



Conception de systèmes de culture multiperformants à l'aide de modèles prédisant la nuisibilité et les services dépendant des adventices

Nathalie Colbach, Christian Bockstaller, Floriane Colas, Stéphanie Gibot-Leclerc, Sylvie Granger, Sébastien Guyot, Delphine Meziere, Delphine Moreau, Olivia Pointurier, Wilfried Queyrel, et al.

► To cite this version:

Nathalie Colbach, Christian Bockstaller, Floriane Colas, Stéphanie Gibot-Leclerc, Sylvie Granger, et al.. Conception de systèmes de culture multiperformants à l'aide de modèles prédisant la nuisibilité et les services dépendant des adventices. *Innovations Agronomiques*, 2017, 59, pp.191-203. 10.15454/1.5138499805203516E12 . hal-01858525

HAL Id: hal-01858525

<https://hal.science/hal-01858525>

Submitted on 20 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Conception de systèmes de culture multiperformants à l'aide de modèles prédisant la nuisibilité et les services dépendant des adventices

Colbach N.¹, Bockstaller C.², Colas F.¹, Gibot-Leclerc S.¹, Granger S.¹, Guyot S.¹, Mézière D.¹, Moreau D.¹, Pointurier O.¹, Queyrel W.¹, Villerd J.^{1,3}, Voisin A-S.¹

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

² LAE, INRA, Université de Lorraine, F-68500 Colmar

³ LAE, INRA, Université de Lorraine, F-54500 Vandoeuvre-lès-Nancy

Correspondance: Nathalie.Colbach@inra.fr

Résumé

Les adventices ("mauvaises herbes") peuvent être nuisibles pour la production agricole mais sont essentielles pour la biodiversité. Nous avons analysé et modélisé les processus biophysiques impliqués dans les effets des techniques culturales sur la flore adventice ainsi que l'impact des adventices sur la production agricole (ex. perte de rendement, « salissement » du champ) et sur les composantes biotiques bénéfiques (ex. abeilles) et nuisibles (ex. la plante parasite orobanche rameuse) pour la production agricole. Nous avons développé et utilisé des outils et méthodes de simulation pour évaluer et concevoir des systèmes de culture conciliant production agricole, biodiversité et réduction d'usage d'herbicide. Concilier un haut niveau de performances s'avère encore difficile pour ces trois objectifs mais faisable pour deux objectifs (production et biodiversité, ou production et réduction des herbicides).

Mots-clés : Adventice, Modèle, Système de culture, Evaluation multicritère, Conception multi-objectifs, Biodiversité, Nuisibilité, IFT Herbicide, Processus biophysique, Service écosystémique, Dys-service, Protection intégrée.

Abstract: Designing multiperformant cropping systems with models predicting weed-related harmfulness and services

Weeds may be harmful for crop production but are essential for biodiversity conservation. In this project, we analysed and modelled the biophysical processes driving the effects of cultural techniques on weed flora and the latter's impact on crop production (e.g. yield loss, field infestation) and on other biotic components that are either beneficial (e.g. bees, birds) or harmful (e.g. the parasitic plant broomrape) for crop production. We developed and used tools and simulation methods to evaluate and design cropping systems that reconcile crop production, biodiversity and reduced herbicide use. Achieving a high performance for these three objectives was difficult though achieving it for two of them (production and biodiversity, or production and reduced herbicide use) was feasible.

Keywords: Weed, Model, Cropping system, Multicriteria evaluation, Multi-objective design, Biodiversity, Harmfulness, Herbicide frequency treatment index, Biophysical process, Ecosystem service, Disservice, Integrated crop protection.

Introduction

Parmi les bioagresseurs visés par les pesticides, les adventices sont considérées comme les plus nuisibles pour la production agricole si elles ne sont pas contrôlées (Oerke, 2006). Elles peuvent aussi servir de réservoir à d'autres bioagresseurs (ex. de la plante parasite orobanche rameuse, Gibot-Leclerc et al., 2013 ; ex. du piétin-échaudage des céréales, Gutteridge et al., 2006). Toutefois, dans les

agroécosystèmes, les adventices sont la composante majeure de la biodiversité végétale sauvage et elles servent de ressource trophique à de nombreuses autres composantes de la biodiversité (ex. pollinisateurs, insectes et oiseaux granivores, Marshall et al., 2003). Aujourd'hui, les agriculteurs utilisent essentiellement des herbicides pour contrôler les adventices alors qu'il faut réduire l'emploi des herbicides pour des raisons environnementales, sanitaires et réglementaires. La gestion des adventices est compliquée par la survie pluriannuelle de leurs semences dans le sol (Gardarin et al., 2010) et la dispersion de ces semences entre parcelles (Menalled et al., 2000). Les stratégies de gestion des adventices économes en herbicides doivent systématiquement combiner diverses composantes du système de culture pour aboutir à une gestion intégrée mettant à profit tous les effets préventifs et curatifs possibles (Liebman et Gallandt, 1997) et tenter de concilier plusieurs objectifs souvent antagonistes en termes de gestion de la flore adventice (long vs. court terme, nuisibilité vs. biodiversité).

