant à une nuisibilité faible et élevée, respectivement (basé sur Colbach et al., 2019) (Nathalie Colbach ©)

Which weed plant-morphology parameters drive weed harmfulness for crop production? Pearson correlation coefficients between weed parameters and annual weed harmfulness indicators estimated with RLQ and 4th corner analyses linking tables of weed parameters, weed plant densities and (dis)service indicators simulated over 272 cropping systems, 27 years and 10 weather repetitions. Only correlations exceeding 0.10 and significant at p=0.05 were kept in the table. Cells with correlations were coloured from green (-1) to 1 (red), depending on coefficient values. The pictures in the last two column illustrate the morphological characteristics of weeds resulting in respectively low or high weed harmfulness for crop production

Aide à la décision pour les acteurs

L'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS

Les exemples précédents montrent les multiples utilisations de FLORSYS pour de l'expérimentation virtuelle, du diagnostic et de l'ajustement fin de systèmes de culture conçus par des agriculteurs, conseillers et autres experts. Cependant, FLORSYS reste un modèle de recherche, inadapté notamment pour une utilisation en direct dans des ateliers de co-conception de systèmes de culture avec des acteurs. En effet, (1) le modèle a besoin de nombreuses variables d'entrée souvent difficiles à renseigner, (2) son approche mécaniste et individu-centrée nécessite des algorithmes complexes et rend les simulations très lentes, et (3) il évalue des prototypes de systèmes de culture plutôt que de proposer ou concevoir de tels systèmes (Colbach, 2010).

Pour lever ces verrous et faciliter le transfert vers les acteurs, nous avons transformé ("métamodélisé") FLORSYS en un outil plus simple (DECIFLORSYS) imitant le fonctionnement du modèle de recherche (Figure 1). Cette transformation est basée sur des analyses de sensibilité et de la fouille de données (arbres de régression et classification, forêts randomisées), et a été réalisée avec des conseillers et agriculteurs pour s'assurer que le nouvel outil d'aide à la décision réponde 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, 2018). Au lieu d'utiliser des listes d'opérations culturales détaillées comme FLORSYS, DECIFLORSYS agrège ces listes sous forme de méta-règles de décision à l'échelle de la rotation (Figure 1) similaires aux variables utilisées pour identifier les déterminants techniques des (dys)services des adventices (par ex : proportion de cultures de printemps dans la rotation, fréquence de labour, Tableau 3).

Bien que DECIFLORSYS sache classer les systèmes de culture en termes de (dys)services des adventices aussi bien que FLORSYS, cet outil ne permet ni de diagnostiquer les causes des performances des systèmes ni d'évaluer précisément les interactions avec le pédoclimat (Colas, 2018). En effet, DECIFLORSYS prédit directement les indicateurs de (dys)services sans passer par des variables illustrant les processus biophysiques responsables des effets des techniques culturales (Figure 1). Ceci peut être un problème pour des techniques qui interagissent fortement avec les états du milieu, comme par exemple la date du travail du sol avec l'humidité du sol (Figure 3). Dans ce cas, il faut retourner vers FLORSYS pour quantifier cette variabilité et identifier les conditions de réussite des pratiques.

Utiliser les modèles pour promouvoir la gestion agroécologique des adventices

Nous avons également utilisé FLORSYS et son dérivé DECIFLORSYS dans des ateliers de co-conception de systèmes de culture avec des conseillers et agriculteurs. Impliquer les acteurs de terrain est indispensable puisque 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 leur gestion du risque (Wilson *et al.*, 2008). Les conseillers peuvent aussi être réticents pour promouvoir des ruptures dans les systèmes (Pasquier and 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, 2018) qui permet aux acteurs de voir immédiatement les conséquences des changements de pratiques dans le cas particulier de leur situation de production.

Cependant, utiliser des modèles avec des agriculteurs et conseillers est différent de l'utilisation en recherche (Figure 7.C vs. B). Dans les ateliers, les agriculteurs partent de leur propre expérience ; ils sont impliqués à toutes les étapes et reçoivent un retour immédiat sur la performance des systèmes testés si des outils comme DECIFLORSYS sont utilisés. Tout ceci fait que les solutions développées sont plus acceptables et adaptées à leur contexte. En revanche, le risque de rater des solutions hautement performantes en restant dans les conventions actuelles est bien plus élevé. La meilleure approche pour étudier une large gamme de solutions innovantes est basée sur des algorithmes d'optimisation (Figure 7.A) déjà utilisés avec des modèles plus simples et rapides que FLORSYS et qui sont maintenant adaptées à FLORSYS (Maillot *et al.*, 2019).

