



HAL
open science

Analyse et modélisation des effets des pratiques agricoles sur les services et disservices écosystémiques dépendant des adventices. Application à l'évaluation et la conception de systèmes de culture économes en herbicides

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

► To cite this version:

Nathalie Colbach, Floriane Colas, Stéphanie Gibot-Leclerc, Sylvie Granger, Sébastien Guyot, et al.. Analyse et modélisation des effets des pratiques agricoles sur les services et disservices écosystémiques dépendant des adventices. Application à l'évaluation et la conception de systèmes de culture économes en herbicides. [Rapport de recherche] Agrosup Dijon, Institut National Supérieur des Sciences Agronomiques, de l'Alimentation et de l'Environnement; Inra; Université Bourgogne Franche-Comté. 2016, pp.37. hal-01921134

HAL Id: hal-01921134

<https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-01921134v1>

Submitted on 13 Nov 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.

Rapport scientifique



Agroécologie
Dijon
Unité de Recherche



INRA
SCIENCE & IMPACT



AGRO
SUP
Institut national supérieur des sciences agronomiques de l'alimentation et de l'environnement

Analyse et modélisation des effets des pratiques agricoles sur les services et disservices écosystémiques dépendant des adventices. Application à l'évaluation et la conception de systèmes de culture économes en herbicides

Programme Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des Pesticides
APR 2011 « Changer les pratiques agricoles pour préserver les services écosystémiques »
Rapport final- août 2016

Nathalie Colbach

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

Floriane Colas, Stéphanie Gibot-Leclerc, Sylvie Granger, Sébastien Guyot, Delphine Mézière, Delphine Moreau, Olivia Pointurier, Wilfried Queyrel, Anne-Sophie Voisin
Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

Christian Bockstaller, Jean Villerd
INRA, UMR LAE, Nancy-Colmar

Table des matières

1	<i>Introduction</i>	3
1	<i>Étude expérimentale des interactions adventices-parasite</i>	3
1.1	Quelques mots sur le parasite orobanche	3
1.2	Viabilité et potentiel infectieux des semences orobanche	4
1.3	La fixation de l'orobanche dans les mélanges plurispécifiques	4
1.4	Étude de l'architecture racinaire des plantes hôtes	5
1.4.1	Étude d'une large gamme de cultures et adventices	5
1.4.2	Cas particulier des légumineuses	6
1.5	Les relations trophiques hôte-parasite	8
2	<i>Modélisation de processus biophysiques</i>	9
2.1	L'interaction entre adventices et un champignon pathogène	9
2.2	L'interaction entre adventices et un parasite	10
2.3	Modéliser la résistance aux herbicides	12
2.4	Des indicateurs de nuisibilité et bénéfiques de la flore adventice	13
2.4.1	Développement de la méthode et des premiers indicateurs	13
2.4.2	De nouveaux indicateurs de ressources trophiques	14
2.4.3	Réduction du lessivage de nitrates	16
2.4.4	Limitation de l'érosion	16
2.4.5	Des indicateurs de risque d'orobanche	16
2.4.6	Indicateur du potentiel de réduction du transfert de pesticides	17
2.4.7	Confrontation des indicateurs aux utilisateurs	17
2.5	Une versions spatialement explicite de FlorSys	18
2.6	Évaluation de la version "champ" de FLORSYS	19
3	<i>Diagnostic et conception de systèmes de culture</i>	21
3.1	Quelques constats préliminaires	21
3.2	La prise en compte des règles de décision des agriculteurs	21
3.3	Diagnostic de systèmes de culture existants	23
3.3.1	Quelles pratiques des agriculteurs permettent de concilier production agricole, biodiversité et faible usage d'herbicides?	23
3.3.2	Quel est le risque d'orobanche dû aux adventices?	26
3.3.3	Évaluation des pratiques culturales permettant de valoriser le potentiel de rétention des pesticides par la flore adventice à l'échelle du système de culture	26
3.4	Méthodologie de conception de systèmes de culture	27
3.4.1	Introduction	27
3.4.2	conception de systèmes de culture à partir de diagnostic de systèmes existants	28
3.4.3	Utilisation de FlorSys en atelier avec les agriculteurs	30
3.4.4	Comment continuer?	30
4	<i>Conclusion et perspectives</i>	30
5	<i>Références</i>	31
6	<i>Annexe : textes des publications</i>	35
6.1.1	Publications scientifiques parues ou sous presse	35
6.1.2	Publications soumises ou en cours de soumission	36
6.1.3	Publications scientifiques prévues	36
6.1.4	Colloques	36
6.1.5	Rapports de stage	37

1 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 (e.g., Oerke *et al.*, 1994; Swinton *et al.*, 1994). Elles peuvent aussi servir de réservoir à d'autres bioagresseurs {ex. du piétin-échaudage des céréales, \Gutteridge, 2006 #8465; ex. la plante parasite orobanche rameuse, \Gibot-Leclerc, 2003 #16059;, 2006 #16057;, 2009 #16060}. Dans les paysages agricoles, les adventices sont également 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, Wilson *et al.*, 1999; Marshall *et al.*, 2003; Carvalheiro *et al.*, 2011; Evans *et al.*, 2011; Petit *et al.*, 2011). 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. Les stratégies de gestion des adventices économes en herbicides doivent systématiquement combiner l'ensemble des composantes du système de culture pour aboutir à une gestion intégrée mettant à profit tous les effets préventifs possibles et souvent appelée "many little hammers" (Liebman & Gallandt, 1997) et tenter de concilier plusieurs objectifs souvent antagonistes en termes de gestion de la flore adventice. L'étude et la gestion des adventices est compliquée par la survie pluri-annuelle de leurs semences dans le sol (Thompson *et al.*, 2003; Gardarin *et al.*, 2010) et la dispersion de ces semences dans les paysages (Menalled *et al.*, 2000).

L'objectif de notre projet 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 (FLORSYS¹), (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**. Le projet comprendra notamment des travaux sur les interactions entre adventices et deux bioagresseurs associés (l'orobanche, une plante parasite de nombreuses cultures et adventices; le champignon responsable du piétin-échaudage des céréales, un champignon pathogène infestant également les adventices graminées), le développement d'indicateurs de biodiversité liée à la flore adventice (ex. pollinisateurs, espèces granivores). Le travail produira (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 répondant aux objectifs.

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 des connaissances 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 QUELQUES MOTS SUR LE PARASITE OROBANCHE

Les semences 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. Les plantes généralement produisent des exsudats stimulateurs jusqu'à la floraison. Une fois germé, le parasite qui est holoparasite (donc incapable de faire de la photosynthèse) doit se fixer sur des racines susceptibles proches afin de lever, se reproduire et réalimenter le stock semencier du sol. Les plantes cultivées et adventices peuvent (1) stimuler des germinations parasite et permettre la fixation et reproduction du

¹ FLORSYS (Colbach *et al.*, 2014a) est un modèle de recherche simulant un champ virtuel à un pas de temps journalier sur plusieurs années, permettant d'évaluer les performances de systèmes agricoles en terme de contrôle de la flore adventice, maintien de la production agricole et préservation de la biodiversité fonctionnelle, et ce dans une large gamme de situations agricoles et pédoclimatiques.

parasite (espèces hôtes), (2) uniquement stimuler des germinations (faux hôtes), ou (3) ni stimuler ni permettre des fixations (non-hôtes).

1.2 VIABILITÉ ET POTENTIEL INFECTIEUX DES SEMENCES OROBANCHE

Contexte. En l'absence de plante hôte, le parasite orobanche survit sous forme de semences dans le sol pendant plusieurs années. Ces semences germent uniquement en cas de stimulation par des exsudats racinaires de plantes hôtes potentiels.

Objectif. L'objectif est de déterminer (1) la longévité des semences orobanche dans le sol et (2) leur potentiel infectieux au cours des saisons, et ce pour différents pathovars du parasite. Ces connaissances permettront d'évaluer le risque d'infection lié à la fréquence des cultures hôtes dans la rotation et la possibilité de moduler ce risque en jouant sur les périodes de semis. Elles serviront aussi à paramétrer les fonctions relatives au taux de survie et de pouvoir germinatif des semences d'orobanche rameuse dans le futur modèle de dynamique orobanche, PHERASYS.

Méthodes. Des semences d'orobanche ont été récoltées sur colza d'hiver et sur chanvre en juin 2014, puis enfouies au champ dans des sacs de toile mélangeant semences et terre, pour une durée de 2 ans. Toutes les 6 semaines, des sacs sont déterrés, et des tests de viabilité et de germination sont effectués.

Résultats préliminaires (Pointurier, 2015)². En raison de problèmes expérimentaux dus aux aléas climatiques, cette expérimentation ne se terminera qu'en octobre 2016. Les résultats à ce jour montrent une décroissance très lente de la viabilité, indépendamment du pathovar (Figure 1.A). Le pathovar O-colza montre une saisonnalité très marquée, avec une dormance très forte au cours de l'hiver (Figure 1.B) tandis que O-chanvre n'a pas montré de dormance (résultats non montrés).

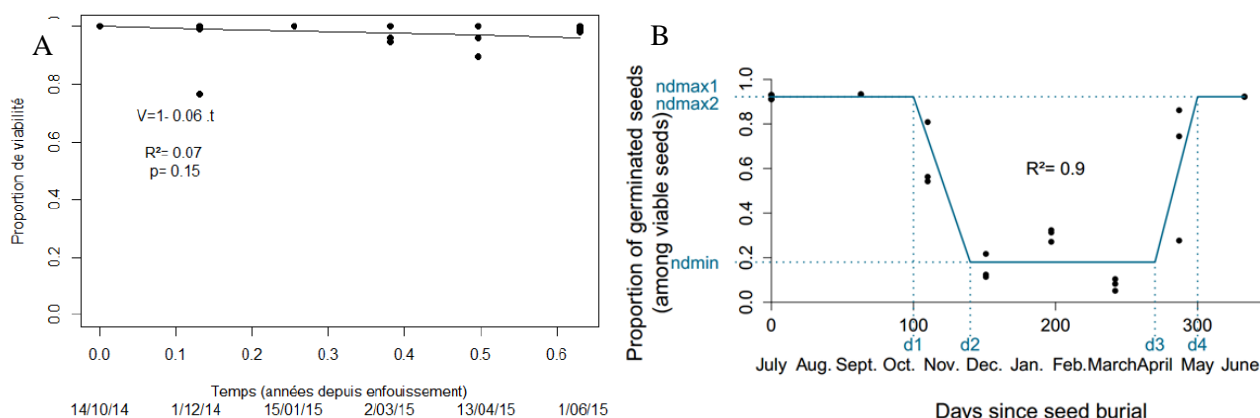


Figure 1. Survie (A, pathovar O-chanvre) et germinabilité (B, pathovar O-colza) des semences orobanche au cours du temps mesurées sur des semences enfouies à 30 cm au champ puis déterrées et testées au laboratoire, à partir de 2014 (tiré de Pointurier, 2015).

Perspectives. Les résultats 2015-2016 sont en cours d'analyse et ne pourront être terminés qu'en automne. Ce retard a compromis l'aboutissement du modèle PHERASYS dans le cadre de notre projet. Afin de permettre une évaluation du risque d'orobanche lié à la flore adventice, nous avons développé des indicateurs de risque (section 2.4.5).

1.3 LA FIXATION DE L'OROBANCHE DANS LES MÉLANGES PLURISPÉCIFIQUES

Contexte & objectif. Nous avons récemment mis en évidence que la présence de certaines plantes indemne de parasite orobanche pouvait augmenter l'infection de plantes hôtes voisines (Gibot-Leclerc *et al.*, 2013). Ce nouveau processus d'interaction hôte-parasite a été appelé facilitation et pourrait encore augmenter le rôle que jouent les adventices dans la propagation du parasite. Il devra aussi pris en compte pour la gestion de couverts plurispécifiques. L'objectif est d'identifier des nouvelles espèces facilitatrices.

² Les références en bleu sont issues de ce projet.

Méthodes. Afin de simuler des couverts plurispécifiques au champ, nous avons effectué des co-cultures hôte/parasite en chambres climatisées, associant le colza qui est l'hôte principal de l'orobanche à d'autres plantes. Les espèces compagnes testées comprenaient deux espèces de Légumineuses (*Medicago sativa* et *Vicia cracca*) et une espèce de Graminée.

Résultats. Les résultats préliminaires montrent que les légumineuses, *M. sativa* et *V. cracca*, augmentent la fixation de l'orobanche sur le colza voisin alors qu'elles-mêmes sont légèrement moins infectées (Figure 2). Les résultats avec les graminées sont encore en cours d'analyse.

Perspectives. Ces résultats devront être vérifiés avec d'autres pathovars. Ils contribueront à déterminer des conseils sur les espèces cultivées à associer dans les parcelles à fort potentiel d'orobanche. À terme, ils serviront à paramétrer le modèle PHERASYS.

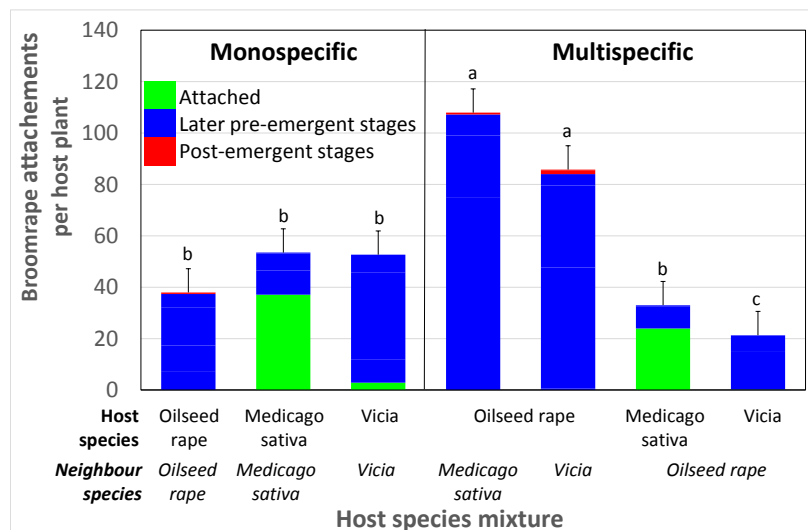


Figure 2. Effet des espèces hôtes et des espèces voisines sur les fixations d'orobanche sur les racines hôtes.

1.4 ÉTUDE DE L'ARCHITECTURE RACINAIRE DES PLANTES HÔTES

1.4.1 ÉTUDE D'UNE LARGE GAMME DE CULTURES ET ADVENTICES

Contexte. La germination des semences du parasite orobanche rameuse et leur fixation sur des racines hôtes sont stimulées par les exsudats émis par des racines de plantes hôtes potentielles très proches (< 0.5 cm). L'étude et la modélisation des interactions entre plante hôte et plante parasite nécessite donc au préalable l'étude et la modélisation de l'architecture racinaire des plantes hôtes.

Objectif. Il s'agit d'analyser et de modéliser l'architecture racinaire d'une gamme d'espèces adventices et cultivées. La finalité est double : (i) mener une démarche d'écologie comparative par l'identification des traits d'architecture racinaire qui différencient les espèces et (ii) développer un module d'architecture racinaire qui pourra être intégré au modèle FLORSYS.

Matériel et méthodes. Notre démarche a consisté à paramétrer un modèle d'architecture racinaire préexistant, ArchiSimple (Pagès et al., 2014). Ce modèle a été choisi compte tenu de son caractère générique, i.e. adaptable à n'importe quelle espèce annuelle, et de son petit nombre de paramètres qui ont un sens biologique. Pour le paramétrage, deux expérimentations (2012 et 2013) ont été menées en serre sur neuf espèces adventices et trois espèces cultivées individuellement en pots et dans deux conditions très contrastées de disponibilité en azote dans le sol. Pour chaque expérimentation, des prélèvements destructifs des plantes couplés à des scans racinaires et de l'analyse d'images ont été effectués pour caractériser trois processus liés à l'architecture racinaire : l'émission des racines primaires chez les graminées, l'élongation et la ramification.