L'objectif de notre étude est (1) de contribuer à la compréhension du fonctionnement de l'agro-écosystème, notamment des effets des systèmes de culture sur la flore adventice et un cortège de composantes biotiques associées (plante parasite, champignon pathogène, pollinisateurs...) via l'adaptation d'un modèle de dynamique des adventices existant (FLORSYS, Colbach et al., 2014), (2) d'évaluer des systèmes de culture *ex ante* par simulation pour identifier les systèmes optimaux permettant de **réduire les herbicides** et **préserver la biodiversité** tout en **maintenant la production agricole**. La modélisation constitue un fil rouge dans ce projet. Elle a permis (1) d'organiser les recherches en identifiant les lacunes dans nos connaissances et donc les expérimentations à mettre en place, (2) de quantifier, synthétiser et combiner les résultats de ces expérimentations sous forme d'outil prédictif, puis (3) d'utiliser cet outil pour évaluer et concevoir des stratégies de gestion des adventices.

1. Étude expérimentale des interactions adventices-parasite

Différentes expérimentations ont été mises en place pour étudier les interactions entre adventices et d'autres bioagresseurs, notamment la plante parasite orobanche rameuse (*Phelipanche ramosa* L.). L'objectif est double: (1) identifier les connaissances nécessaires pour apprécier le risque que la flore adventice amplifie d'autres bioagresseurs, (2) obtenir des données pour intégrer ces interactions dans le modèle FLORSYS.

1.1 L'orobanche, un parasite nuisible infectant cultures et adventices

La plante parasite orobanche rameuse est fréquente et nuisible en France sur colza, elle infeste également les cultures de chanvre ou de tabac ainsi qu'une série d'espèces adventices (Gibot-Leclerc et al., 2013). Les semences d'orobanche ne germent que si elles sont stimulées par des exsudats racinaires de plantes voisines et la quantité de semences stimulées dépend du volume exploré par les racines (Grenz et al., 2005). Une fois germé, cet holoparasite (incapable de faire de la photosynthèse) doit se fixer sur des racines d'une plante sensible située à proximité afin de lever, se reproduire et réalimenter le stock semencier du sol. Les plantes cultivées et adventices peuvent (1) stimuler des germinations du parasite et permettre la fixation et la reproduction du parasite (espèces hôtes), (2) uniquement stimuler des germinations (faux hôtes), ou (3) ni stimuler ni permettre des fixations (non-hôtes). Les faux hôtes et les hôtes détruits avant la grenaison du parasite peuvent servir d'espèces « piège » pour réduire le stock semencier parasite. Plusieurs pathovars d'orobanche rameuse existent, notamment les pathovars O-colza et O-chanvre dont les hôtes préférentiels sont le colza et le chanvre, respectivement (Le Corre et al., 2014).

1.2 Caractérisation expérimentale pour construire le modèle

Seules les semences parasites proches de racines hôtes peuvent germer et se fixer sur un hôte. Pour connaître le volume de sol exploré par des racines de plantes, nous avons mesuré des paramètres d'architecture racinaire sur une large gamme d'espèces adventices et cultivées (y compris différentes variétés de pois) et en fonction de la disponibilité en azote. Les espèces et variétés diffèrent fortement au niveau de l'émission, de l'élongation et de la ramification des racines (facteurs de variations entre espèces compris entre 2.4 et 4.1 selon les paramètres) (Moreau et al., 2017). En revanche, les règles qui gouvernent l'architecture racinaire sont peu affectées par le statut azoté de la plante et par la disponibilité en azote du sol (au plus 10% de variation).

Plusieurs autres essais au champ et en serre (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ont été mis en place pour quantifier le potentiel infectieux des semences parasites au cours des saisons, le risque d'infection des plantes dans des couverts plurispécifiques, et les relations trophiques hôte-parasite.

Tableau 1 : Exemples de résultats expérimentaux sur le cycle de vie du parasite orobanche rameuse (*Phelipanche ramosa*) et conséquences pour la gestion du parasite au champ

Stade/processus	Observation	Conséquences pour le choix des techniques culturales
Mortalité des semences parasites §	6-8% par an	Enfouir les semences par un travail profond et compter sur leur mortalité naturelle pour réduire le stock semencier n'est pas efficace étant donné leur faible taux de mortalité annuel.
Sensibilité saisonnière des semences parasites aux exsudats racinaire §	<20% des semences sensibles aux exsudats de germination en hiver	Décaler la date de semis permet de décaler la croissance de la culture vers la période de dormance des semences du parasite, ce qui limite leur germination en culture.
Facilitation de l'infection des hôtes §	+155% de fixations parasites sur colza en association avec la vesce et la luzerne (par rapport à la culture en pur)	Éviter les associations colza/légumineuses facilitatrices en culture de rente ; utiliser ces associations en espèce "piège" en interculture
Sensibilité des hôtes et reproduction du parasite &	<i>Geranium dissectum</i> est particulièrement sensible au parasitisme (-90% de biomasse dû au parasitisme Vs -20% de biomasse chez 2 Brassicacées) mais son cycle court ne permet pas la reproduction du parasite	Favoriser les adventices hôtes à cycle court en tant qu'espèces "piège"
	Croissance du parasite environ 50 fois plus forte sur le colza que sur le géranium	Détruire les repousses de colza et les adventices Brassicacées à cycle long

§ (Pointurier et al., 2016), § (Gibot-Leclerc et al.), & (Moreau et al., 2016)

1.3 Conséquences pour la gestion du parasite

Ces résultats peuvent déjà contribuer à raisonner certaines techniques culturales en vue de la gestion du parasite (Tableau 1). Cependant, ce raisonnement est rendu difficile par les interactions entre processus ou techniques, et les effets long-terme. C'est à ces échelles que la modélisation est indispensable.