Dans les deux cas, optimisation par algorithmes et atelier de co-conception à l'aide de modèles non mécanistes, l'apprentissage issu du diagnostic des performances des systèmes est négligé. Or, ce diagnostic est essentiel pour améliorer des systèmes de culture (Figure 7.B) et contribue également à l'acceptabilité des innovations par les agriculteurs. En effet, lors de nos ateliers de co-conception avec les agriculteurs, ces derniers ont regretté que DECIFLORSYS n'expliquait pas les raisons des performances des systèmes testés, et ils ont apprécié l'apport de FLORSYS pour identifier la technique ou l'évènement responsables d'une augmentation de l'infestation adventice (Van Inghelandt *et al.*, 2019).

Prise en main potentielle par les acteurs de terrain

FLORSYS est un modèle de recherche et n'est pas destiné à être utilisé directement par les agriculteurs. Ses nombreuses entrées et sorties le rendent difficile à prendre en main pour des non-modélisateurs, même si des rares conseillers l'ont déjà tenté. Jusqu'à présent, à des rares exceptions près, les simulations sont réalisées par notre équipe de modélisateurs qui a pris en charge les simulations. Cependant, nos interactions avec les conseillers et agriculteurs ont montré que ces acteurs sont intéressés pour utiliser cet outil, pour son potentiel de diagnostique (Colas, 2018; Colas *et al.*, accepted). Nous prévoyons donc de produire une version plus simple et dotée d'une interface graphique, où les entrées les plus difficiles d'accès sont fournies avec le modèle, et en fonction de la situation de production.

DECIFLORSYS a, au contraire, été développé pour et avec les acteurs de terrain. Sa prise en main par des conseillers et agriculteurs sera donc plus facile. Pour rendre l'outil plus ergonomique, nous allons le doter d'une meilleure interface graphique dans le cadre d'un projet Plant2Pro démarrant en janvier 2020. Ce travail se fera de nouveau avec des utilisateurs, et sera accompagné d'ateliers de prise en main.

Conclusion

FLORSYS est l'un des rares modèles mécanistes qui incluent tous les processus-clés pertinents pour les effets des systèmes de culture sur la flore adventice, et ce à une échelle suffisamment précise pour produire des résultats permettant non seulement de comparer des systèmes de culture mais aussi d'apprécier la variabilité de leurs performances. De nombreuses variables décrivant les états du milieu et des peuplements cultivés et adventices permettent d'identifier les causes des effets des techniques culturales et des performances des systèmes de culture. Ce diagnostic est essentiel pour (1) améliorer la performance des systèmes, (2) connaître le domaine de validité des règles de décision proposées pour gérer la flore adventice, et aussi (3) améliorer l'acceptabilité des systèmes de culture innovants co-conçus avec des agriculteurs.

En termes de gestion agroécologique des adventices, les cas d'étude présentés ici ont démontré que généralement (1) la diversification des cultures et des pratiques est essentielle pour réguler les adventices avec peu ou pas d'herbicides, (2) beaucoup de conclusions sur la gestion des adventices n'ont qu'une valeur locale, ce qui démontre (3) la nécessité de règles flexibles et le rôle des modèles comme FLORSYS et l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS pour établir ces règles, et (4) la possibilité d'utiliser des tels modèles pour discuter avec les agriculteurs et conseillers en ateliers.

Remerciements

Au fil des années, FLORSYS a bénéficié de nombreux financements et collaborations. Actuellement, FLORSYS est financé par l'INRA, le projet ANR CoSAC (ANR-15-CE18-0007), les projets Horizon 2020 Research and innovation programme de l'Union Européenne ReMIX (grant agreement N 727217) et IWMPRAISE (N 727321), et le projet Casdar RAID financé par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale 'Développement agricole et rural'.