Résultats (Abiven, 2013; Moreau et al., submitted). Les différents paramètres ont pu être calculés pour chacune des 12 espèces, confirmant le caractère générique du modèle ArchiSimple. Les valeurs des paramètres racinaires étaient très différentes selon les espèces (les différences entre espèces ont varié d'un facteur 2 à 4 selon les paramètres), démontrant l'intérêt de ce modèle comme cadre

d'analyse de la variabilité interspécifique de l'architecture racinaire. Les différences les plus importantes ont été observées pour le diamètre apical maximum (Figure 3) et la distance inter-ramification. Cette analyse a permis de caractériser les espèces et de faire des hypothèses sur leur aptitude à la compétition pour les différentes ressources du sol. Contrairement aux différences entre espèces qui ont été très marquées, les différences de valeurs de paramètres entre les deux traitements azotés ont été bien moindres alors même que les concentrations en azote du sol étaient très contrastées (Figure 3). Ce résultat suggère que les paramètres du modèle, de la manière dont ils ont été définis, permettent de s'affranchir de l'effet de l'azote. Il suggère aussi que les règles qui gouvernent l'architecture racinaire, reflétées par les paramètres du modèle, sont peu affectées par le statut azoté de la plante et la disponibilité en azote du sol. Ainsi, les déterminants des fortes différences de développement et de croissance racinaire entre conditions de disponibilité en azote du sol pour une même espèce à un temps t ne semblent pas provenir de changement dans les règles qui régissent l'émission, l'élongation et la ramification racinaire. Elles semblent plutôt provenir de différences dans la quantité de carbone allouée au système racinaire.

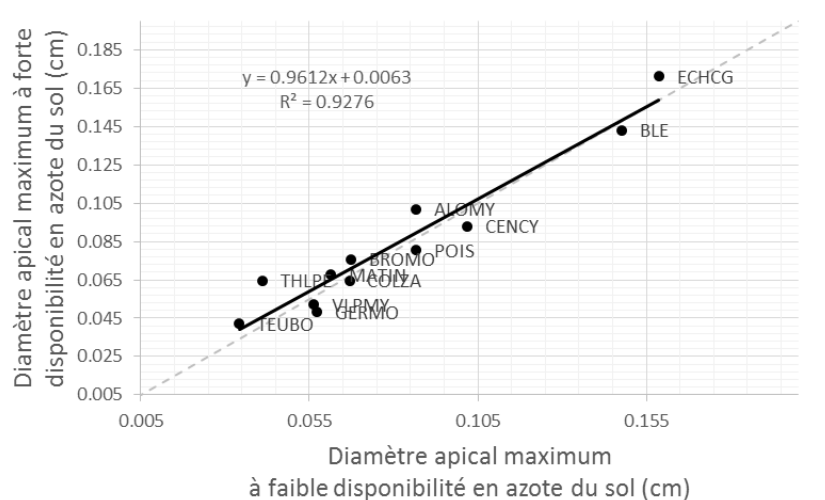


Figure 3 : Relations entre les valeurs maximales de diamètre apical à faible et forte disponibilité en azote du sol. Chaque point correspond à une espèce végétale. La ligne en pointillés correspond à la bissectrice et la ligne en trait plein correspond à la droite de régression.

Conclusion et perspectives. Grâce à cette étude, nous disposons d'un modèle d'architecture racinaire, ArchiSimple, paramétré pour 12 espèces et des conditions contrastées de disponibilité en azote du sol. Dans la continuité, un travail est en cours pour établir un module d'architecture racinaire pour FLORSYS à partir de ce modèle ArchiSimple paramétré. La nouvelle version de FLORSYS intégrant l'architecture racinaire des plantes permettra de simuler le processus de stimulation de la germination des graines d'orobanche par les plantes et de fixation des plantules parasites sur leur hôte.

1.4.2 CAS PARTICULIER DES LÉGUMINEUSES

Contexte. Les légumineuses constituent un cas particulier dans l'étude de l'architecture racinaire. Elles sont capables de fixer l'azote atmosphérique en symbiose avec des bactéries du sol au sein d'organes spécifiques (les nodosités). Toutefois, la formation des nodosités a lieu aux dépens des racines : la fixation symbiotique est ainsi associée à un faible développement des racines,

Objectif. Analyser les traits d'espèces et rechercher la variabilité génétique associée au développement et à la croissance des racines des légumineuses. Comme les traits racinaires sont complexes et généralement peu accessibles à des mesures simples, le modèle écophysique Pea-Nod (Voisin & Pagès, 2010) basé sur le formalisme du modèle ArchiSimple (Pagès et al., 2014) a été utilisé.

Matériel et méthodes. Nous avons ainsi caractérisé l'architecture racinaire de 10 géotypes de pois contrastés, ainsi que leurs variations en fonction de la disponibilité en N du sol dans une expérience menée en serre sur différents types de substrat de culture (hydroponie, substrat inerte et rhizotron) (Cernay, 2013) ; les traits d'architecture racinaire ont été mesurés par analyse d'image sur la base des paramètres du modèle ArchiSimple (Lefèbvre, 2015). Un travail de modélisation a été réalisé : le

modèle a ainsi été validé sur un génotype de pois, en comparant l'architecture racinaire observée et simulée dans différentes conditions (Verzat, 2014).

Résultats. Le modèle Pea-Nod s'avère valide pour rendre compte de l'architecture racinaire et la nodulation du pois, et de sa réponse au statut carboné la plante, qui varie avec le niveau de rayonnement (Verzat, 2014). Sur la base des mesures expérimentales réalisées, une première analyse des 10 génotypes a été basée sur des traits simples et intégrateurs caractérisant la croissance aérienne, racinaires et nodulaire (Figure 4) (Cernay, 2013). Cette analyse montre qu'il existe une variabilité génétique importante des traits racinaires et nodulaires chez le pois.

L'analyse détaillée de l'architecture racinaire des génotypes de pois montre une variabilité intéressante des paramètres d'architecture racinaire chez le pois, ici établi sur 4 génotypes contrastés (Tableau 1).

Perspectives. Une synthèse de la caractérisation des traits racinaires des 10 génotypes de pois sera réalisée fin 2016 et ces traits seront mis en relation avec les variables de croissance et d'acquisition d'azote mesurés en parallèle. Ce travail sera publié prochainement et contribuera au module "architecture racinaire" de FLORSYS-PHERASYS.

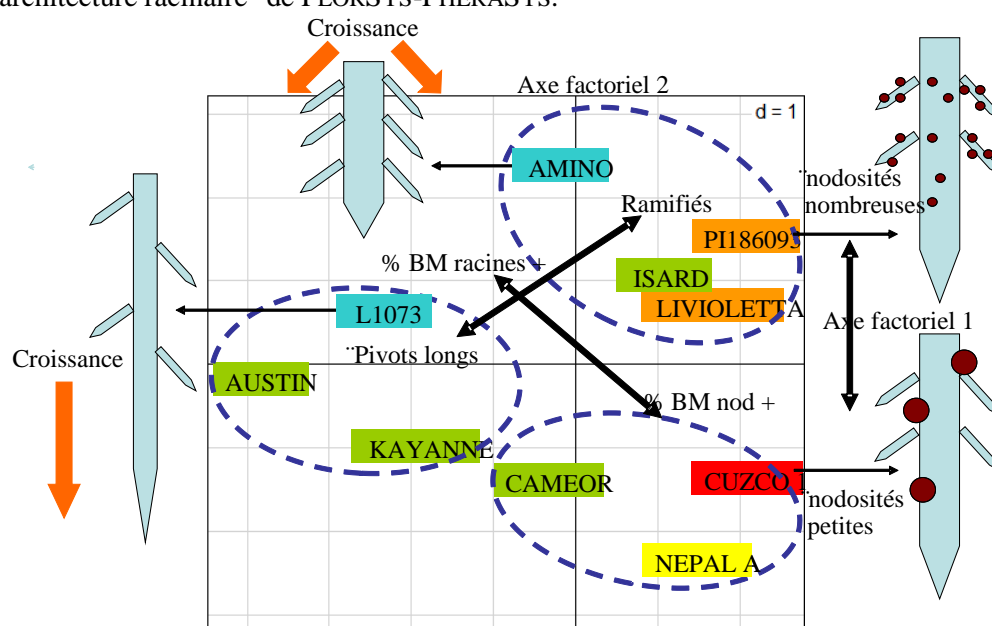


Figure 4: Positionnement relatif des 10 génotypes (étiquettes colorées) dans une ACP sur des variables caractérisant la croissance en biomasse et sa répartition dans la plante, le nombre et la vitesse d'élongation des racines et la taille et la vitesse d'apparition des nodosités (tiré de Cernay, 2013)

Tableau 1. Synthèse des paramètres décrivant les processus de ramification, d'élongation et d'accumulation de biomasse selon le modèle ArchiSimple (tiré de Lefèvre, 2015).

	Unités	Cuzco	Kayanne	Nepal	Baccara
Processus de ramification					
Densité maximale de racines latérales	racines/cm	6,5	9	5,9	5,9
Pente de la régression	-	0,34	0,55	0,34	0,6
Dmin	Cm	0,02	0,027	0,02	0,028
Dmax	Cm	0,11	0,13	0,11	0,13
coef_var	-	0,13	0,13	0,13	0,165
Processus d'élongation					
Emax	cm/°J	0,18	0,097	0,097	0,21
VitInit	cm/°J	33,96	6,75	8,26	6,59
Dseuil	Cm	0,022	0,045	0,021	0,029
Processus d'accumulation de biomasse					
Masse volumique	g/cm ³	0,049	0,049	0,049	0,084

1.5 LES RELATIONS TROPHIQUES HÔTE-PARASITE

Contexte. L'orobanche rameuse se fixe sur les racines de son hôte et, comme elle est dépourvue de chlorophylle et donc incapable de photosynthèse, elle prélève la totalité de ses besoins nutritifs au détriment de son hôte. Les relations trophiques hôte/parasite en particulier pour les assimilats carbonés sont donc cruciales dans la détermination de la croissance et de la production de semences des deux plantes en interaction. À ce jour, aucune étude n'a été réalisée sur l'orobanche rameuse pour quantifier l'intensité des relations trophiques entre hôte et parasite.

Objectifs. Il s'agit de quantifier l'intensité avec laquelle l'orobanche rameuse prélève ses assimilats sur son hôte et d'analyser si cette intensité varie en fonction (1) des stades phénologiques de l'hôte et du parasite, (2) des conditions de croissance de la plante hôte et (3) de l'espèce parasitée qui peut être plus ou moins sensible au parasitisme.

Matériel et méthodes. Nous avons conduit une expérimentation en serre dans laquelle trois espèces hôtes (colza, géranium et capselle) ont été cultivées en présence et en l'absence du parasite et dans trois conditions de rayonnement lumineux. Des prélèvements réguliers ont été réalisés pour quantifier l'évolution de la biomasse des hôtes et du parasite au cours de leur cycle de croissance.

Résultats (Girardin, 2014; Moreau *et al.*, 2016). La proportion de perte de biomasse de l'hôte due au parasitisme était différente selon l'espèce hôte. Le colza et la capselle ont présenté des similitudes dans leur réponse à l'orobanche, probablement parce qu'elles appartiennent à la même famille botanique. La sensibilité à l'orobanche pour chaque espèce hôte a pu être reliée à la précocité du développement de l'orobanche sur chacun des hôtes. Les compartiments de l'hôte ont pu être classés en fonction de leur sensibilité au parasitisme : le compartiment reproducteur a été le plus affecté, suivi des tiges et des racines. La proportion de biomasse allouée aux feuilles n'a pas été affectée par le parasitisme. La proportion de biomasse du pathosystème qui est allouée au parasite dépendait de l'espèce hôte. Elle a généralement augmenté avec la progression des stades de l'hôte mais était indépendante de la vitesse de croissance de l'hôte que nous avons modulée en modulant le rayonnement. Cela suggère fortement que l'orobanche adapte sa croissance à celle de son hôte. Le classement des espèces hôtes en termes de force de puits du parasite était différent du classement en termes de sensibilité de l'hôte au parasitisme. Enfin, pour le colza, la biomasse individuelle par tige aérienne a diminué avec l'augmentation du nombre de tiges par plante hôte, selon une relation unique indépendante de la vitesse de croissance de l'hôte (Figure 5).

Perspectives. Les résultats sont formalisés dans le modèle PHERASYS. Lorsque les résultats de l'expérimentation de viabilité et de dormance de semences (section 1.2) sera terminé, ce modèle permettra de réaliser des simulations afin d'analyser les effets de l'orobanche sur l'assemblage des communautés adventices non parasites et de concevoir des nouveaux systèmes de culture permettant un meilleur contrôle de l'orobanche rameuse.

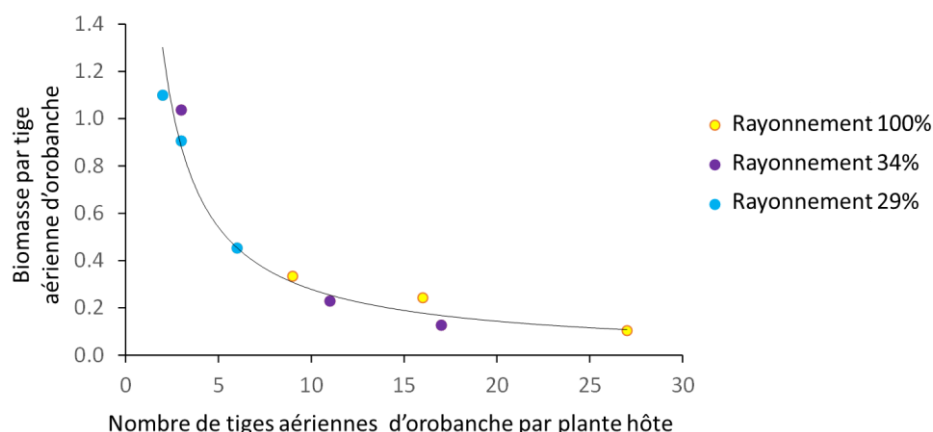


Figure 5: Relation entre la biomasse par tige aérienne d'orobanche et le nombre de tiges aériennes d'orobanche par plante hôte, dans le cas du colza et pour trois niveaux de rayonnement (basé sur Moreau *et al.*, 2016).

2 Modélisation de processus biophysiques

Les connaissances obtenues à l'aide des expérimentations (section 1) et identifiées dans la littérature sont utilisées pour améliorer le modèle de dynamique adventice FLORSYS sur plusieurs points:

- Intégration des interactions entre adventices et d'autres bioagresseurs,
- La prise en compte de la résistance aux herbicides
- Traduction des flores adventices en indicateurs de nuisibilité et de bénéfices pour la production agricole et l'environnement,
- Intégration du voisinage extra-parcellaire (champs et habitats semi-naturels) et de la dispersion des semences adventices.

Le deuxième axe de travail consiste à évaluer FLORSYS pour déterminer son domaine de validité, son erreur de prédiction et ses points faibles à améliorer dans le futur.

2.1 L'INTERACTION ENTRE ADVENTICES ET UN CHAMPIGNON PATHOGÈNE

Contexte. Les adventices peuvent être infectées par d'autres bioagresseurs des cultures, et ainsi transmettre ces bioagresseurs dans le temps (entre deux cultures hôtes séparées par une culture non-hôte) et dans l'espace (c'est-à-dire faciliter la transmission entre plantes cultivées hôtes une année donnée). La flore adventice résiduelle tolérée dans le cadre de la protection intégrée pourrait augmenter ce risque.