2. Modélisation de processus biophysiques

2.1 Les principes de la parcelle virtuelle "FLORSYS"

FLORSYS (Colbach et al., 2014) est un modèle simulant le couvert cultivé et la flore adventice d'un champ virtuel à un pas de temps journalier sur plusieurs années, et ce pour une large gamme de situations agricoles et pédoclimatiques. L'utilisateur fournit en entrée la liste détaillée des opérations culturales appliquées à la parcelle virtuelle (cultures, variétés, dates, types et réglages des outils,

densités, doses, ...), les caractéristiques de la parcelle (texture du sol, latitude, flore potentielle régionale) et des fichiers météorologiques (température, rayonnement, précipitation, évapotranspiration) journaliers sur plusieurs années.

Ces entrées jouent sur les stades (semences vivantes, dormantes et germées...) et processus (photosynthèse, respiration, croissance, phénologie, étiolement) du cycle de vie des adventices et des cultures. À maturité, les semences produites par les adventices sont ajoutées au stock semencier, celles des cultures sont récoltées et déterminent le rendement. FLORSYS est actuellement paramétré pour 25 espèces adventices fréquentes et contrastées.

2.2 De nouveaux modules pour répondre à de nouvelles questions

FLORSYS a été amélioré par l'ajout de nouveaux modules afin de répondre à des nouvelles questions, en y intégrant les interactions entre adventices et d'autres bioagresseurs, la résistance aux herbicides et le voisinage extra-parcellaire (Tableau 2).

Tableau 2 : Synthèse des modules intégrés dans FLORSYS dans le cadre du projet, avec leurs raisons et applications possibles.

	Interaction adventice-bioagresseur		Résistance aux herbicides		Voisinage extra-parcellaire
Raison	La gestion intégrée tolère une flore adventice résiduelle qui sert de relais à d'autres bioagresseurs		La limitation des molécules autorisées et la réduction de doses augmentent le risque de résistance. Le glyphosate est utilisé fréquemment et sur des surfaces étendues, notamment en travail du sol simplifié.		Les semences adventices se dispersent dans les paysages
Objet	Plante parasite orobanche rameuse (<i>Phelipanche ramosa</i>)	Agent pathogène du piétin-échaudage des céréales (<i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i>)	Inhibiteurs de l'ACCase	Glyphosate	Dispersion par vecteurs naturels
Approche	Mécaniste	Statistique	Multi-allèle, coût de résistance multi-processus §	Bi-allèle, coût mono-processus §	Mosaïque parcellaire spatialement explicite
Origine des connaissances	Expérimentations et littérature (cf. section 1)	Littérature	Expérimentations passées	Littérature	Littérature
Que peut-on tester?	• les pratiques économes en herbicides influencent-elles d'autres bioagresseurs ? • la flore adventice augmente-t-elle d'autres bioagresseurs ? • des bioagresseurs contribuent-ils à réguler la flore adventice ?		Évaluer les systèmes de culture innovants pour leur risque d'apparition de résistance aux herbicides.		Faut-il concilier production agricole et biodiversité sur un ensemble de parcelles ("landsparring"), ou dans chaque parcelle ("landsharing")?
Références	(Pointurier et al., 2016)	(Mézière et al., 2013)	(Colbach et al., 2016b)	(Colbach et al., 2017e)	(Colbach et al., 2017c)

§ Si coût mono-processus, seule la production de semences des mutants en l'absence d'herbicides est plus faible que celles des populations sensibles ; sinon, d'autres processus (dormance, germination, croissance pré-levée) peuvent être affectés.

Les approches utilisées sont très diverses, dépendant non seulement de l'objectif mais aussi du niveau de connaissances. Par exemple, les expérimentations du chapitre 1 ont permis de modéliser la dynamique du parasite orobanche rameuse sous forme mécaniste, calquée sur FLORSYS et destinée à être connectée à celui-ci, avec des adaptations pour rendre compte des spécificités du parasite (Pointurier et al., 2016).

En revanche, les connaissances sur le champignon pathogène, *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*, ne sont pas suffisantes pour un modèle mécaniste compatible avec FLORSYS, et nous avons adapté un modèle empirique existant qui quantifie les effets des pratiques agricoles sur l'incidence de la maladie en céréales (Mézière et al., 2013). Nous avons également profité d'un modèle existant pour calculer la dispersion des semences entre parcelles à partir de fonctions de dispersion individuelles (CaliFloPP, Bouvier et al., 2009), en faisant dépendre la distance de dispersion du mode de dispersion de l'espèce (ex. vent, gravité, faune), de la hauteur des plantes et de la masse des semences (Colbach et al., 2017c). Enfin, FLORSYS a été évalué pour déterminer son domaine de validité et l'erreur de prédiction, puis identifier les points à améliorer dans le futur (Colbach et al., 2016a).