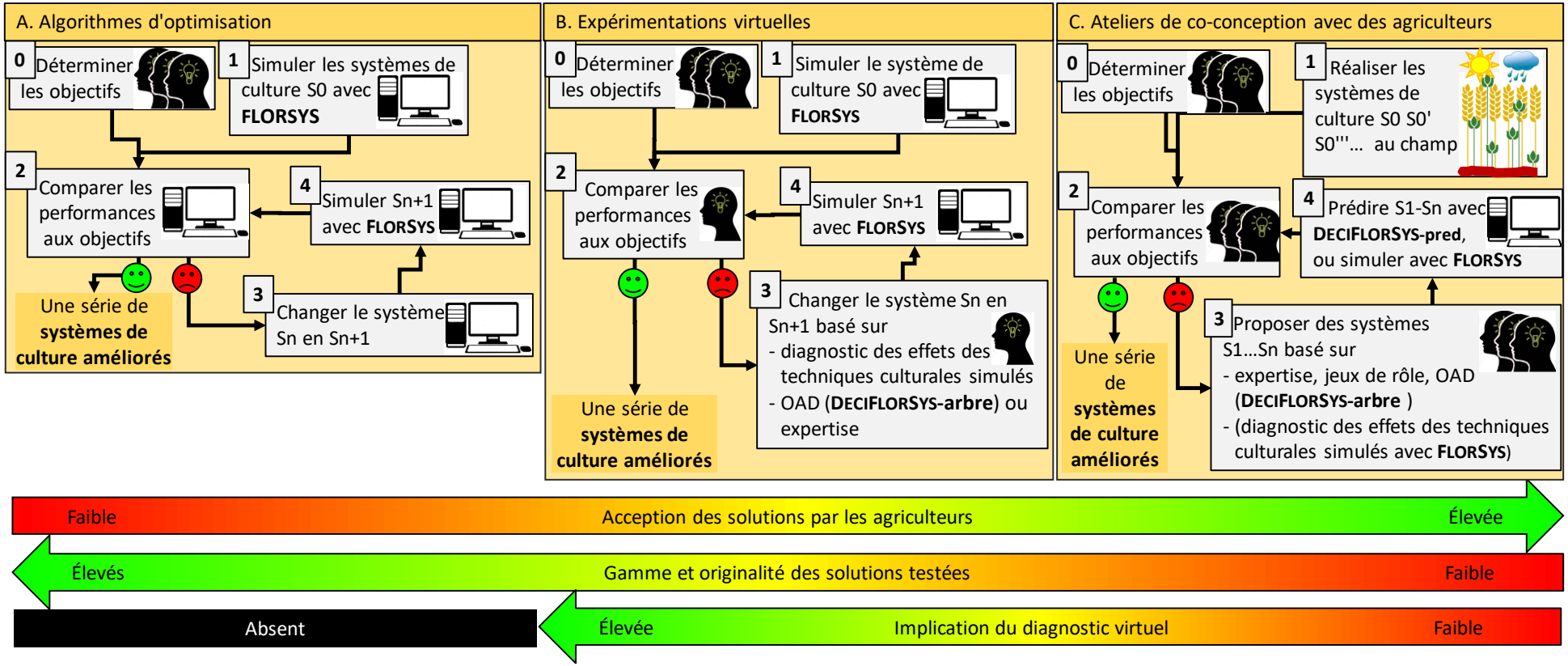


Figure 7. Trois méthodes d'utilisation de FLORSYS pour concevoir des systèmes de culture innovants via une amélioration pas-à-pas d'un système de culture initial S0. A. Les algorithmes d'optimisation gèrent toutes les étapes en interaction avec FLORSYS, à l'exception des objectifs et contraintes des nouveaux systèmes qui sont déterminés par un groupe d'experts. B. Dans le cas d'expérimentations virtuelles, les experts fixent les objectifs et contraintes, comparent les performances simulées des systèmes à ces objectifs et proposent des innovations, suite à un diagnostic des variables d'état simulées par FLORSYS, de l'expertise et de l'arbre de décision de DECIFLORSYS. C. Les ateliers de co-conception avec les agriculteurs démarrent souvent avec un ou plusieurs systèmes défaillants sur le terrain ; des innovations sont proposées par un groupe d'agriculteurs et d'autres experts utilisant une variété d'outils (dont éventuellement du diagnostic sur base de simulations FLORSYS) et ces systèmes sont évalués en direct par le calculateur de DECIFLORSYS, ce qui peut déclencher un nouveau tour de re-conception (Nathalie Colbach © 2019)

Three ways to use the FLORSYS tools to design innovative cropping systems with a step-by-step improvement on an initial cropping system S0. A. Optimization algorithms manage all steps in interaction with FLORSYS, except fixing the aims and constraints for the novel cropping systems, which are determined by a group of experts. B. When running virtual experiments, experts fix aims and constraints, compare the simulated performance of the systems to these aims and propose innovative systems, from expert knowledge and the decision tree of DECIFLORSYS. C. Participatory workshops including farmers often start with a system that performed badly in the field; innovative systems are proposed by a group of interacting farmers and other experts using a variety of tools and these systems are evaluated by the predictor component of DECIFLORSYS to benefit from an immediate feed back that sets off another round of system design

Références bibliographiques

Bonin L. (2009) Combinaisons de techniques: un désherbage integré pour durer? Perspectives agricoles 361, 22-24

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. Pages 467-476 *in* AFPP, editor. AFPP - 23ème Conférence du COLUMA - Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France

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

Colas F., Cordeau S., Granger S., Jeuffroy M.-H., Pointurier O., Queyrel W., Rodriguez A., Villerd J., Colbach N. (accepted) Co-development of a decision support system for integrated weed managment: contribution from future users. European Journal of Agronomy,