Objectif. L'objectif est d'évaluer (1) si les pratiques de gestion des adventices économes en herbicides influencent d'autres bioagresseurs des cultures, (2) si la flore adventice augmente le risque d'autres bioagresseurs des cultures, (3) si ces autres bioagresseurs contribuent à réguler la flore adventice. Le bioagresseur étudié est le champignon pathogène *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* responsable du piétin-échaudage, une maladie très nuisible des céréales (Schoeny *et al.*, 2001), très dépendant des pratiques culturales (Colbach *et al.*, 1997) et pouvant infecter des adventices graminées (Gutteridge *et al.*, 2006).

Matériel et méthodes. Dans un premier temps, nous avons identifié un modèle existant qui quantifie les effets des pratiques agricoles sur la maladie (Ennaïfar *et al.*, 2007). Nous y avons intégré l'effet de la présence d'adventices graminées sensibles au champignon, en ajoutant leur densité, pondérée par leur sensibilité à celles des densités de plantes cultivées (Mézière *et al.*, 2013; Colbach *et al.*, 2014a). Ce nouveau modèle appelé TAKEALLSYS a été couplé à FLORSYS, en d'intégrant aussi l'effet des adventices malades sur leur production de semences. Ensuite, nous avons simulé une trentaine de systèmes de culture contrastés dans deux pédoclimats, sur 30 ans et avec 20 répétitions climatiques.

Résultats. Les simulations montrent que les pratiques de gestion d'adventices économes en herbicides n'augmentent pas la maladie, mais peuvent la diminuer. En effet, l'addition de pois de printemps dans des rotations d'hiver (abscisses plus faibles pour les systèmes de culture O/W/B/p vs. O/W/B dans la Figure 6.A) ou certaines pratiques de gestion d'adventices (ex. retard de semis, systèmes 3 vs. 2) réduisent la maladie, même en l'absence d'adventices.

Les simulations montrent aussi que la maladie peut effectivement augmenter en présence d'adventices (la plupart des points sont au-dessus de la bissectrice de la Figure 6.A). Cependant, il s'agit généralement de systèmes avec peu de mesures non-chimiques de gestion des adventices (systèmes 0-2). Dans les systèmes intégrant de nombreuses mesures, la réduction des herbicides n'a pas d'effet (systèmes 4h- vs. 4). Enfin, les simulations montrent que la maladie ne régule que très faiblement la flore adventice (Figure 6.B), même lorsqu'on suppose une sensibilité plus forte des adventices à la maladie (cercles vs. carrés).

Conclusion. La gestion intégrée des herbicides n'augmente pas le risque de bioagresseur similaire au piétin-échaudage (dispersion limitée à quelques cm, survie hors hôte limitée à 1-2 ans, dépendant des pratiques agricoles) et peut même le diminuer. Les bioagresseur de type piétin-échaudage (impactant la reproduction mais pas la levée) ne permettent pas de réguler la flore adventice.

Perspectives. Ce travail de modélisation a abouti ensuite au développement d'un indicateur d'évaluation de l'impact de la flore adventice (section 2.4).

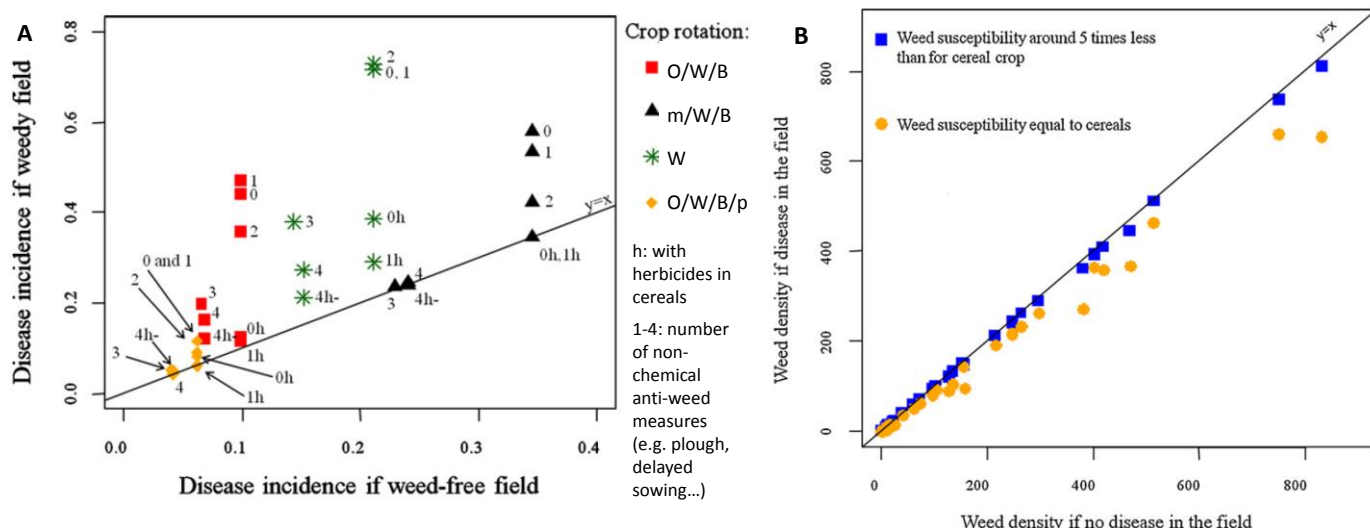


Figure 6. Effet de la flore adventice sur l'incidence du piétin-échaudage en céréales (gauche) et effet de la maladie sur la densité du vulpin dans 32 systèmes de culture contrastés. Exemple de la Bourgogne (tiré de Mézière *et al.*, 2013)

2.2 L'INTERACTION ENTRE ADVENTICES ET UN PARASITE

Contexte. La plante parasite orobanche rameuse (*Phelipanche ramosa* L.) est devenue fréquent et nuisible en France sur colza, et infeste également les cultures de chanvre, tabac et sarrasin (Benharrat *et al.*, 2005; Gibot-Leclerc *et al.*, 2006b; Brault *et al.*, 2007). Les adventices peuvent stimuler la germination de semences du parasite, ce qui réduit le risque d'infection potentiel pour les cultures futures mais augmente celui pour les cultures hôtes en place. Les adventices peuvent aussi être permettre la fixation et la reproduction du parasite, ce qui augmente le risque d'infection potentiel pour les cultures futures. Les pratiques culturales influencent directement le parasite (ex. enfouissement de semences par le travail du sol, position du cycle cultural par rapport au cycle de dormance du parasite), mais aussi indirectement via leur effet sur les adventices. Aucune méthode curative n'étant disponible pour lutter contre le parasite en grandes cultures.

Objectif. Développer un modèle des effets des systèmes de culture sur la dynamique du parasite, intégrant les effets directs sur le cycle de vie du parasite, et indirects via les adventices.

Matériel et méthodes. La structure de ce nouveau modèle appelé PHERASYS (pour *Phelipanche ramosa* et système de culture) est calquée sur celle du modèle FLORSYS développé pour les adventices (Gardarin *et al.*, 2012; Munier-Jolain *et al.*, 2013; Colbach *et al.*, 2014a; Colbach *et al.*, 2014b; Colbach *et al.*, 2014c; Munier-Jolain *et al.*, 2014). Une première version du modèle a été construite à partir de la littérature. Ensuite, des expérimentations ont été mises en place dans le cadre du présent projet pour étudier et quantifier les processus insuffisamment connus (section 1). Une nouvelle version du modèle a été formalisée dans le cadre d'un stage (Pointurier, 2015; Pointurier *et al.*, 2016) et est actuellement en cours de codage informatique.

Résultats. Le cycle de vie du parasite est composé d'une succession de six stades (Figure 7). Chaque jour, des semences meurent, avec un taux de mortalité dépendant de l'âge des semences. Le taux de dormance dépend de l'âge mais aussi de la saison et du passé hydrothermique subi par les semences. Des semences non-dormantes sont stimulées lorsque des racines de plantes non fleuries et appartenant à une espèce stimulatrice passent à proximité. La vitesse de germination dépend des conditions hydrothermiques du sol. Les semences germées se fixent si des racines de plantes appartenant à une espèce fixatrice passent à proximité. Le nombre de fixations réussissant à lever et fructifier dépend de la biomasse de la plante hôte, de son stade et du nombre de fixations concurrente. La production de semences est proportionnelle à biomasse du parasite. Les pratiques culturales peuvent agir directement sur le parasite, ou indirectement via les plantes adventices ou cultivées stimulatrices et/ou fixatrices (Tableau 2).

Perspectives. Dès la fin de la dernière expérimentation encore en cours (section 1.2), le modèle sera finalisé et des simulations pourront débuter pour évaluer et concevoir des systèmes de culture adaptés à la gestion du parasite.

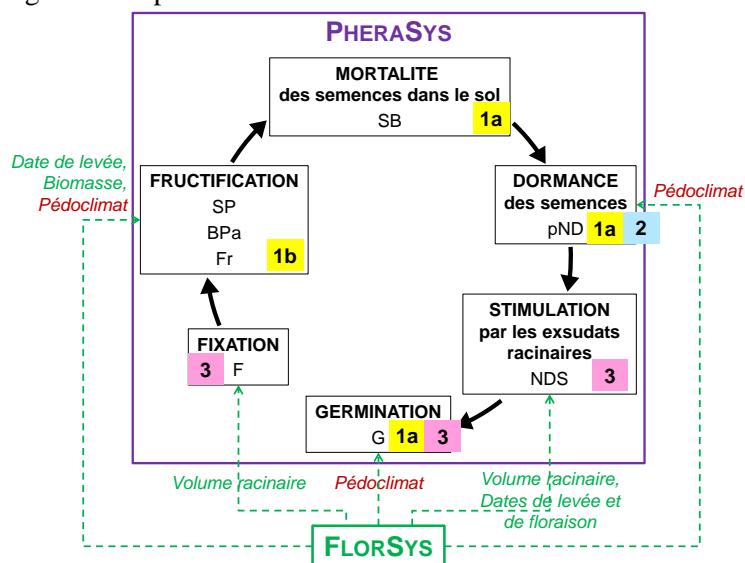


Figure 7. Processus et variables d'état prédites dans le modèle PHERASYS pour le parasite orobanche (en noir) en fonction de variables d'état décrivant les cultures et les adventices (en vert) et les conditions du sol (en marron) prédites par FLORSYS. Les chiffres indiquent l'origine des données: expérimentations du chapitre 1.2 (1a), chapitre 1.5 (1b), déjà publiées (2) et autre littérature (3)

Tableau 2. Effet des pratiques culturales sur la dynamique du parasite orobanche dans PHERASYS

Pratique culturales	Effet sur le parasite dans le modèle	Formalisation dans le modèle
Travail du sol	Le travail du sol modifie la répartition des semences dans le sol. Les semences sont alors plus ou moins proches des racines stimulatrices/hôtes ce qui influence le nombre de germinations/fixations.	Semences déplacées = $f(\text{outil de travail, profondeur, structure du sol})$ (calculé dans FLORSYS) Semences germées/fixées = $f(\text{volume racinaire des plantes stimulatrices/fixatrices})$
Rotation	Le choix des cultures en rotation favorise le parasite selon leur « classe d'hôte » (hôte, non hôte, faux-hôte), leur capacité à induire les germinations et leur sensibilité au parasite. Les plantes pièges supportent le développement du parasite et sont détruites avant sa fructification.	Semences stimulées = $f(\text{pouvoir stimulateur des plantes})$ Semences fixées = $f(\text{classe d'hôte des plantes})$ Hampes florales parasites = $f(\text{biomasse de l'hôte})$
Décalage de la date de semis	Le décalage de la date de semis décale la période de croissance de la culture par rapport au cycle de dormance des semences. La culture est moins infestée lorsqu'elle croit au moment où les semences sont dormantes. Elle est moins endommagée si le parasite se fixe tardivement.	Période de stimulation de la germination des semences = $f(\text{date de levée et de floraison de la culture})$ Semences stimulées = $f(\text{semences non dormantes})$
Gestion des adventices	Les mesures de gestion employées contre les adventices ont un effet indirect sur le parasite via la flore adventice résiduelle. Les effets des adventices sur le parasite sont les mêmes que ceux des espèces en rotation.	Flore adventice = $f(\text{système de culture})$ (calculé par FLORSYS)
Densité de semis	L'augmentation de la densité de semis augmente la probabilité de rencontre entre une semence parasite et une racine stimulatrice/fixatrice.	Semences germées/fixées = $f(\text{volume racinaire des plantes stimulatrices/fixatrices})$
Fertilisation	La fertilisation modifie la biomasse de l'hôte dont dépendent le nombre de germinations/fixations parasites et le nombre de hampes florales parasites qui se développent sur la plante hôte.	Biomasse des plantes stimulatrices/fixatrices = $f(\text{fertilisation})$ (calculé par FLORSYS) Semences germées/fixées = $f(\text{volume racinaire des plantes stimulatrices/fixatrices})$ Hampes florales parasites = $f(\text{biomasse de l'hôte})$

2.3 MODÉLISER LA RÉSISTANCE AUX HERBICIDES

Contexte. La réduction de la gamme d'herbicides disponibles entraîne l'utilisation répétée d'herbicides ayant le même mode d'action, et donc le risque d'apparition de résistances à ce mode d'action dans la flore adventice visée.

Objectif. Modéliser la résistance aux herbicides dans FLORSYS pour évaluer les systèmes de culture innovants pour leur risque d'apparition de résistance aux herbicides.

Matériel et méthodes. Au préalable, un modèle de résistance monogénique multi-allèle a été introduit dans le prototype monospécifique de FLORSYS simulant mutation, sélection et coût de fitness, puis paramétré pour la résistance aux inhibiteurs des ACCases due à la mutation de cible (Colbach *et al.*, 2016a). Des simulations avec des systèmes de culture bourguignons ont testé les effets de différentes pratiques culturales sur la probabilité et les délais d'apparition de résistances en graminées.

Une version plus simple a été introduite dans FLORSYS et paramétré pour la résistance au glyphosate (Fernier, 2014; Colbach *et al.*, submitted-b). Cet herbicide est utilisé fréquemment et sur des surfaces étendues, notamment en travail du sol simplifié. Des simulations ont été réalisées avec des rotations à base de maïs dans deux régions (Aquitaine, Catalogne), pour quantifier les effets de différentes pratiques agricoles sur le risque d'apparition de résistance au glyphosate (Colbach *et al.*, submitted-b) puis l'effet de cette résistance sur la nuisibilité et les bénéfices de la flore adventice (Colbach *et al.*, submitted-a). Des tableaux de conseil ont été élaborés sur la base de ces simulations.

Résultats. En rotation colza/blé/orge en Bourgogne, remplacer l'un des 7 herbicides par un inhibiteur des ACCases entraîne l'apparition de résistance en moyenne après 18 ans, avec une probabilité de 40% (Colbach *et al.*, 2016a). Avec 3-4 inhibiteurs des ACCases, ce délai est réduit à 6-8 ans. Les doses réduites avance 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% and 60% des cas.