2.3 Traduire la flore adventice en indicateurs de nuisibilité et bénéfiques

FLORSYS prédit la flore adventice dans les systèmes de culture via une série de variables journalières détaillées (stock semencier, densités de plantes, biomasses...). Pour simplifier l'évaluation des systèmes de culture, ces variables sont traduites en indicateurs d'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité sauvage et la protection de l'environnement physique (Tableau 3).

Les indicateurs de nuisibilité ont été développés à partir d'enquêtes auprès des agriculteurs, ceux de biodiversité en collaboration avec des écologues (Mézière et al., 2015), et ceux de l'environnement physique avec des chercheurs experts de chaque processus. L'intérêt de ces indicateurs (notamment ceux de nuisibilité) pour les conseillers et agriculteurs a été vérifié dans une nouvelle série d'enquêtes (Colas et al., 2015).

Les indicateurs sont tous basés sur le même principe (Mézière et al., 2015): (1) identification d'une ou plusieurs variables d'état adventices pertinente(s) pour l'impact à évaluer (ex. densité de semences à la surface du sol pour l'indicateur d'offre trophique pour les oiseaux), (2) identification de la période d'impact clé (ex. l'hiver est la période de disette des oiseaux), (3) détermination des traits fonctionnels traduisant l'impact des espèces adventices sur l'organisme ou le processus visé (ex. attraction visuelle, accessibilité et récompense pour l'appétance des fleurs pour les pollinisateurs, Ricou et al., 2014) à partir de la littérature ou de suivis sur le terrain (ex. suivi des visites de fleurs par des papillons, Meyer, 2014), avec éventuellement une agrégation à l'aide d'un arbre de décision associant de la logique floue (Ricou et al., 2014).

Les indicateurs reflètent généralement un impact potentiel, par exemple une offre trophique potentielle pour la faune; ils n'évaluent pas un service effectif, par exemple si les organismes cibles sont effectivement présents et bénéficient de l'offre trophique.

Tableau 3 : Les indicateurs d'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement physique.

Impact	Signification	Analysé à partir de ...	Source	Importance (%) pour les agriculteurs ⁺
Nuisibilité				0100
Directe	Perte de rendement	Rendement avec versus sans adventices	\$	
	Contamination de récolte	Semences et biomasse adventice		
Indirecte	Promotion de pathogènes	Céréales malades avec versus sans adventices		
	Promotion de parasites (orobanche rameuse)	Biomasse adventice d'espèces stimulatrices ou fixatrices	&	
Technique	Ralentissement des chantiers de récolte	Biomasse adventice à la récolte	\$	
Sociologique	Un champ "sale" impacte la réputation de l'agriculteur auprès de ses pairs, indépendamment de l'effet sur la production	Biomasse adventice en culture		
Biodiversité sauvage				
Végétale	Richesse spécifique	Nombre d'espèces adventices	\$	
	Équitabilité de la flore	Indice de Piélou		
Ressources trophiques pour	Abeilles	Fleurs adventices source de nectar et pollen du printemps à l'automne	♦	
	Autres pollinisateurs et Lépidoptères			
	Carabes	Semences riches en lipides en surface du sol de printemps à automne	\$	
	Oiseaux	Semences en surface du sol en hiver		
Environnement physique				
Réduction d'impact environnemental	Lixiviation d'azote	Surface foliaire et biomasse des adventices nitrophiles en interculture	\$	
	Érosion	Taux de couverture par les adventices		
	Transfert de pesticides	Surface foliaire, taux de couverture, biomasse des adventices pendant et après l'application de pesticides	#	

§ (Mézière et al., 2015), \$ (Moreau *et al.*, 2013), & (Colbach et al., 2017a), # (Queyrel and Colbach, 2016), ♦ (Ricou et al., 2014) ⁺ Pourcentage de conseillers et agriculteurs trouvant cet indicateur utile ou très utile (basé sur Colas et al., 2015).

3. Évaluer et concevoir des systèmes

3.1 Diagnostic

Plusieurs études de simulation ont été conduites pour évaluer la performance multicritère d'une large gamme de systèmes de culture, avec des focus sur des questions particulières (Tableau 4).

Tableau 4 : Synthèse, conclusions opérationnelles (en vert) et domaines de validité des conclusions (en rouge) des études d'évaluation de systèmes de culture réalisées avec FLORSYS