Colbach N., Dürr C., Roger-Estrade J., Caneill J. (2005) How to model the effects of farming practices on weed emergence. Weed Research 45, 2-17

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., Schneider A., Ballot R., Vivier C. (2010) Diversifying cereal-based rotations to improve weed control. Evaluation with the ALOMYSYS model quantifying the effect of cropping systems on a grass weed. OCL 17, 292-300

Colbach N., Biju-Duval L., Gardarin A., Granger S., Guyot S. H. M., Mézière D., Munier-Jolain N. M., Petit S. (2014a) The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. Weed Research 54, 541–555

Colbach N., Collard A., Guyot S. H. M., Mézière D., Munier-Jolain N. M. (2014b) Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. European Journal of Agronomy 53, 74-89

Colbach N., Granger S., Guyot S. H. M., Mézière D. (2014c) A trait-based approach to explain weed species response to agricultural practices in a simulation study with a cropping system model. Agriculture, Ecosystems & Environment 183, 197-204

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) Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. European Journal of Agronomy 94, 67-78

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

Colbach N., Chauvel B., Messéan A., Villerd J., Bockstaller C. (submitted) Feeding pollinators from weeds could promote pollen allergy. A simulation study. Ecological Indicators,

Fried G., Norton L. R., Reboud X. (2008) Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. Agriculture, Ecosystems & Environment 128, 68-76

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

Gardarin A., Coste F., Wagner M.-H., Dürr C. (2016) How do seed and seedling traits influence germination and emergence parameters in crop species? A comparative analysis. Seed Science Research 26, 317-331

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

Kervroëdan L., Armand R., Saunier M., Ouvry J.-F., Faucon M.-P. (2018) Plant functional trait effects on runoff to design herbaceous hedges for soil erosion control. Ecological Engineering 118, 143-151

Lewis J. (1973) Longevity of crop and weed seeds: survival after 20 years in soil. Weed Research 13, 179-191

Liebman M., Gallandt E. R. (1997) Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions. *in* L. E. Jackson, editor. Ecology in Agriculture. Academic Press, 291-343

Loyce C., Wéry J. (2006) Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture. *in* T. Doré, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney and J. Roger-Estrade, editors. L'agronomie aujourd'hui. QUAE Éditions, 77-95

Maillot T., Mion M., Vioix J.-B., Colbach N. (2019) Conception de systèmes de cultures par algorithmes d'optimisation. Pages 32-35 *in* N. Colbach, F. Angevin, C. Bockstaller, B. Chauvel, C. Denieul, D. Moreau, B. Omon, D. Pellet, A. Rodriguez, L. Trannoy, S. Volan and F. Vuillemin, editors. Gestion des adventices dans un contexte de changement - Séminaire CoSAC Paris, France

Marshall E. J. P., Brown V. K., Boatman N. D., Lutman P. J. W., Squire G. R., Ward L. K. (2003) The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. Weed Research 43, 77-89

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., Dedieu B., Bos A. P. (2012) Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. *in* I. Darnhofer, D. Gibons and B. Dedieu, editors. Farming Systems Research Into the 21st Century: The New Dynamic. Springer, Dordrecht, 407–432

Meynard J. M., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M. B., Charlier A., Messean 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

Moreau D., Pointurier O., Nicolardot B., Villerd J., Colbach N. (in revision) In which cropping systems can residual weeds reduce nitrate leaching and soil erosion? European Journal of Agronomy,

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

Neyret M., Robain H., Rouw A., Soulileuth B., Trisophon K., Jumpa K., Valentin C. (2018) The transition from arable lands to rubber tree plantations in northern Thailand impacts weed assemblages and soil physical properties. Soil Use and Management 34, 404-417

Pasquier C., Angevin F. (2017) Freins et leviers à la réduction de l'usage d'herbicides en grande culture. Pages 67-69 *in* N. Colbach, D. Moreau, F. Angevin, A. Rodriguez, S. Volan and 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

Petit S., Boursault A., Le Guilloux M., Munier-Jolain N., Reboud X. (2011) Weeds in agricultural landscapes. A review. Agronomy for Sustainable Development 31, 309-317

Van Inghelandt B., Queyrel W., Cavan N., Colas F., Guyot B., Colbach N. (2019) Combiner expertise et modèles en ateliers de co-conception de systèmes de culture pour une gestion durable des adventices : apports méthodologiques et perspectives. Pages 39-41 *in* N. Colbach, F. Angevin, C. Bockstaller, B. Chauvel, C. Denieul, D. Moreau, B. Omon, D. Pellet, A. Rodriguez, L. Trannoy, S. Volan and F. Vuillemin, editors. Gestion des adventices dans un contexte de changement - Séminaire CoSAC Paris, France

Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A., Peigné J. (2014) Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development 34, 1-20

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