Tableau 3. Effet des systèmes de culture à base de maïs testés dans deux régions sur la densité adventices et la probabilité de résistance (1 plante mutante/m²). Résultats de simulations avec FLORSYS sur 28 ans et dix scénarios climatiques. Les chiffres d'une même colonne suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents à p=0.05 (tiré de Colbach *et al.*, submitted-b)

	Aquitaine			Catalonia		
	Weed plants/m ² (log ₁₀ scale)	Mutant advent (probability)	Years to mutant advent	Weed plants/m ² (log ₁₀ scale)	Mutant advent (probability)	Years to mutant advent
1 Diverse rotation (conventional)&	1.27 C	0.90 EF	7.02 BC	2.29 C	1.00 E	10.10 A
2 Diverse rotation with HT maize	1.11 C	0.80 EDF	8.45 BC	1.82 D	0.70 DC	9.49 BA
3 + no plough.	-0.47 F	0.30 BAC	17.38 A	2.70 B	1.00 E	1.50 C
4 Wheat/HTmaize	0.44 D	0.40 BC	10.85 BA	2.47 CB	1.00 E	7.40 BAC
5 + no plough..	1.69 B	0.80 EDF	2.61 DC	2.71 B	1.00 E	1.00 C
6 HTmaize monoculture	0.43 D	0.10 BA	20.63 A	0.85 E	0.50 BC	8.46 BAC
7 + early sowing	0.04 E	0.60 EDC	9.67 BA	0.78 FE	0.40 B	12.33 A
8 + late sowing	0.66 D	0.50 DC	8.71 BA	2.34 CB	0.80 DE	6.97 BAC
9 + no plough	-1.08 G	0.50 DC	11.40 BA	0.11 G	0.30 BA	1.78 BC
10 + no plough + early sowing	-1.71 I	0.00 A	> 28	0.40 FG	0.10 A	8.73 BAC
11 + no till	3.51 A	1.00 F	1.00 D	3.51 A	1.00 E	4.00 BC
12 + no till + 2nd glyphosate	3.46 A	1.00 F	1.00 D	3.27 A	0.90 DE	0.96 C
13 + no till + 2nd glyphosate + early sowing	3.47 A	1.00 F	1.00 D	3.51 A	1.00 E	2.50 BC
14 + temporary crop\$ killed with glyphosate	-1.26 HG	0.00 A	> 28	1.47 D	0.40 B	9.99 BA
15 + temporary crop killed with tillage	-1.46 HI	0.30 BAC	2.25 DC	2.29 C	0.80 DE	10.05 A
Partial R ² - cropping system#	0.97 ****	0.49 ****	0.55 ****	0.86 ****	0.45 ****	0.33 ****
Partial R ² - weather repetition	0.00 ns	0.02 ns	0.04 ns	0.02 *	0.09 ***	0.08 ns

& Soya/Maize/Wheat/Maize in Aquitaine, Wheat/Alfalfa/Maize in Catalonia. \$barley catch crop in Aquitaine, triticale cash crop in Catalonia. **, ***, ****: effect significant at p=0.05, 0.01, 0.001, 0.0001, respectively; ns: effect not significant at p=0.05

Dans les systèmes avec maïs, les simulations montrent que, pendant les 28 simulées, (1) l'application de glyphosate n'induit la résistance au glyphosate dans les adventices uniquement si d'autres facteurs culturaux favorisent les adventices, particulièrement le semis direct (Tableau 3); (2) les applications de glyphosate en interculture augmentent plus le risque de résistance que celles en culture, (3) les applications de glyphosate sélectionnent 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

fitness que pour la résistance à l'herbicide, (4) la résistance est la plus fréquente dans des espèces qui n'évitent pas l'herbicide (via leur taille ou timing) et dans les espèces peu compétitives, (5) en cas de contrôle efficace de la flore, la résistance prolifère plus dans les espèces allogames ([Colbach et al., submitted-b](#)).

La mise en place de la résistance au glyphosate dans la flore adventice avait peu d'effet sur la biodiversité végétale simulée, avec un remplacement des populations ou espèces non résistantes par des populations ou espèces résistantes ([Colbach et al., submitted-a](#)). L'offre trophique pour oiseaux, carabes et abeilles dépendant des adventices et la nuisibilité de ces dernières pour la production agricole n'étaient affectées que lorsque la densité adventice était faible. L'identification des traits d'espèces les plus nuisibles pour la production agricole montrait qu'aucune des 25 espèces adventices testées en simulation ne combinait les traits les plus nuisibles avec la résistance au glyphosate.

Perspectives. Des simulations supplémentaires sont nécessaires pour établir des conclusions plus génériques sur les risques et conséquences de la résistance aux herbicides. FLORSYS va être paramétré pour la résistance à d'autres herbicides, notamment aux ALS.

2.4 DES INDICATEURS DE NUISIBILITÉ ET BÉNÉFICES DE LA FLORE ADVENTICE

Contexte. La flore adventice est à la fois un bioagresseur très nuisible et une composante importante de la biodiversité des paysages agricoles. Elle peut avoir d'autres bénéfices pour l'environnement.

Objectif. L'objectif de cette partie est de développer différents indicateurs de la nuisibilité et des bénéfices de la flore adventice pour la production agricole et l'environnement. Ces indicateurs sont destinés à être connectés aux sorties du modèle FLORSYS afin d'évaluer des systèmes de culture existants et prospectifs et termes de conséquences de la flore adventice pour la production agricole et l'environnement.

Méthodes. La méthode a été développée pour une gamme complémentaire d'indicateurs de nuisibilité pour la production agricole et de contribution à la biodiversité (section 2.4.1). Ces indicateurs sont maintenant couplés à FLORSYS et sont déjà utilisés pour évaluer des systèmes de culture ([Colbach et al., 2014a](#); [Colbach et al., 2016b](#)). Nous utilisons actuellement le même principe pour développer d'autres indicateurs (sections 0 - 2.4.5).

2.4.1 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE ET DES PREMIERS INDICATEURS

Principe. Le modèle FLORSYS prédit une large gamme de variables journalières décrivant l'état de la flore adventice (stock semencier, densités de plantes, biomasses...) dans les systèmes de culture. Ces variables sont traduites en indicateurs³ qui reflètent les conséquences des adventices pour la production agricole et la biodiversité et serviront à évaluer les systèmes de culture. Ces indicateurs sont tous basés sur un même principe ([Mézière et al., 2015c](#)): (1) identification d'une ou plusieurs variables d'état adventices pertinentes pour l'impact à évaluer (ex. densité de semences à la surface du sol pour l'indicateur d'offre trophique pour oiseaux), (2) identification de la période d'impact clé (ex. l'hiver pour l'offre trophique pour oiseaux, en tant que période disette), (3) détermination des traits fonctionnels traduisant l'impact des espèces (ex. teneur en lipides des semences pour l'offre trophique aux carabes). 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.

Cinq indicateurs de nuisibilité étaient développés pour prendre en compte les critères les plus fréquemment listés par des agriculteurs dans une enquête internet ([Mézière et al., 2015c](#)): (1) perte de rendement, (2) pollution des récoltes par des semences et débris d'adventices, (3) problèmes techniques à la récolte, càd bourrage de la moissonneuse-batteuse par de la biomasse adventice verte,

³ Les indicateurs sont considérés ici comme "(1) an informative function, i.e. to supply simplified information about a complex system (e.g. an agrosystem), or an unmeasurable criteria (e.g. biodiversity, sustainability) (...); (2) a decision aid function to help to achieve the initial objectives, e.g. the sustainability of a farming system" (Bockstaller & Girardin, 2003).

et (4) le "salissement" du champ, c'est-à-dire la biomasse adventice moyenne en culture. Cet indicateur est plutôt sociologique que biologique, permettant de prendre en compte qu'un champ "sale" pose des problèmes d'acceptation, même s'il n'est pas à l'origine d'une perte de rendement ou d'une autre conséquence sur la production agricole. Un cinquième indicateur était ajouté, c'est-à-dire (5) l'augmentation de maladie en cultures (ici le piétin-échaudage des céréales, section 2.1).

Les indicateurs pour la contribution des adventices à la biodiversité étaient développés en collaboration avec des écologues (Mézière *et al.*, 2015c). Deux reflètent la contribution des adventices à biodiversité végétale: (1) la richesse spécifique, c'est-à-dire le nombre d'espèces adventices présentes pendant la campagne culturale, et (2) l'indice d'équitabilité de Pielou, c'est-à-dire la dominance de la flore par une ou quelques espèces. Les trois autres indicateurs évaluent les adventices en tant que ressource trophiques pour d'autres organismes dans l'agroécosystème, considérant les périodes d'activité et de disette: (3) le nombre de semences adventices par la contribution de l'espèce au régime alimentaire des oiseaux et présentes à la surface du sol en automne et en hiver (Wilson *et al.*, 1999; Marshall *et al.*, 2003), (4) les semences riches en lipides présentes en été pour nourrir des insectes tels que les carabes (Trichard *et al.*, 2013), et (5) les fleurs adventices pondérées par la contribution de l'espèce pour nourrir les abeilles domestiques au printemps et en été (Bockstaller *et al.*, 2012).

Antagonismes et synergies entre nuisibilité et biodiversité. Une large gamme de systèmes de culture contrastés a été identifiée dans des enquêtes en exploitation agricole dans deux régions, puis simulée avec FLORSYS sur plusieurs années et répétée avec différentes séries climatiques (Mézière *et al.*, 2015c). Les antagonismes et synergies entre nuisibilité et bénéfices de la flore adventice étaient identifiés à l'aide de corrélations entre valeurs d'indicateurs, montrant que globalement la nuisibilité augmente avec la biodiversité (corrélation positive dans la Tableau 4). Ces corrélations étaient cependant faibles, et d'autres étaient négatives, montrant qu'une augmentation de biodiversité peut être compatible avec une nuisibilité réduite (par ex. ressources trophiques pour insectes vs. perte de rendement ou salissement du champ). Par conséquent, il y a bien des systèmes de culture qui concilient production agricole et biodiversité. Ce travail a été étendu récemment à une plus grande gamme de systèmes de culture (chapitre 3.3).

Tableau 4. Antagonismes et synergies entre nuisibilité et contribution à la biodiversité de la flore adventice. Corrélation de Spearman entre valeurs annuelles des indicateurs simulées avec FLORSYS dans 26 systèmes de culture identifiés en enquête en exploitation agricole en Bourgogne et Poitou-Charentes. Chaque système était simulé sur 30 ans et répété 20 fois avec des scénarios climatiques choisis au hasard dans la région d'origine (Mézière *et al.*, 2015c).

Indicateurs de biodiversité	Indicateurs de nuisibilité				
	Perte de rendement ^{&}	Pollution de récolte	Problèmes techniques de récolte	Salissement du champ	Augmentation de maladie
Richesse spécifique ^b	0.24	0.10	0.10	0.20	ns
Équitabilité de flore [*]	0.08	0.18	0.11	0.14	-0.06
Ressource trophique pour Oiseaux [%]	ns	ns	ns	0.09	-0.13
Insectes (carabes) [¥]	-0.13	0.22	0.20	-0.13	ns
Abeilles domestiques [¢]	ns	0.16	0.13	ns	ns

2.4.2 DE NOUVEAUX INDICATEURS DE RESSOURCES TROPHIQUES

Contexte. La flore adventice résiduelle tolérée dans le cadre de la protection intégrée peut être une source trophique pour différents pollinisateurs. Un indicateur de valeur pollinisatrice a été développé pour les abeilles, domestique et sauvages, bourdons et syrphes dans un précédent projet (Ricou, 2014) {Ricou, 2014 #16524} dont certains ont été déjà connectés à FLORSYS (section 2.4.1). La sortie de l'indicateur sous forme de note entre 0 et 10 est calculée à partir des traits floraux des espèces.

Objectif. L'objectif de ce travail est de : a) développer un indicateur de valeur pollinisatrice pour les papillons à partir de ce qui a été développé pour les pollinisateurs, b) de valider l'indicateur en le confrontant à observations de terrain.

Matériel et méthodes. En se basant sur le travail de Ricou et al. (2014) et la bibliographie, nous avons revu les variables d'entrées dans le cadre d'un stage M2 (Meyer, 2014). Pour la validation, 17 transects (5 × 50 mètres) ont été observés durant les 3 campagnes d'échantillonnage sur la zone de grandes cultures autour de l'INRA de Colmar, selon un protocole adapté de la bibliographie. Un calculateur Excel a été développé (Tableau 5).

Résultats. Comme l'indicateur pour les pollinisateurs, l'indicateur lépidoptère calcule une valeur pour chaque espèce floral et peut fournir une valeur au niveau d'un couvert (ex : bord de champ). L'indicateur par espèce résulte de l'agrégation par arbre de décision associant de sous-ensembles flous de trois facteurs (Tableau 6) : a) l'attractivité visuelle (prenant en compte les variables, couleur, taille de fleur/inflorescence), b) l'accessibilité basée sur la famille botanique c) la récompense florale (quantité et composition du nectar), Le recours à la logique floue permet d'éviter des sauts brutaux de valeur d'indicateur lors de changement de classe. La valeur finale est la moyenne du calcul pour 6 familles de papillons du jour : *Papilionidae*, *Nymphalidae*, *Hesperiidae*, *Satyridae*, *Pieridae*, *Lycaenidae*, qui ont l'avantage d'être mieux étudiées.

Le calcul pour les espèces de FLORSYS montre des résultats entre 1 (graminées) et 7,6 pour *Matricaria perforata* Mérat, seule espèce avec une valeur > 7 (Tableau 5). Les résultats de validation sur la zone de Colmar montrent une corrélation faible entre les observations de papillons et la valeur de l'indicateur au niveau des bord de champ (n = 22 R² = 0,35). Cependant les plantes ayant un indicateur < 7 sont faiblement visitées (10,4 % des visites) par rapport aux plantes avec un indicateur > 7 (89,6% des visites). Une analyse facteur par facteur valide dans l'ensemble les choix réalisés.

Conclusion & perspectives. Un indicateur de valeur pollinisatrice pour 6 familles de lépidoptères a été développé pour 347 espèces d'adventices et de messicoles. Les valeurs calculées pour les espèces florales ont été intégrées dans FLORSYS et des simulations sont en cours d'analyse (section 3.3.2). La validation de l'indicateur devrait être étendue à d'autres secteurs. Les sources trophiques pour les chenilles devront aussi être prises en compte. Elles peuvent constituer un facteur limitant dans certaines situations (Bergerot et al., 2010).

Tableau 5. Valeurs pollinisatrices des adventices pour 6 familles de papillons. Ces valeurs serviront ensuite pour construire l'indicateur de ressource trophique "papillons" dans FLORSYS.

Plantes	Indicateur moyen 6 familles	Val Pol					
		Papilionidae	Nymphalidae	Hesperiidae	Satyridae	Pieridae,	Lycaenidae
Espèces							
Alopecurus myosuroides Huds.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Amaranthus retroflexus L.	2,4	2,1	2,1	2,1	2,6	2,6	2,6
Avena fatua L. [1753]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Capsella bursa-pastoris (L.) Medik. subsp	6,1	5,4	5,7	5,6	6,2	7,5	6,5
Chenopodium album L.	3,5	3,4	3,4	3,4	3,7	3,7	3,7
Echinochloa crus-galli (L.) P.Beauv.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Galium aparine L.	5,3	4,8	5,1	5,0	5,4	5,8	5,6
Geranium dissectum L.	5,1	4,5	4,3	4,5	5,9	5,8	5,7
Polygonum aviculare L.	4,0	3,9	3,9	3,9	4,3	4,3	3,9
Fallopia convolvulus (L.) Moench	5,1	4,4	4,4	4,4	5,7	5,7	5,7
Polygonum persicaria L.	5,3	4,7	4,7	4,7	6,0	6,0	5,8
Senecio vulgaris L.	6,7	6,5	6,5	6,8	6,0	7,1	7,2
Solanum nigrum L.	4,2	3,9	4,0	3,9	4,2	4,6	4,4
Sonchus asper (L.) Hill	6,9	6,7	6,7	7,1	6,1	7,2	7,3
Stellaria media (L.) Vill.	5,1	4,3	4,6	4,5	5,4	6,0	5,8
Veronica hederifolia	6,5	5,8	5,8	5,8	7,7	7,0	6,9
Datura stramonium	6,7	6,7	7,2	6,9	6,3	6,8	6,6
Digitaria sanguinalis	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Panicum miliaceum	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Poa annua L.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Abutilon theophrasti	3,9	3,5	3,5	3,7	4,0	4,5	4,5
Setaria viridis (L.) P.Beauv.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Matricaria perforata Mérat	7,6	7,5	8,1	7,9	7,1	7,7	7,2

Tableau 6. Règles de décision pour l'arbre donnant la valeur pollinisatrice (valable pour les 6 familles). Les pourcentages représentent les poids des variables dans l'arbre.