Interaction adventices - bioagresseurs	
§	Rotations d'hiver (Bourgogne, Nord). Pathogène similaire à l'agent du piétin-échaudage (dispersion limitée à quelques cm, survie hors hôte 1-2 ans, impactant la reproduction adventice mais pas la levée)
	La gestion intégrée des adventices n'augmente pas le risque de bioagresseur et peut même le diminuer
	Pas de régulation de la flore adventice
♦	Systèmes divers allant du bio à l'intensif, du semis direct au labour systématique (7 régions)
	Les adventices réduisent peu le risque parasite et contribuent surtout à son augmentation
	Toute pratique réduisant le risque adventice réduit le risque parasite
	Les adventices levant au début de l'été augmentant le plus le risque parasite
Résistance aux herbicides	
§	Colza/blé/orge (Bourgogne)
	Apparition de la résistance 18 et 6 ans (en moyenne, probabilité de 40%) après remplacement de 1 et 4 herbicides par des inhibiteurs des ACCases dans la rotation, respectivement
	Les doses réduites avancent la résistance de 1-3 ans dans 50% des cas
	Introduire du pois de printemps ou du labour annuel retarde la résistance indéfiniment dans 90% et 60% des cas
&	Monoculture de maïs (Aquitaine, Catalogne)
	L'application de glyphosate entraîne la résistance uniquement si d'autres facteurs cultureux favorisent les adventices (ex. semis direct)
	Le glyphosate en interculture augmente plus le risque de résistance que le glyphosate en culture
	Le glyphosate sélectionne plus pour des traits d'espèces permettant d'éviter l'exposition à l'herbicide (e.g. croissance initiale retardée, petite surface foliaire) ou de compenser les coûts de la résistance (production semencière réduite) que pour la résistance à l'herbicide
	Résistance plus fréquente dans des espèces qui n'évitent pas l'herbicide et dans les espèces peu compétitives
	En cas de contrôle efficace de la flore, la résistance prolifère plus dans les espèces allogames
Partager ("landsharing") ou séparer les terres ("landsparing")	
#	Systèmes destinés à optimiser la production agricole (monoculture de maïs avec glyphosate et travail du sol superficiel), la biodiversité (monoculture de maïs avec glyphosate, semis direct et précoce), ou concilier les deux (soja/maïs/blé/maïs, travail superficiel, glyphosate en maïs et herbicides conventionnels ailleurs), micro-région de 12 ha (Aquitaine)
	Cultiver 75% de la région en maximisant la production et 25% en maximisant la biodiversité est le plus efficace
	Introduire 10% de bandes enherbées dans des systèmes maximisant la production est aussi efficace
	Production et biodiversité sont généralement plus faibles si toutes les parcelles sont gérées pour concilier les deux objectifs, quel que soit l'assolement annuel.
Concilier production agricole, biodiversité et réduction d'usage herbicides	
*	Systèmes divers allant du bio à l'intensif, du semis direct au labour systématique (7 régions)
	Aucun système ne permet de concilier les 3 objectifs mais certains en concilient deux.
	Les meilleurs systèmes ont moins de 60% cultures pluriannuelles, labourent au moins 2 années sur 5, travaillent le sol pendant les 6 premiers mois après récolte, appliquent des herbicides foliaires au moins 2 ans sur 3, ne traitent pas pendant les 6 derniers mois de la culture.

§ (Mézière *et al.*, 2013), § (Colbach *et al.*, 2016b), & (Colbach *et al.*, 2017d; Colbach *et al.*, 2017e), # (Colbach *et al.*, 2017c),

♦ (Colbach *et al.*, 2017a), * (Colbach *et al.*, 2017b)

Dans tous les cas, les systèmes de culture existants et prospectifs (provenant d'enquêtes, statistiques agricoles, conseillers) ont été simulés sur 25 à 30 ans pour évaluer les effets à long-terme des pratiques et des adventices, et répétées avec 10 séries climatiques aléatoires. Les analyses statistiques avaient comme objectifs :

- (1) de comparer les systèmes de culture en terme de performance multicritère,
- (2) d'identifier les descripteurs des pratiques expliquant ces performances (voir exemples Figure 1),
- (3) d'identifier les traits des adventices sélectionnés par ces pratiques (ex. le glyphosate sélectionne des espèces à faible taux de croissance initial, Colbach et al., 2017e),
- (4) d'identifier les traits des adventices expliquant l'impact des adventices sur la performance (ex. les adventices à fort SLA causent plus de perte de rendement, Colbach et al., 2017d)¹.

Ces études de diagnostic ont conduit à la construction de grilles de conseil (Tableau 5).

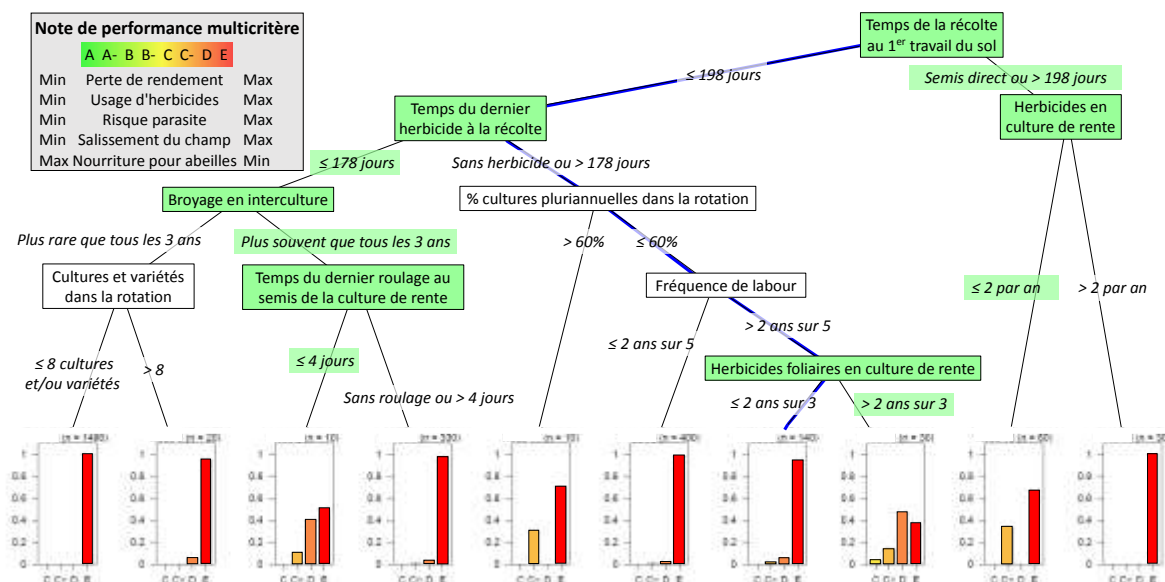


Figure 1 : Arbre de décision prédisant l'impact multicritère des adventices sur la production agricole et la biodiversité en fonction de combinaisons de pratiques culturales. Les branches représentent des combinaisons de pratiques culturales contrastées ; les histogrammes montrent les probabilités des niveaux de performance correspondante. Pour évaluer un système de culture existant, la combinaison de pratiques sous-jacente est identifiée (ex du chemin en bleu) ; pour identifier des changements potentiellement intéressants pour améliorer la performance du système, il faut identifier les nœuds (ex. cases vertes) qui réorientent le chemin vers des histogrammes montrant des meilleures performances (notes C et C- plutôt que D ou E) (Nathalie Colbach © 2017)

¹ Specific leaf area (SLA) est le ratio entre la surface des feuilles et leur masse.

Tableau 5 : Extrait d'une grille de conseils sur le travail du sol pour gérer le risque d'orobanche dû aux adventices (tiré de Colbach et al., 2017a)

Caractéristiques du travail du sol	Conseil	Particulièrement quand	Effet des adventices sur les composantes du risque parasite – Réduction de :			Cause (effet des techniques sur les adventices)
			Stock semencier	Germination en culture hôte	Reproduction	
Nombre d'opérations superficielles	Autant que possible			X		Réduit le stock semencier au semis de la culture par germination fatale en interculture
Profondeur	Aussi profond que possible, > 8 cm	Peu de cultures pluriannuelles, peu d'herbicides à multiples voies d'entrée [§] , préparation tardive du lit de semences, roulage précoce		X	X	Plus de germination fatale en interculture, enfouissement plus profond des semences et donc moins de levée en culture
Déchaumage	Retarder (au moins jusque 36 jours après la récolte du précédent)	Préparation précoce du lit de semences	X			Semences imbibées avant enfouissement et donc plus sensibles (moins dormantes) aux stimulations du travail du sol, ce qui augmente les germinations et levées en interculture
Préparation du lit de semences	Au semis	Herbicides à multiples voies d'entrée et traitement précoce		X	X	Assure un champ propre pour la culture en détruisant les adventices levées et en ne laissant pas de temps aux adventices de lever avant la culture
Roulage	Oui		X		X	Améliore le contact avec le sol, l'imbibition et la germination fatale des semences de surface en interculture
Date du roulage	Précoce (au moins 3 mois avant le semis)	Peu de cultures pluriannuelles, peu d'herbicides à multiples voies d'entrée, préparation tardive du lit de semences		X	X	Plus de temps pour la germination fatale des semences de surface en interculture
Labour avant cultures de printemps	Seulement si au moins 7.5 mois avant semis		X		X	Plus de temps pour la germination fatale des semences déterrées et enfouissement d'autres semences pour empêcher leur levée
Labour avant cultures d'hiver	Aucun			X	X	Évite la levée de semences déterrées dans des cultures hôtes

[§] Ces herbicides pénètrent dans les adventices par au moins deux voies d'entrée (racines, feuilles, méristème pendant la levée).

3.2 Conception de stratégies multiperformantes

Nous avons développé une méthode pour concevoir des systèmes de culture multiperformants : (1) l'agrégation des notes de performance individuelle en une note de multiperformance, (2) des arbres de décision prédisant les probabilités d'atteindre les objectifs escomptés à partir de combinaisons de pratiques culturales sont établis à partir de simulations avec le modèle FLORSYS (Figure 1), (3) le système de culture à améliorer est évalué à l'aide de l'arbre, et des changements permettant d'améliorer les performances sont identifiés (Figure 1), (4) les systèmes de culture alternatifs incluant ces changements sont testés avec FLORSYS (Tableau 6).

Tableau 6 : Illustration de l'impact de modifications d'un système de culture existant sur sa performance multicritère. Chaque ligne correspond à un système de culture : un système de culture existant en colza/blé/orge et travail du sol superficiel (R) et des systèmes innovants (I et O) obtenus en modifiant le système R afin de concilier contrôle de la nuisibilité des adventices (perte de rendement, salissement du champ), promotion de la biodiversité (offre trophique aux pollinisateurs) et réduction d'usage herbicide. Pour chaque système de culture étudié, les chiffres indiquent la probabilité d'atteindre les différentes notes de performance multicritère. Le système O est le plus intéressant car il combine le plus faible risque (40% de note E) avec la meilleure performance possible (10% de note C)