Attraction visuelle (30 %)	F				D			
Accessibilité (20 %)	F		D		F		D	
Récompense (50 %)	F	D	F	D	F	D	F	D
Valeur pollinisatrice	10	4	8	3	5	2	4	0

2.4.3 RÉDUCTION DU LESSIVAGE DE NITRATES

Contexte et objectif. La flore adventice résiduelle peut jouer un rôle de « pièges à nitrates » pendant l'interculture. L'objectif est de mettre au point un indicateur pour rendre compte de la plus ou moins grande capacité des adventices à jouer un rôle de « pièges à nitrates » pendant l'interculture. Nous considérons qu'une espèce est intéressante pour piéger les nitrates si sa croissance est très dépendante de la disponibilité en azote du sol et/ou si elle est très présente dans la parcelle considérée.

Méthode. Ce travail repose sur notre connaissance de la réponse des espèces adventices à l'azote (Moreau *et al.*, 2013) et sur des bases de données disponibles (Ellenberg, 1974; Landolt, 1977). La structure de l'indicateur est basée sur le même principe que les indicateurs précédents (section 2.4.1).

Résultats. Nous proposons d'utiliser l'indice d'Ellenberg-N (Ellenberg, 1974) pour refléter la capacité d'absorption d'azote des espèces. Cet indice écologique rend compte de la dépendance de la croissance des plantes à l'azote : plus une espèce est nitrophile, plus sa surface foliaire répond à l'azote (Moreau *et al.*, 2013) et donc plus sa « force » de prélèvement est importante. Par ailleurs, nous considérons que plus la biomasse par espèce adventice est grande, plus l'espèce aura une grande capacité à prélever les nitrates. Ainsi, dans le calcul de l'indicateur, la contribution de chaque plante adventice est caractérisée par sa biomasse aérienne et l'indice d'Ellenberg de l'espèce. L'indicateur est calculé entre la récolte du précédent et jusqu'au début du drainage (quand la capacité au champ est atteinte).

Pour une période donnée, plus la valeur de cet indicateur est élevée, plus le potentiel de piégeage des nitrates est élevé. Une valeur élevée de cet indice pourra être obtenue :

- Si toutes les espèces sont très nitrophiles ;
- Si seules quelques espèces abondantes sont très nitrophiles ;
- S'il y a peu d'espèces très nitrophiles mais une flore adventice très abondante.

Conclusion. Cette étude a permis de développer un indicateur reflétant la capacité de la flore adventice à jouer le rôle de piège à nitrates. Cet indicateur a été codé dans le modèle FLORSYS. Des simulations ont été effectuées (section 3.3.2) et leur analyse permettra d'identifier quels systèmes de culture permettent de maximiser le rôle bénéfique de la flore adventice en termes de piège à nitrates, tout en limitant la nuisibilité associée à cette flore.

2.4.4 LIMITATION DE L'ÉROSION

Objectif et méthode. La flore adventice résiduelle peut contribuer à réduire l'érosion, notamment pendant l'interculture. Un indicateur a été développé pour quantifier le potentiel de cette réduction sur le principe de la section 2.4.1. La variable pertinente de FLORSYS caractérisant la contribution d'une plante adventice est le % de lumière interceptée par la plante comme proxy du taux de couverture. La période de risque débute à la récolte du précédent et dure jusqu'à ce que le taux de couverture de la culture atteigne 20%. Cet indicateur se calcule au niveau de la communauté et n'a pas besoin de paramétrage spécifique.

Perspectives. Cet indicateur est formalisé et intégré au modèle FLORSYS. Des simulations ont été effectuées (section 3.3.2) et leur analyse permettra d'identifier quels systèmes de culture permettent de maximiser le rôle bénéfique de la flore adventice en termes de protection contre l'érosion.

2.4.5 DES INDICATEURS DE RISQUE D'OROBANCHE

Contexte et objectif. À cause de problèmes expérimentaux (section 1.2), le module PHERASYS prédisant la dynamique du parasite orobanche dans les systèmes de culture et en fonction de la flore adventice (section 2.2) n'était pas prêt à temps pour être utilisé dans le cadre de ce projet. Afin de pouvoir malgré tout estimer le risque d'orobanche lié à la flore adventice, nous avons développé un indicateur de risque à partir des connaissances sur le fonctionnement du parasite (section 1).

Matériel et méthodes (Colbach *et al.*, in preparation-a). L'indicateur orobanche se compose de trois sous-indicateurs, évaluant (1) la stimulation de germinations de semences parasites par les adventices (I_{total_stim}) qui reflète la réduction potentielle du risque pour les cultures futures, (2) la stimulation de germinations de semences parasites par les adventices pendant les cultures hôtes (I_{crop_stim}) qui reflète le risque potentiel pour la culture en cours, (3) le potentiel de reproduction du parasite sur les adventices (I_{repro}), c'est-à-dire la présence d'adventice fixatrices vivant suffisamment longtemps pour permettre la maturation du parasite; la combinaison de I_{repro} et I_{total_stim} reflète le risque potentiel pour les cultures futures.

I_{total_stim} est calculé pour l'ensemble de la campagne culturale. La variable d'état adventice pertinente est la biomasse adventice aérienne de plantes avant floraison, en tant que proxy de la biomasse racinaire (qui n'est pas encore intégrée dans FLORSYS) et donc du volume de sol dans lequel les semences parasites peuvent être stimulées par les exsudats racinaires. Le trait fonctionnel spécifique est la capacité de l'espèce à stimuler des germinations parasites. Le même principe est utilisé pour I_{crop_stim} , mais limité à la période du semis à la récolte de cultures hôtes.

I_{repro} est calculé sur l'ensemble de la campagne culturale, comptabilisant les plantes adventices fixatrices atteignant leur maturité. La variable d'état adventice utilisée est la biomasse aérienne comme proxy de la biomasse parasite (Moreau *et al.*, accepted) et de la production de semences parasite. Le trait fonctionnel spécifique est la capacité de l'espèce à permettre la fixation du parasite.

Résultats. Des simulations ont été effectuées (section 3.3.2) pour quantifier l'impact des techniques culturales sur le risque parasite dû aux adventices et identifier les combinaisons de pratiques culturales qui augmentent ou diminuent ce risque.

2.4.6 INDICATEUR DU POTENTIEL DE RÉDUCTION DU TRANSFERT DE PESTICIDES

Objectif. Rendre compte de la capacité des adventices à jouer un rôle de « pièges à pesticides » pour limiter le transfert des pesticides dans l'environnement, via l'interception des pesticides par le feuillage ou par le système racinaire des adventices. Nous considérons qu'une espèce va être intéressante pour piéger les pesticides, si elle a une surface foliaire importante et/ou si elle transpire beaucoup et si les substances actives considérées sont lipophiles. Cet indicateur a deux finalités :

- évaluer l'efficacité des applications d'herbicide ;
- évaluer le potentiel de rétention des autres pesticides (insecticides et fongicides).

Matériel et méthodes. Ce travail est basé sur les connaissances concernant l'interception des pesticides par le feuillage (Linders *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2011) et l'absorption racinaire (Briggs *et al.*, 1982; Juraske *et al.*, 2009), associée à la mobilité des substances actives dans le sol (McCall *et al.*, 1980).

Résultats (Queyrel & Colbach, in preparation). Deux indicateurs ont été développés, pour l'interception foliaire et l'absorption racinaire. À chaque application de pesticide, la contribution d'une plante adventice à l'interception des pesticides par le feuillage dépend de la quantité de lumière interceptée par le feuillage de la plante comme proxy de la fraction de pesticide interceptée par le feuillage. Pendant les jours de persistance des pesticides dans le sol, la contribution d'une plante adventice à l'interception par le système racinaire dépend de (1) sa surface foliaire comme proxy du potentiel de transpiration de la plante, (2) sa biomasse aérienne comme proxy de la biomasse racinaire et donc du potentiel d'absorption racinaire de l'adventice, (3) le caractère lipophile des matières actives ainsi que leurs propriétés d'adsorption dans le sol afin de déterminer leur mobilité potentielle.

Perspectives. Ces indicateurs ont été intégrés dans le modèle FLORSYS. Des simulations ont été réalisées et leur analyse permettra d'identifier les systèmes de culture permettant de maximiser le rôle bénéfique de la flore adventice en termes de piégeage des pesticides (section 3.3.3).

2.4.7 CONFRONTATION DES INDICATEURS AUX UTILISATEURS

Dans le cadre du projet ANR CoSAC (www.projet-cosac.fr) qui prend la suite du présent projet, nous avons réalisé une enquête web auprès des conseillers agricoles pour évaluer l'intérêt des différents indicateurs d'impact de la flore adventice à leurs yeux. Sans surprise, les indicateurs de nuisibilité, notamment la perte de rendement, sont considérés comme cruciaux (Figure 8). Mais plusieurs

indicateurs de bénéfices, notamment pour l'environnement, sont classés comme plus importants que certains indicateurs de nuisibilité. La biodiversité végétale est considérée comme mineure.

La vision des conseillers a ensuite été soumise aux regards de groupes d'agriculteurs, lors d'atelier de conception de systèmes de culture (section 3.4.3). Le classement était globalement le même, mais les agriculteurs interrogés étaient plus ouverts sur les questions de bénéfices, y compris biodiversité. Cependant, cette vision n'est pas représentative dans la mesure où les agriculteurs participant à ces ateliers sont généralement ceux qui sont les plus ouverts à l'innovation.

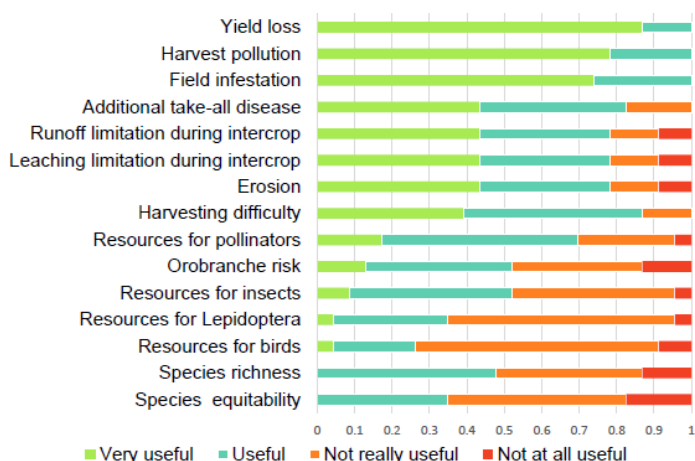


Figure 8. Évaluation de l'intérêt des indicateurs d'impact de la flore adventice prédits par FLORSYS aux yeux des conseillers agricoles. Résultat d'une enquête web auprès de 21 conseillers d'instituts techniques, coopératives agricoles et chambres d'agriculture (Colas *et al.*, 2015)

2.5 UNE VERSIONS SPATIALEMENT EXPLICITE DE FLORSYS

Contexte. Les semences adventices se dispersent dans les paysages, par des vecteurs naturels mais aussi les outils agricoles (Menalled *et al.*, 2000). Le système de culture et la dynamique adventice d'une parcelle donnée peut influencer ses voisines. Il en est de même pour les habitats semi-naturels. De plus, il pourrait être plus facile de concilier production agricole et biodiversité sur un ensemble de parcelles ("landsparing"), plutôt que dans chaque parcelle ("landsharing").

Objectif. L'objectif est de passer FLORSYS de l'échelle du champ à l'échelle pluriparcellaire, puis de tester des scénarios de landsharing vs. landsparing.

Matériel et méthodes. Les étapes de transformation du modèle étaient les suivantes (Garrido, 2014; Colbach *et al.*, in preparation-c):

- Parallélisation des calculs dans FLORSYS afin de permettre la simulation simultanée de plusieurs champs, à l'aide de la plateforme de modélisation RECORD,
- Introduction d'habitats semi-naturels (bandes enherbées, bordures de route) composés de végétation permanente, avec des approches très simplistes pour la multiplication végétative des pérennes,
- Couplage de FLORSYS, via la plateforme de modélisation RECORD, au modèle CaliFloPP (Bouvier *et al.*, 2009) calculant la dispersion de particules entre parcelles à partir de fonctions de dispersion individuelle,
- Introduction de fonctions de dispersion individuelle de semences par des vecteurs naturels à partir de la littérature (Thomson *et al.*, 2011).

Des simulations ont ensuite été réalisées pour comparer des scénarios de landsharing, landsparing combinant des systèmes de culture contrastés, et landsparing intégrant des habitats semi-naturels (Colbach *et al.*, 2016c; Colbach *et al.*, in preparation-c). Tous les systèmes étaient à base de maïs et simulés avec des conditions pédoclimatiques d'Aquitaine.

Résultats. Dans l'exemple testé ici, les meilleurs scénarios pour concilier production et biodiversité étaient ceux cultivant 75% de systèmes à forte production agricole et 25% de systèmes à forte biodiversité dans la micro-région (Tableau 7). Les scénarios combinant 90% de surface cultivée avec du système à forte production et 10% de bandes enherbées étaient quasiment aussi bons. La production et la biodiversité des scénarios "landsharing" étaient presque toujours plus faible, quel que soit l'assolement annuel.

Perspectives. Cette étude servait de preuve de concept pour tester le modèle pluriparcellaire et la méthode de simulation. Les résultats sont spécifiques à la région et au type de systèmes de culture testés. Des analyses sont en cours pour déterminer la sensibilité des résultats au type de courbe de dispersion de semences utilisées et à forme du parcellaire.

Tableau 7. Land sharing vs. land sparing? Comparaison de scénarios conciliant biodiversité et production au niveau de la parcelle (A), en combinant des systèmes de culture contrastés au niveau de l'îlot de parcelles (B), ou en intégrant des habitats semi-naturels (C). Indicateurs d'impact de la flore adventice prédits par FLORSYS sur des îlots de 12 ha et 28 ans, avec 10 répétitions climatiques. Les chiffres d'une colonne suivie de la même lettre ne sont pas significativement différentes à $p=0.05$ (tiré de Colbach *et al.*, in preparation-c)

Scenario	Weed-related biodiversity in region				Crop production (MJ/ha)	Weed harmfulness in crops	
	Species richness	Bird food	Carabid food	Bee food		Harvest pollution	Field infestation
A. Landsharing scenarios:							
Annual crop pattern in region (crops per year) entirely grown with soybean/maize/wheat/maize							
One	11.22 G	3.55 J	2.54 I	0.66 F	68344 D	1.20 F	1.07 F
Two	12.04 E	4.16 HI	3.39 G	0.91 E	60184 E	1.60 E	1.61 D
All	12.94 D	4.31 G	4.15 E	1.11 D	51920 G	2.04 C	2.15 A
B. Landsparing scenarios: % fields with high-production vs. % fields with high-biodiversity cropping systems in region							
0% - 100%	15.72 A	9.58 A	8.66 A	2.78 A	59257 E	2.78 A	1.83 C
25% - 75%	14.88 B	8.90 B	7.53 B	2.23 B	70045 D	2.38 B	1.36 E
50% - 50%	13.26 C	8.02 C	6.13 C	1.57 C	80603 C	1.88 D	0.87 G
75% - 25%	11.72 F	7.11 D	4.43 D	0.94 E	90257 B	1.21 F	0.44 H
100% - 0%	8.44 J	5.36 F	0.63 J	0.18 I	100452 A	0.00 J	0.00 I
C. Landsparing scenarios with 10% grass strips and 90% high-production cropping systems in region: Mowing frequency in grass strips							
None	10.81 H	6.83 E	3.09 H	0.47 H	90295 B	0.52 I	0.01 I
1 per year	10.65 H	7.13 D	3.49 G	0.55 G	90161 B	0.98 G	0.02 I
3 per year	10.18 I	6.81 E	3.16 H	0.51 HG	90272 B	0.52 I	0.01 I

2.6 ÉVALUATION DE LA VERSION "CHAMP" DE FLORSYS

Objectif. Déterminer le domaine de validité et l'erreur de prédiction de FLORSYS et identifier les points à améliorer dans le futur.