	Changement identifié sur l'arbre (Figure 1)	Modifications faites dans les systèmes innovants			Note de performance multicritère § (%)							
					A (meilleure)	A-	B	B-	C	C-	D	E (pire)
R		Aucune			0	0	0	0	0	0	30	70
I1	Herbicides foliaires au moins 2 ans sur 3	Remplacé 1 herbicide	pseudo-racinaire	en orge par un foliaire	0	0	0	0	10	0	20	70
I1'			pseudo-racinaire/racinaire		0	0	0	0	0	30	40	30
I2	Broyage au moins 1 an sur 3	Broyage avant céréales			0	0	0	0	0	0	20	80
	Rouleau avant semis	Rouleau au semis										
I3	Semis direct ou 1 ^{er} travail après 198 jours	Ajouté tournesol (+blé) pour retarder le travail du sol			0	0	0	0	0	10	0	90
O	Combiner les meilleures options	I1' et I2			0	0	0	0	10	20	30	40

§ Une note multicritère X correspond à une note individuelle x pour la perte de rendement, et $\geq$ pour les autres indicateurs. Les notes individuelles varient de a (< 5% de la valeur maximale possible) à e (> 30%) pour la nuisibilité, de a (> 75% de la valeur maximum) à e (< 50%) pour la biodiversité.

La méthode permet d'améliorer des systèmes de culture existants pas à pas. Par rapport à la conception à dire d'experts, elle permet de proposer non seulement des grands classiques (ex. labourer) mais aussi des modifications peu connues (ex. broyage) ou basées sur des interactions (ex. broyage et rouleau avant semis), et de quantifier les options (ex. labourer 2 ans sur 5) et leurs probabilités de réussite et d'échec. Pour aller plus loin, il sera nécessaire de diversifier davantage les systèmes de culture servant à la construction de l'arbre de décision et de prendre en compte davantage de systèmes innovants pour obtenir un arbre permettant de concilier des performances élevées des objectifs antagonistes.

3.3 Utilisation de FLORSYS en atelier avec les agriculteurs

Nous avons commencé à mettre en place des ateliers d'interaction avec les agriculteurs, basés sur l'utilisation de FLORSYS pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture permettant de concilier contrôle de la nuisibilité et promotion des bénéfices de la flore adventice. FLORSYS y est utilisé pour évaluer des systèmes proposés par les participants, et les arbres de décision (Figure 1) pourront guider l'élaboration de ces propositions.

La détection des freins techniques ou socio-économiques et leur intégration dans le processus de conception sont indispensables pour faciliter le transfert des innovations vers la profession. Les premiers ateliers ont montré, entre autres, que les agriculteurs sont souvent prêts à aller plus loin dans les changements de pratiques que les conseillers (ex. tester des techniques et combinaisons de techniques non chimiques plutôt que des alternatives chimiques) et qu'ils ont une bonne maîtrise des points clés du cycle de vie des adventices mis en évidence récemment par la recherche (ex. évaluer les stratégies sur la biomasse des adventices plutôt que sur le stock semencier du sol).

Conclusion

Sur le plan opérationnel, ce travail a produit (1) un outil d'évaluation des effets des systèmes de culture sur la flore adventice et les composantes biotiques associées (FLORSYS amélioré), (2) une méthodologie d'évaluation et de conception de systèmes de culture à l'aide de simulations, (3) des propositions de systèmes de culture conciliant production agricole, biodiversité et faible usage d'herbicides.

L'intégration de nouveaux processus (interactions entre adventices et autres bioagresseurs, résistance aux herbicides, dispersion de semences) et des indicateurs d'impact de la flore adventice dans le modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS nous permet de mieux évaluer la performance multicritère des stratégies de gestion des adventices. Les méthodologies de simulation développées permettent d'évaluer cette performance sur le long-terme et face aux aléas climatiques. Nous avons ainsi pu construire des règles et des grilles de conseils pour améliorer la gestion des adventices en fonction de ces objectifs. Lorsque les objectifs à concilier sont peu nombreux ou peu antagonistes, un grand nombre de solutions permet d'atteindre des bonnes performances, avec un faible risque d'échec. Cependant, lorsque les objectifs à concilier sont nombreux et antagonistes, aucune solution n'a été trouvée pour atteindre des performances optimales bien que de nombreuses alternatives permettant des améliorations partielles aient été identifiées.

Par conséquent, le travail présenté ici continue actuellement dans le cadre de l'ANR CoSAC (www.projet-cosac.fr), notamment pour intégrer des techniques culturales innovantes (ex. cultures de couverture, traitements herbicides localisés, semis direct) et développer des outils d'aide à décision à partir de FLORSYS. Cette poursuite du travail se fera avec une participation des conseillers agricoles et des agriculteurs dans le développement des outils et méthodes d'évaluation et de conception de systèmes de culture, puis dans la conception elle-même.

Remerciements

Ce travail a été financé par l'INRA et le programme de recherche Pesticides par l'intermédiaire de l'APR « Évaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des Pesticides » piloté par le ministère chargé de du développement durable, avec l'appui financier de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto I, avec des contributions des projets AMIGA (FP7-KBBE-2011-5-CP-CSA) et CoSAC (ANR-14-CE18-0007).

Références bibliographiques

- Bouvier A., Adamczyk K., Kiêu K., Monod H., 2009. Computation of integrated flow of particles between polygons. *Environmental Modelling and Software* 24, 843–849.
- Colas F., Cordeau S., Jeuffroy M.-H., Villerd J., Colbach N., 2015. Which decision-support system for sustainable weed management: needs and constraints of crop advisors, 17th European Weed Research Society Symposium: "Weed management in changing environments", Montpellier, France.
- 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., 2016a. 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., Biju-Duval L., Gardarin A., Granger S., Guyot S.H.M., Mézière D., Munier-Jolain N.M., Petit S., 2014. The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. *Weed Res.* 54, 541–555.
- Colbach N., Bockstaller C., Colas F., Gibot-Leclerc S., Moreau D., Pointurier O., Villerd J., 2017a. Assessing broomrape risk due to weeds in cropping systems with an indicator based on a simulation model. *Ecological Indicators*, dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.1005.1070.
- Colbach N., Chauvel B., Darmency H., Délye C., Le Corre V., 2016b. Choosing the best cropping systems to target pleiotropic effects when managing single-gene herbicide resistance in grass weeds. A blackgrass simulation study. *Pest Management Science* 72, 1910–1925.
- Colbach N., Colas F., Pointurier O., Queyrel, W., Villerd J., 2017b. A methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. *Eur. J. Agron.* 87, 59–73.
- Colbach N., Cordeau S., Garrido A., Granger S., Laughlin D., Ricci B., Thomson F., Messéan A., 2017c. Landsharing vs landsparing: how to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. *Agric. Ecosyst. Environ.*, accepted with modifications.
- Colbach N., Darmency H., Fernier A., Granger S., Le Corre V., Messéan A., 2017d. 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., Fernier A., Le Corre V., Messéan A., Darmency H., 2017e. Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. I. Effects on weeds. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 11582–11600.
- Gardarin A., Dürr C., Mannino M.R., Busset H., Colbach N., 2010. Seed mortality in the soil is related to the seed coat thickness. *Seed Science Research* 20, 243–256.
- Gibot-Leclerc S., Dessaint F., Le Corre V., Reibel C., Colbach N., 2013. L'orobanche rameuse : Une plante parasite dont la variabilité s'avère complexe. *Phytoma* 669, 44–47.
- Gibot-Leclerc S., Lemaire C., Reibe I.C., Evaluation of the oilseed rape-legumes intercropping relevance in *Phelipanche ramosa* management. *Pest Management Science*, en cours de soumission.
- Grenz J.H., Manschadi A.M., De Voil P., Meinke H., Sauerborn J., 2005. Assessing strategies for *Orobanche* sp. control using a combined seedbank and competition model. *Agronomy Journal* 97, 1551–1559.
- Gutteridge R.J., Jenkyn J.F., Bateman G.L., 2006. Effects of different cultivated or weed grasses, grown as pure stands or in combination with wheat, on take-all and its suppression in subsequent wheat crops. *Plant Pathology* 55, 696–704.
- Le Corre V., Reibel C., Gibot-Leclerc S., 2014. Development of microsatellite markers in the branched broomrape *Phelipanche ramosa* L. (Pomel) and evidence for host-associated genetic divergence. *Journal of Molecular Sciences* 15, 994–1002.
- Liebman M., Gallandt E.R., 1997. 9 - Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions, in: Jackson, L.E. (Ed.), *Ecology in Agriculture*. Academic Press, pp. 291–343.
- 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.

- Menalled F.D., Marino P.C., Renner K.A., Landis D.A., 2000. Post-dispersal weed seed predation in Michigan crop fields as a function of agricultural landscape structure. *Agric. Ecosyst. Environ.* 77, 193-202.
- Meyer B., 2014. Développement d'un indicateur de valeur de la flore adventice pour les lépidoptères. Université Haute-Alsace, Colmar, France, p. 81.
- Mézière D., Lucas P., Granger S., Colbach N., 2013. Does integrated weed management affect the risk of crop diseases? A simulation case study with a grass weed and a soil-borne cereal disease. *Eur. J. Agron.* 47, 33-43.
- 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., Abiven F., Busset H., Matejcek A., Pagès L., 2017. Effects of species and soil-nitrogen availability on root system architecture traits. Study on a set of weed and crop species. *Annals of Applied Biology* 171, 103–116.
- Moreau D., Gibot-Leclerc S., Girardin A., Pointurier O., Reibel C., Strbik F., Fernández-Aparicio M., Colbach N., 2016. Trophic relationships between the parasitic plant species *Phelipanche ramosa* (L.) and different hosts depending on host phenological stage and host growth rate. *Frontiers in Plant Science* 7, 1033.
- Moreau D., Milard G., Munier-Jolain N., 2013. A plant nitrophily index based on plant leaf area response to soil nitrogen availability. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 809-815.
- Oerke E., 2006. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* 144, 31-43
- Pointurier O., Gibot-Leclerc S., Moreau D., Colbach N., 2016. Modelling cropping system effects on branched broomrape dynamics in interaction with weeds, in: AFPP (Ed.), AFPP – 23e conférence du Columa. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France, pp. 58-67.
- Queyrel W., Colbach N., 2016. Pesticide retention by weeds. Development of new indicators for cropping system evaluation, 14th ESA Congress, Edinburgh, Scotland, pp. 27-28.
- Ricou C., Schneller C., Amiaud B., Plantureux S., Bockstaller C., 2014. A vegetation-based indicator to assess the pollination value of field margin flora. *Ecological Indicators* 45, 320-331.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)