Matériel et méthodes. L'évaluation du modèle se fait en trois étapes:

- Détermination du domaine de validité potentiel en analysant la structure du modèle,
- Évaluation de composantes individuelles du modèle en comparant des variables simulées à des observations détaillées à court terme,
- Évaluation de l'ensemble du modèle en comparant des sorties de variables simulées à des observations pluriannuelles.

Résultats. Les résultats des deux premières étapes ont été synthétisés dans un article récent (Colbach *et al.*, 2014a). La troisième étape récemment terminée utilise des données provenant des essais "système" de l'INRA Dijon-Époisses (Chikowo *et al.*, 2009) et Versailles-La Cage ainsi que de la base Biovigilance-Flore (Fried *et al.*, 2008). La qualité des prédictions est généralement satisfaisante (Table 1) et même très bonne pour Époisses et la Bourgogne en général, région dans laquelle une grande partie des processus biophysiques a été paramétrée (Table 2). L'évaluation a cependant identifié deux problèmes:

- Les stades des adventices et des cultures sont mal prédits à des latitudes plus au sud que la Bourgogne, notamment en Aquitaine. En effet, les fonctions déterminant le passage d'un stade à l'autre ont été établies en Bourgogne et ne dépendent que de la date de levée et de la température journalière, négligeant la longueur du jour.
- Les 16 espèces actuellement paramétrées dans FLORSYS ne couvrent pas les principales niches existant en grandes cultures. Par conséquent, la densité totale et la biomasse des adventices sont mal prédites, et ce particulièrement dans les régions où les 16 espèces simulées ne constituent pas les espèces dominantes de la flore, comme en Poitou-Charentes.

Perspectives. Des observations sont prévues dans un nouveau projet démarrant en 2015 (ANR CoSAC) pour intégrer l'effet de la latitude dans le module phénologique de FLORSYS. Ces résultats arriveront cependant trop tard pour le présent projet. Par ailleurs, nous avons récemment mené des expérimentations pour paramétrer d'autres espèces adventices. Les résultats de ces expérimentations devront encore être analysés pour estimer les paramètres. Il n'est pas certain que les résultats seront prêts à temps pour le présent projet.

Table 1. Domain of validity and evaluation ("validation") of FLORSYS (**synthesized from Colbach, 2014; Colbach *et al.*, 2014a; Colbach *et al.*, in revision**)

Process	What is correctly predicted	Limits of domain of validity	Reference
1. Analysis of model structure			
Reproduction	16 annual weed species	Disregards perennials and infrequent annuals	Model structure
Water availability	Temperate climates, irrigated fields	Overestimates drought-sensitive species in un-irrigated fields in dry regions?	Hypothesis
Competition for nitrogen	Well-fertilized fields	Underestimates oligotrophic species in nitrogen-poor conditions?	Hypothesis
Phenology	Fields at Burgundy latitude	Bad prediction of flowering dates of day-length-sensitive species?	Hypothesis
2. Validation of submodels			
Emergence flush after seed shed or burial	Timing, ranking of situations, magnitude of emergence density, including for species whose parameters were estimated with functional relationships	Emergence is overestimated if seedling loss due to disease	(Gardarin, 2008)
Light interception in heterogeneous canopies	Incident photosynthetically active radiation, ranking of situations	PARi is badly predicted on cloudy days in dense and homogenous canopies in winter	(Munier-Jolain <i>et al.</i> , 2013)
Weed species abundance	Ranking of species and regions	The modelled species are overestimated to the detriment of perennials and infrequent annuals	(Colbach <i>et al.</i> , 2014d)
Potential crop yield	Magnitude	Plant loss is overestimated if sudden frost with snow	(Colbach <i>et al.</i> , 2014c)
Soil seed bank [*]	Ranking of situations, magnitude of densities	Surface seed density is overestimated in long-term no-till	(Colbach <i>et al.</i> , 2006)
3. Validation of complete model (Colbach <i>et al.</i>, in revision)			
Daily weed density over the years	Well predicted	When simulated species represent a major part in the regional flora	
Total daily weed densities	Underestimated		
Daily weed biomass per species	Overestimated	Only evaluated at site where simulated species represented a major part in the regional flora	
Total daily weed biomass	Overestimated		
Weed seed bank	Well predicted		
Weed species densities averaged over rotation	Well predicted	When simulated species represent a major part in the regional flora	
Total weed densities averaged over rotation	Underestimated		
Crop yield	Well predicted	Oilseed rape overestimated, barley and soybean underestimated	

^{*}Evaluation for one grass weed species only, *Alopecurus myosuroides* Huds.

Table 2. Capacité de FLORSYS à prédire et classer des densités d'espèces adventices moyennes sur la rotation évaluée sur différents sites (**tiré de Colbach *et al.*, in revision**). Le biais et l'erreur de prédiction doivent être faibles par rapport à la gamme de variation des observations et par rapport à l'erreur expérimentale

Site/région	Measurement/experimental error ($\sqrt{\text{average variance}}$ of observations) [§]	Prediction bias [§]	Prediction error (rMSEP [§])	Modelling efficiency r ²	Ranking ability (Pearson correlation coefficient)	
Aquitaine	28%	-0.4%	23%	cns ^{&}	ns	0.64
Burgundy	38%	-4.6%	9%	cns	0.68	0.88
Poitou-Charentes	136%	22%	94%	cns	ns	0.30
Epoisses	15%	0%	ns [#]	14%	cns	0.45
La Cage	38%	9%	38%	cns	ns	0.39

[§] relative to (maximum – minimum observed density)

[&] cns When corrected for observed and simulated variability, rMSEP was not significant.

[#] ns Not significant

3 Diagnostic et conception de systèmes de culture

Dans cette partie, nous avons testé différentes méthodes d'utilisation de FLORSYS pour évaluer des systèmes de culture existants et prospectifs, pour proposer à la fin une méthode de conception de systèmes de culture à partir de simulations.

3.1 QUELQUES CONSTATS PRÉLIMINAIRES

Un effet variable en fonction de la météo. Des études de simulation préliminaires avec FLORSYS testant des systèmes de culture avec différents scénarios climatiques ont montré que l'efficacité d'une option varie considérablement en fonction des conditions climatiques (ex. le retard de semis ne réduit la levée des adventices graminées que dans 57%-64% des années), et une option intéressante en moyenne peut même produire l'inverse du résultat escompté (ex. le retard de semis augmente la levée des graminées dans 7-14% des cas) (**Colbach *et al.*, 2014a**). Les options techniques doivent donc toujours être testées avec différents scénarios climatiques.

Un effet variant au cours des années. De plus, une option peut être efficace à court-terme (ex. une culture dérobée diminue la perte de rendement due aux adventices dans le blé suivant) mais désastreuse à plus long terme (ex. la culture dérobée réduit la possibilité de faire des faux semis, laissant ainsi un stock semencier plus important causant des pertes de rendement dans les cultures suivant le blé) (**Colbach *et al.*, 2014a**). Les options techniques doivent donc toujours être évaluées sur plusieurs années.

Conclusion. Par la suite, les techniques culturales et systèmes de culture devront toujours être testés avec des simulations pluri-annuelles et des répétitions climatiques.

3.2 LA PRISE EN COMPTE DES RÈGLES DE DÉCISION DES AGRICULTEURS

Contexte. FLORSYS prend insuffisamment en compte les contraintes des agriculteurs dans la mesure où le modèle teste des programmes fixes et non pas des corps de règles de décision plus proches du raisonnement des agriculteurs (Reau *et al.*, 1996; Aubry *et al.*, 1998).

Objectif. Coupler FLORSYS avec un modèle de règles de décision puis évaluer différentes règles pour leur aptitude à gérer la flore adventice

Matériel et méthodes. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un stage (**Prince, 2013**).

- Encapsulation de FLORSYS dans la plateforme RECORD et connexion au modèle de règles de décision DÉCISION,
- Formalisation des corps de règles de décision de l'essai "système" de l'INRA Dijon-Époisses, puis comparaison des opérations simulées aux opérations effectivement réalisées sur le terrain et validation des résultats par l'agriculteur (en fait, le chef de cultures de l'essai),
- Test de l'efficacité de ces corps de règles de décision pour le contrôle de la flore adventice, en comparant les flores simulées par FLORSYS pour des systèmes de culture fixes ou basés sur les corps de règles de décision, et ce avec différents scénarios climatiques,

- Test de nouvelles règles de gestion adventices à partir d'indicateurs biophysiques identifiés dans des analyses de sensibilité (Colbach & Mézière, 2013), en commençant par une règle déclenchant le premier travail du sol post-récolte en fonction du cumul de pluie depuis la récolte du précédent.

Résultats. L'identification des règles de décision de systèmes de culture complexes est coûteuse en temps d'enquête, nécessitant plusieurs allers-retours avec l'agriculteur interrogé (ici le chef de cultures de l'essai "système"). De plus, la formalisation des règles de décision dans DÉCISION est compliquée et prend également beaucoup de temps. L'évaluation du corps de règles formalisé montre une prédiction satisfaisante du nombre d'interventions simulées, c'est-à-dire seules 10% des interventions ne correspondent pas à celles effectivement pratiquées sur le terrain (Prince, 2013). L'erreur est plus importante pour la date des opérations, où un tiers des opérations est décalé au-delà de ce que l'agriculteur enquêté a jugé acceptable.

Les simulations montrent le rendement potentiel est plus élevé pour les scénarios basés sur des règles de décision que pour ceux basés sur des listes d'opérations fixes (Figure 9). Par contre, la flore adventice est moins bien maîtrisée. Cependant, aussi bien le rendement réel que la biomasse adventice sont moins variables pour les scénarios avec règles de décision (coefficients de variation 0.54 et 0.44 pour rendement et biomasse, respectivement) que les scénarios fixes (1.11 et 0.79).

Ensuite, nous avons testé la règle de décision "déclencher le premier travail du sol après la récolte du colza dès que le cumul de pluie depuis la récolte dépasse x mm" dans une rotation colza/blé/orge, avec différents seuils "x" de pluie pour déclencher le travail du sol. Les simulations montrent que cette règle est effectivement efficace pour réduire la biomasse adventice en culture, mais qu'il faut plusieurs années d'application avant que son effet ne soit visible et son effet reste faible (Figure 10). Deux optimums d'interventions apparaissent: (1) travailler le sol immédiatement après la récolte, avant la première pluie, ou (2) attendre qu'il y ait plu 50 mm avant d'intervenir. Ces deux seuils pourraient refléter deux types d'adventices: (1) celles qui ne nécessitent pas de stimulation lumineuse pour leur germination, ne germent pas à la surface du sol et dont la germination n'est pas inhibée par un enfouissement (ex. gaillet), et (2) les photosensibles ayant besoin d'être exposées à la lumière à l'état imbibé avant de devenir sensible aux stimulations par le travail du sol (ex. vulpin).

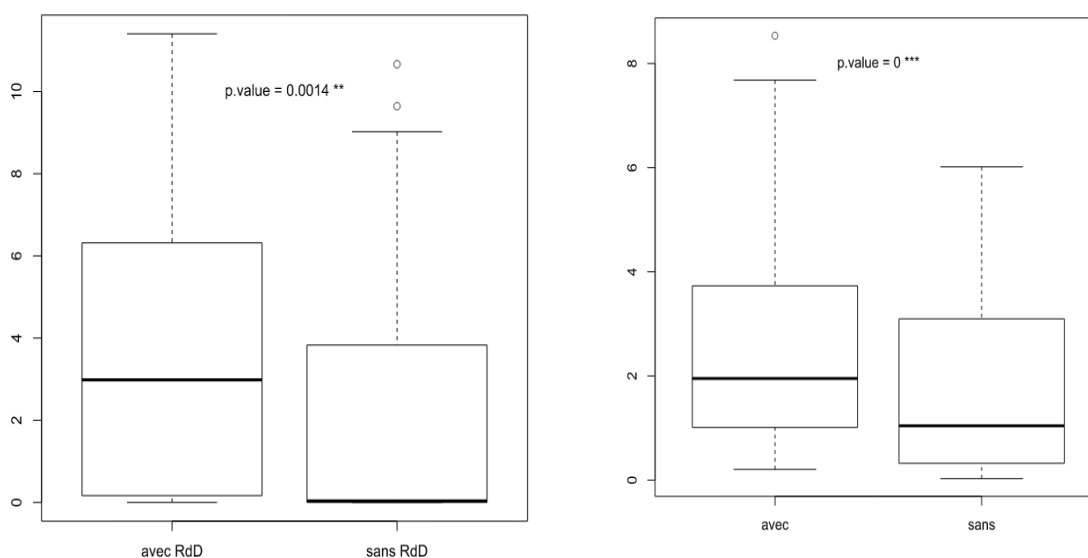


Figure 9. Rendement potentiel des cultures (T/ha, gauche) et biomasse adventice moyenne sur la saison des parcelles (T/ha, droite) pour des systèmes de culture basés sur des règles de décision ("avec") ou exécutant des listes d'opération fixes ("sans") (Prince, 2013)

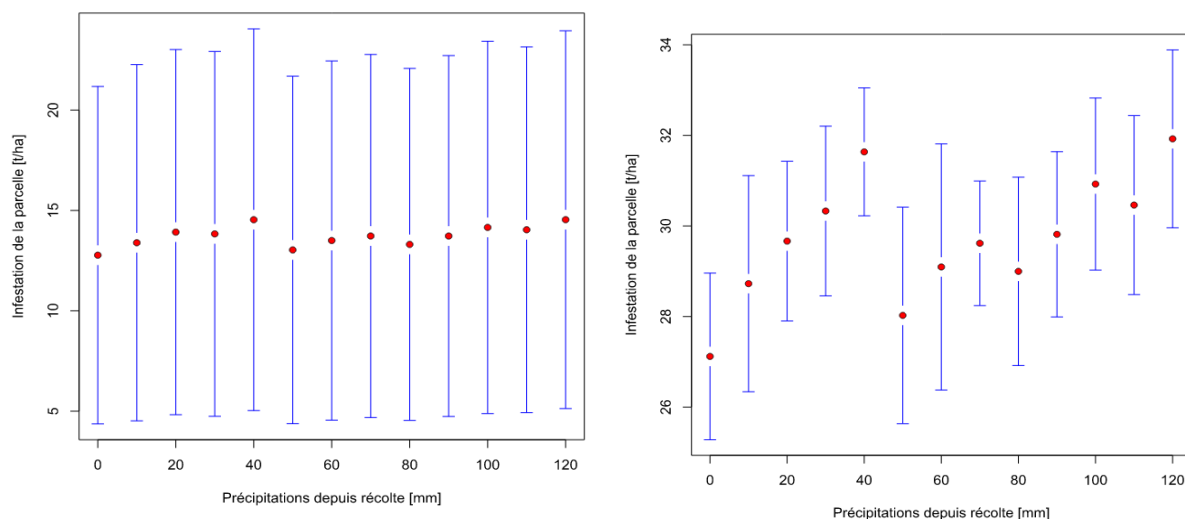


Figure 10. Test d'une règle de décision pour gérer la flore adventice. Biomasse adventice (moyenne et écart-type de 10 répétitions climatiques) en blé dans une rotation colza/blé/orge en fonction du cumul de pluie depuis la récolte du précédent colza au premier travail du sol post-récolte (Prince, 2013) À gauche, premier blé (2^{ème} année de la simulation), à droite 6^{ème} blé de la simulation (17^{ème} culture de la simulation)

Conclusion. Les règles de décision actuellement testées sur l'essai système semblent être plus efficaces pour maximiser le rendement potentiel que pour contrôler l'infestation adventice bien qu'elles produisent des résultats moins variables. Des règles de décision innovantes basées sur des indicateurs biophysiques apparaissent potentiellement intéressantes mais leur effet est encore trop faible et trop variable.

Perspectives. Les règles de décision basées sur des indicateurs biophysiques sont une piste intéressante pour améliorer les systèmes de culture mais leur étude est trop peu avancée et trop coûteuse en temps pour les prendre en compte pour la conception de systèmes de culture dans le cadre du présent projet. Si l'occasion se présente, nous allons mener des études de simulation spécifiquement focalisée sur cette question, mais dans la suite du présent projet, nous allons travailler avec des systèmes de culture "fixes".

3.3 DIAGNOSTIC DE SYSTÈMES DE CULTURE EXISTANTS

3.3.1 QUELLES PRATIQUES DES AGRICULTEURS PERMETTENT DE CONCILIER PRODUCTION AGRICOLE, BIODIVERSITÉ ET FAIBLE USAGE D'HERBICIDES?

Objectif. Évaluer une large gamme de systèmes de culture existants pour leurs performances en termes de consommation d'herbicides ainsi que nuisibilité et bénéfices de la flore adventice pour la production agricole et la biodiversité.

Matériel et méthodes

- identification de 26 systèmes de culture contrastés en Bourgogne et Poitou-Charentes, à partir d'enquêtes en exploitation agricole (Boissinot *et al.*, 2011) (Mézière *et al.*, 2015c),
- simulation avec FLORSYS sur 32 années, avec 20 répétitions climatiques,
- établissement d'une typologie de systèmes de culture en fonction de leur performance en termes de conséquences de la flore adventice, à partir d'ACP suivi d'un clustering,
- identification de stratégies de systèmes de culture permettant d'atteindre différents profils de performance, à partir d'arbres de régression.

Résultats. Nous avons pu établir des liens entre l'IFT herbicide et les autres pratiques agricoles dans les systèmes de culture enquêtés. Par exemple, l'IFT était le plus faible dans les systèmes avec plus de 0.83 désherbages mécaniques par an sur la rotation (Figure 11). Dans les systèmes sans désherbage

mécanique, l'IFT était le plus élevé dans les rotations monotones composées uniquement soit de cultures d'automne/hiver, soit de printemps/été.

Globalement, réduire l'IFT n'augmentait pas la contribution des adventices à la biodiversité bien que la richesse spécifique était légèrement meilleure dans les systèmes "bio" (Figure 12). De même, la nuisibilité ne diminuait que peu avec l'IFT. Dans tous les cas, la performance variait beaucoup pour un niveau d'IFT donné.

Parmi les profils de performance de systèmes de culture identifiés, le profil 5 est le plus intéressant car il maximise la biodiversité (beaucoup de vert dans profil) et minimise la nuisibilité (peu de bleu ou rose) due à la flore adventice (Figure 13). Une seule combinaison de techniques permet de l'atteindre, les systèmes avec peu ou pas de travail du sol. D'autres profils (ex. profil 2) peuvent être atteints via différents chemins. Des chemins multiples sont particulièrement intéressants parce qu'ils permettent aux agriculteurs de choisir la stratégie la plus adaptée aux objectifs et contraintes de leur propre exploitation agricole.

Conclusion. Il existe bien des systèmes de culture permettant de concilier production agricole et biodiversité. Ces systèmes ne sont cependant pas encore optimaux et leur nombre est faible, laissant peu de marge de manoeuvre aux agriculteurs. Aucun des systèmes testés ne permettait de concilier production, biodiversité et faible usage herbicide.

Perspectives. Le présent diagnostic a été réalisé avec un faible nombre de systèmes de culture, et il doit être complété par d'autres systèmes de culture pour rendre les conseils issus de ce travail plus robuste. Ceci est notamment le cas pour les stratégies en semis direct permettant d'atteindre le profil de performance le plus intéressant.

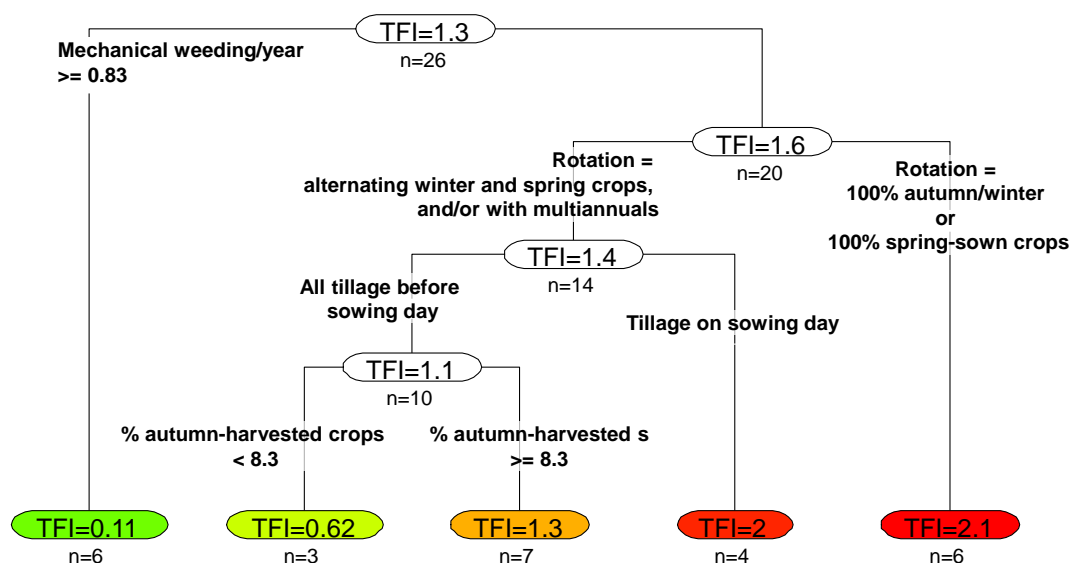


Figure 11. Variation de l'indice de fréquence de traitement herbicide (TFI) en fonction des autres techniques culturales dans les systèmes de culture enquêtés en Bourgogne et Poitou-Charentes (Mézière *et al.*, 2015a; Mézière *et al.*, 2015b)

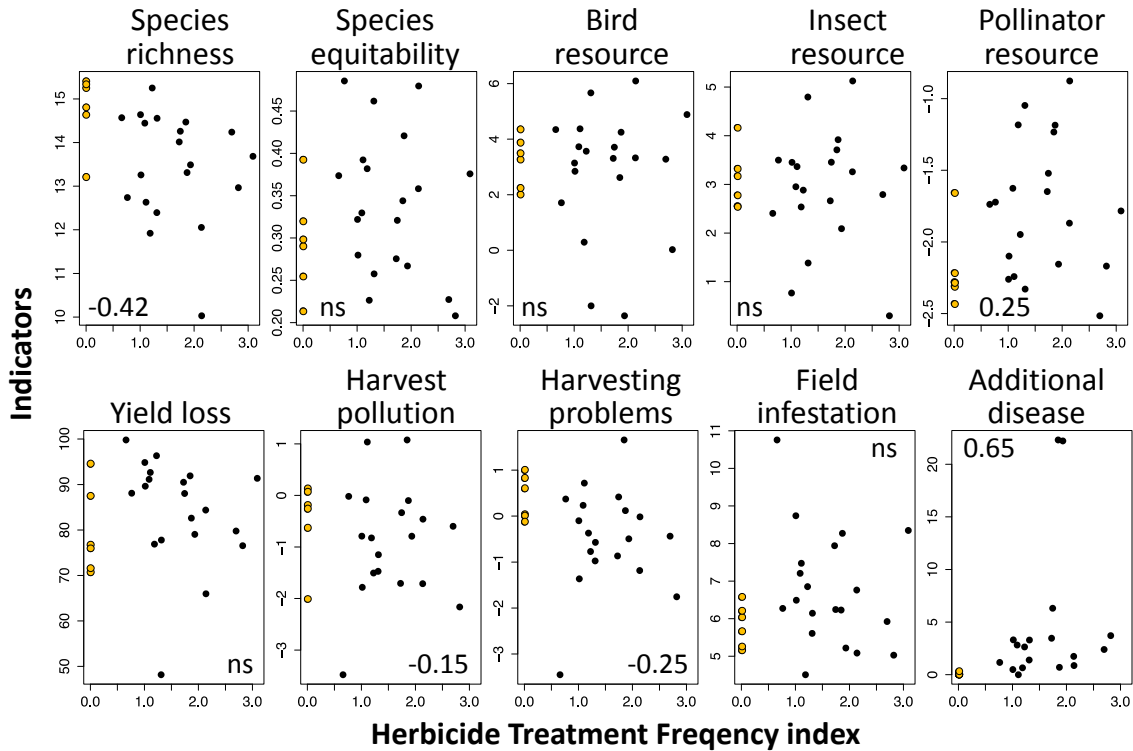


Figure 12. Variation des indicateurs de nuisibilité pour la production agricole (bas) et de contribution à la biodiversité (haut) dans les 26 systèmes de culture de Bourgogne et Poitou-Charentes simulés avec FLORSYS sur 32 années et répétées avec 20 séries climatiques (Mézière *et al.*, 2015a; Mézière *et al.*, 2015b)

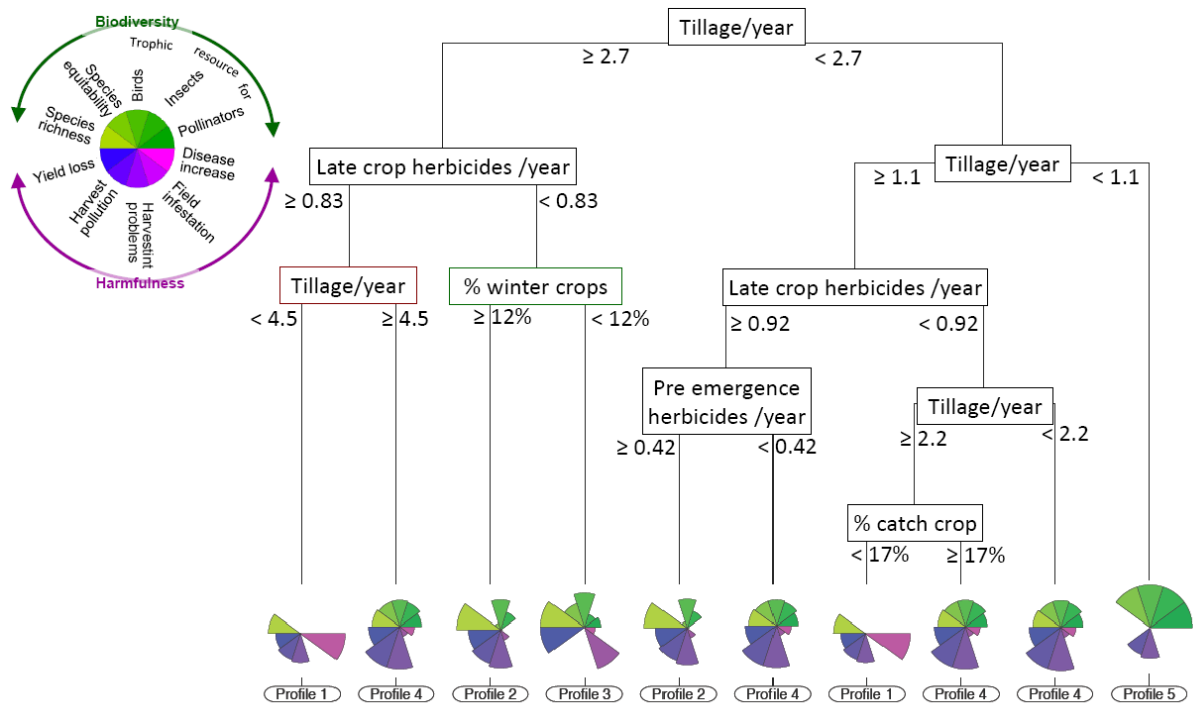


Figure 13: Typologie de systèmes de culture (obtenue par ACP suivie d'un clustering) basée sur les performances en termes de nuisibilité et de contribution à la biodiversité de flores adventices simulées avec FLORSYS. Identification de stratégies de gestion pour atteindre différents profils de performances (obtenues avec des arbres de régression à partir des coordonnées ACP) (Mézière *et al.*, 2015a; Mézière *et al.*, 2015b)

3.3.2 QUEL EST LE RISQUE D'OROBANCHE DÛ AUX ADVENTICES?

Objectif. Quantifier les effets des pratiques culturales sur le risque d'orobanche dû aux adventices, et identifier quelles espèces et traits adventices sont responsables de ce risque.

Matériel et méthodes. (1) Simulations de 255 systèmes de culture de 5 régions françaises et 1 région espagnole avec FLORSYS, sur 28 ans et 10 répétitions climatiques régionales, (2) analyse des relations entre techniques culturales et composantes de l'indicateur de risque orobanche développé au chapitre 2.4.5) avec des régressions linéaires, (3) analyse des relations entre valeur de l'indicateur de risque et densités des espèces adventices, avec des régressions linéaires, (4) analyse des relations entre valeur de l'indicateur de risque et traits d'espèces, avec des analyses RLQ et fourth-corner (Colbach *et al.*, 2016b; Colbach *et al.*, in preparation-a).

Résultats. Les simulations montraient que le risque parasite dépendait de la rotation, des dates de semis et de récolte, du travail du sol, du désherbage mécanique et des traitements herbicides (Colbach *et al.*, in preparation-a). Les adventices réduisent peu le risque orobanche et contribuent surtout à son augmentation. Toute pratique réduisant le risque adventice réduit le risque orobanche. Les adventices augmentant le plus le risque sont celles levant au début de l'été. Les résultats sont synthétisés sous forme de grille de conseil (Tableau 8).

Perspectives. Cette étude ne concerne que le risque orobanche dû aux adventices (à partir d'hypothèses grossières) et néglige l'impact direct des systèmes de culture sur le parasite orobanche. Des simulations avec le nouveau modèle PHERASYS développé au chapitre 2.2 seront nécessaires pour confirmer et compléter les présentes conclusions.

Tableau 8. Grille de conseil pour gérer le risque d'orobanche dû aux adventices (tiré de Colbach *et al.*, in preparation-a)

Cropping system component	Advice	Particularly when	Weed-mediated effect on parasite risk components	Cause (effect of weeds)
Rotation				
Host crop frequency	Reduce < 11%	Early seed bed preparation and late first tillage	Less in-host stimulation	
Species diversity	Increase, no monocultures	High host crop frequency, early seed bed preparation and late first tillage	Less reproduction	No continuously favourable crop environment for any weed functional group Increases diversity of cultural options (see below)
Crop type	Increase spring crops and avoid multi-annual crops (< 0.5)	Early seed bed preparation and few multi-mode herbicides	Less stimulation in host crops Less reproduction	Shorter crop cycle shortens weed biomass accumulation, longer fallow period allows more fatal germination
Cover crop during fallow	Length (% year) > 0.6 Frequency (% years)		Less stimulation in host crops	Reduces opportunity for tillage but smothers weeds during fallow
Sowing date				
Winter crops and non-host spring crops	Delay		More seed bank depletion and less reproduction	Shorter crop cycle shortens weed biomass accumulation, longer fallow period allows more fatal germination
Spring host crops	Do not delay		Less stimulation in host crops	Crop emerges earlier than summer weeds
Harvest date (winter crops)	Do not delay		Less reproduction	Shorter crop cycle shortens weed biomass accumulation
Tillage	As deep as possible > 8 cm	Few multi-annual crops, few multi-mode herbicides, late seed bed preparation, early roll	Less stimulation and less reproduction	More fatal germination during fallow, more seed burial that hinders emergence
First superficial operation	Delay > 36 days after previous harvest	Early seed bed preparation	More seed bank depletion and more stimulation	Seeds are imbedded before burial and thus more sensitive (less dormant) to germination-triggering by tillage
Seed bed preparation	With sowing	Multi-mode herbicides and early spraying	Less stimulation in host crops and less reproduction	Ensures clear field for crop by destroying emerged weeds and leaving no time for new weeds to emerge before crop
Rolling	Yes		More seed bank depletion and less reproduction	Improves soil contact, imbibition and germination of surface seeds
Timing	Early (> 105 days before sowing)	Few multi-annual crops, few multi-mode herbicides, late seed bed preparation		More time for fatal germination of surface seeds
Mouldboard ploughing				
Before spring crops	Only if > 7.5 months before sowing		More seed bank depletion and less reproduction	More time for fatal germination of excavated seeds and seed burial that hinders emergence
Before winter crops	None		Less stimulation in host crops and less reproduction	Avoids emergence of excavated seeds in host crops
Herbicides in crops	Multimode > 0.6 per year	Late seed bed preparation	More depletion, less stimulation and less reproduction	Targets weeds regardless of their stage
	Systemic > 2.5 per year			
First spraying	Delay		More depletion, less stimulation and less reproduction	Also sprays late-emerging weeds
Last spraying	> before harvest	Multi-mode herbicides		
Mechanical weeding	Only efficient if very early		Less reproduction	More uprooting

3.3.3 ÉVALUATION DES PRATIQUES CULTURALES PERMETTANT DE VALORISER LE POTENTIEL DE RÉTENTION DES PESTICIDES PAR LA FLORE ADVENTICE À L'ÉCHELLE DU SYSTÈME DE CULTURE

Objectif. Identifier les pratiques et combinaisons de pratiques qui maximisent le potentiel de la flore adventice pour diminuer le risque de transfert de pesticides dans l'environnement tout en limitant les aspects nuisibles de la flore adventices sur les cultures.

Matériel et méthodes. Les 10 systèmes de culture de l'essai Protection Intégrée des Cultures (PIC) du domaine expérimental INRA de Dijon-Epoisses (Chikowo *et al.*, 2009) ont été simulés avec FLORSYS sur 32 années, avec 20 répétitions climatiques. L'effet des pratiques culturales sur les valeurs des indicateurs développés dans le chapitre 2.4.6 ont été identifiés à partir d'arbres de régression (Queyrel *et al.*, in prep).

Résultats préliminaires. Les arbres de régression permettent d'identifier des combinaisons de pratiques agricoles minimisant ou maximisant le potentiel d'interception des pesticides par les adventices (Tableau 9). L'interception des herbicides par le feuillage des adventices (et donc l'efficacité potentielle des herbicides foliaires) est meilleure dans les systèmes avec labour régulier mais peu de travail du sol superficiel. L'interception des fongicides et insecticides par les racines adventices (et donc la réduction du transfert dans l'environnement) est maximale dans des systèmes avec peu ou pas de travail du sol et des rotations comprenant beaucoup de cultures de printemps ou des cultures d'hiver semées très tardivement.

Conclusion. Un plus grand nombre de systèmes de culture devra être testés pour affiner les stratégies intéressantes et tirer des conclusions plus génériques. De plus, il est nécessaire d'évaluer les systèmes de culture sur plusieurs indicateurs, à cause des antagonismes possibles entre objectifs (voir exemples dans le chapitre 2.4.1).

Tableau 9. Combinaisons de pratiques agricoles permettant de minimiser ou maximiser l'interception des pesticides par la flore adventice identifiées sur l'essai "système" de l'INRA de Dijon-Epoisses

Type d'interception	Nombre de stratégies	Stratégies pour obtenir l'interception	
		Minimale	Maximale
Herbicides			
Par le feuillage	3	≥ 3.6 travaux du sol superficiels par an	< 3.6 travaux du sol superficiels par an et fréquence de labour ≥ 1 an sur 2
Par les racines	4	Récolte avant 5 août et ≥ 111 jours entre la récolte et le premier roulage (ou pas de roulage)	Récolte après 5 août et semis après 19 décembre
Autres pesticides			
Par le feuillage	2	Durée de couverture des cultures (y compris temporaires et cipan) < 9 mois	Durée de couverture des cultures (y compris temporaires et cipan) ≥ 9 mois
Par les racines	4	≥ 1.9 travaux du sol entre mars et octobre et fréquence de labour < 1 an sur 2	< 1.9 travaux du sol entre mars et octobre et semis après 22 novembre

3.4 MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE SYSTÈMES DE CULTURE

3.4.1 INTRODUCTION

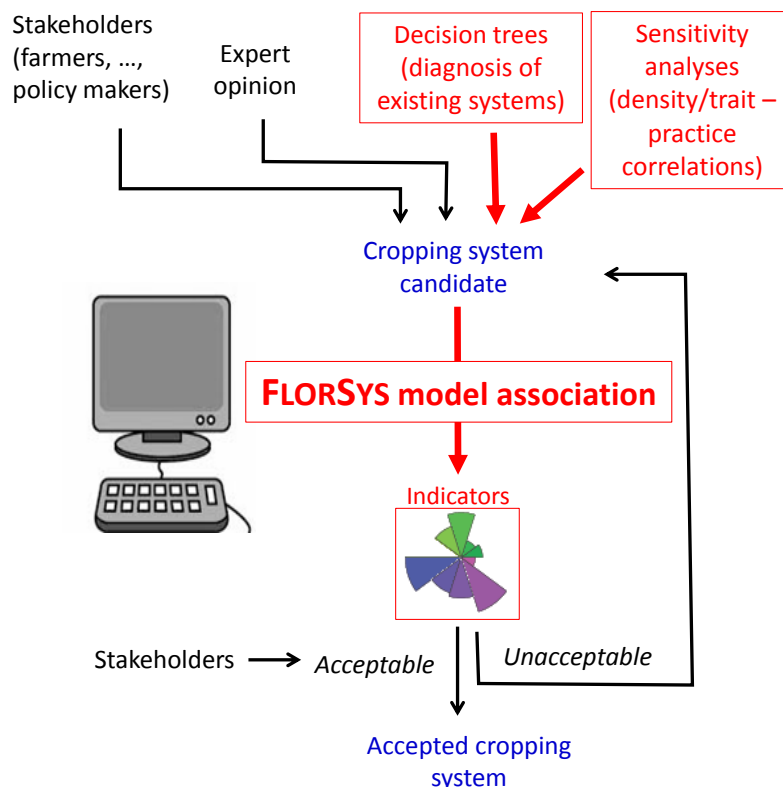
Objectif et méthode. Faire l'inventaire des différentes approches de simulation utilisées jusqu'à présent avec les modèles "flore adventice = f(système de culture, pédoclimat)" et en tirer une proposition d'approche pour la suite du projet.

Résultats. Comme la plupart des modèles de cultures ou systèmes de culture, FLORSYS est trop complexe pour directement concevoir ou optimiser des systèmes de culture en fonction d'un ensemble d'objectifs et de contraintes. Nous proposons d'adapter la boucle classique "génération, simulation, évaluation, comparaison et choix de systèmes" (Bergez et al., 2010) pour l'adapter à notre cas (Figure 14):

1. Des systèmes de culture candidats sont proposés par des acteurs (allant des agriculteurs jusqu'aux décideurs publics), experts et, surtout, les résultats d'études de simulation existantes, notamment le diagnostic de systèmes existants (section 3.3) et des analyses de sensibilités étudiant les corrélations entre pratiques agricoles et densités (Colbach *et al.*, 2013) ou traits d'espèces adventices (Colbach *et al.*, 2014d).
2. Les systèmes candidats sont simulés avec l'association de modèles FLORSYS, TAKEALLSYS, PHERASYS et indicateurs pour prédire la performance des systèmes de culture en termes de nuisibilité et bénéfices de la flore adventice.
3. Les systèmes seront jugés par les acteurs pour discriminer les solutions acceptables des systèmes qui doivent encore être améliorés et donc retourner dans la boucle de génération.
4. Les systèmes acceptables sont destinés à être diffusés vers la profession.

Conclusion. De nombreuses méthodes sont disponibles pour les différentes étapes de cette boucle itérative (Bergez et al., 2010). Dans le présent projet, nous proposons de démarrer la boucle avec un petit nombre de situations candidates et de limiter les participants aux experts scientifiques pour tester la méthode. Dans le futur, il sera nécessaire d'impliquer la profession agricole dès la première étape pour s'assurer que les innovations proposées seront faisables et adoptées par les agriculteurs (Hossard et al., 2013), ce qui n'est pas souvent le cas (Vanloqueren & Baret, 2008).

Figure 14. Méthode de conception de systèmes de culture à l'aide de l'association de modèles FLORSYS & CO, à partir de résultats d'études de simulation antérieures (basé sur Colbach et al., 2014a)



3.4.2 CONCEPTION DE SYSTÈMES DE CULTURE À PARTIR DE DIAGNOSTIC DE SYSTÈMES EXISTANTS

Objectif. (1) adapter la méthode générale du chapitre 3.4.1 au cas particulier de la gestion multiobjective de la flore adventice, (2) démontrer le concept dans le cas particulier de la conciliation du faible usage d'herbicides, contrôle de la nuisibilité directe et indirecte des adventices, et promotion de la biodiversité.

Méthodes et résultats (Colbach et al., in preparation-b).

- (1) parmi les indicateurs développés au chapitre 2.4, un petit nombre sont choisis pour représenter les différentes facettes des adventices: nuisibilité directe (perte de rendement), indirecte (risque d'orobanche) et sociologique (salissement du champ), biodiversité (offre trophique pour abeilles) et niveau d'usages d'intrants (IFT herbicide).
- (2) pour chacun des 2550 scénarios simulés au chapitre 3.3.2, une note globale multicritère est établie, correspondant à la pire note individuelle des différents indicateurs,
- (3) des arbres de décision sont établis, identifiant les combinaisons de pratiques culturales permettant d'atteindre différents scores, en termes de probabilité de succès et risque d'échec (Figure 15),
- (4) un système de culture est modifié pas à pas, en y introduisant les modifications intéressantes identifiées dans ces arbres, en mettant l'accent sur la réduction du risque d'échec plutôt que sur l'augmentation de la probabilité de réaliser le meilleur score. Dans l'exemple de la Figure 15, le système existant a un risque de 90% d'échec (note E) et une probabilité de 5% d'une performance D ou mieux. Plusieurs modifications sont testées avec FLORSYS, permettant d'améliorer la performance du système, dont certaines permettant de réduire le risque d'échec de 90% à moins de 40% (Tableau 10).

Conclusion. La méthode développée ici permet d'améliorer considérablement la performance de systèmes de culture existant. Lorsque les objectifs à concilier sont peu nombreux ou peu antagonistes, un grand nombre de systèmes existants ou nouvellement conçus permet d'atteindre des bonnes performances, avec un faible risque d'échec (voir détails dans Colbach *et al.*, in preparation-b). Si l'objectif est de concilier de nombreux objectifs antagonistes, aucun système existant et aucune des modifications identifiées grâce aux arbres de décision ne donnait des performances optimales. D'autres méthodes de conception (randomisées, optimisation automatiques, experts) doivent être testées dans l'avenir.

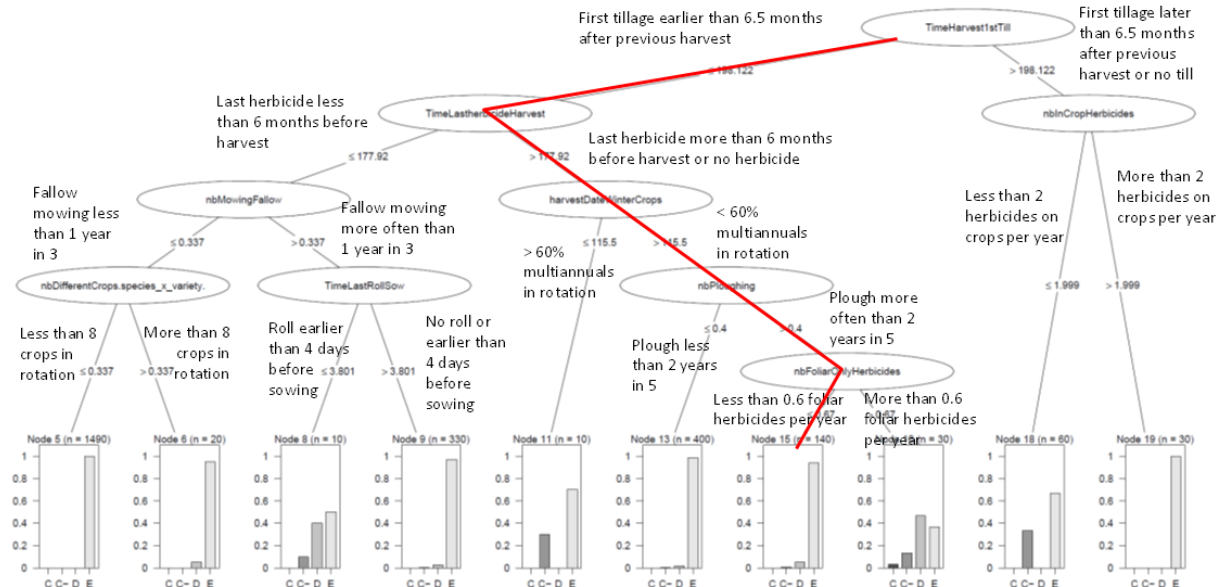


Figure 15. Arbre de décision pour identifier des règles pour concilier faible usage d'herbicide, contrôle de la nuisibilité (perte de rendement, salissement du champ, risque parasite) et de la biodiversité (offre trophique pour abeilles) dépendant de la flore adventice. Le chemin en rouge montre le système de culture à améliorer. Les indicateurs sont notés A, B, C, D et E correspondant à < 5%, 5-10%, 10-20%, 20-30% et > 30% de la valeur maximale pour les indicateurs de nuisibilité, à > 75%, 70-75%, 60-70%, 50-60% et < 50% pour la biodiversité. Une note globale C implique que tous les indicateurs soient C ou mieux, C- que la perte de rendement soit C ou mieux et les autres indicateurs D ou mieux etc. (Colbach *et al.*, in preparation-b)

Tableau 10. Performance multicritère simulée par FLORSYS pour un système de référence existant (R) et des systèmes alternatifs (A) afin de concilier contrôle de la nuisibilité des adventices, réduction d'usage d'herbicides et promotion de l'offre trophique pour abeilles (Colbach *et al.*, in preparation-b)

	Necessary change according to decision tree	Modifications	Multi-criteria performance score							
			A	A-	B	B-	C	C-	D	E
R		Reference [§]	0	0	0	0	0	0	0.1	0.9
R'		Replaced withdrawn herbicides with authorized herbicides	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7
A1	More than 0.6 foliar-only herbicides per year	Replaced pseudo-root in barley by spring foliar herbicide	0	0	0	0	0.1	0	0.2	0.7
A1'		Replaced root+pseudo-root in barley by spring foliar herbicide	0	0	0	0	0	0.3	0.4	0.3
A2	Fallow mowing more often than 1 year in 3	Fallow mowing before cereals								
	Rolling less than 3 days before cash crop sowing	Rolling on sowing day	0	0	0	0	0	0.0	0.2	0.8
A3	No till or after 6.5 months	Requires spring crops → added sunflower and wheat to rotation	0	0	0	0	0	0.1	0	0.9
O	Combine best options	A1' and A2	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.4

[§] rotation colza/blé/orge bourguignonne (labour 1 an sur 3, avec 2 herbicides foliaires, 2 pseudo-racinaires, 1 racinaire et 1 multi-mode sur la rotation)

3.4.3 UTILISATION DE FLORSYS EN ATELIER AVEC LES AGRICULTEURS

L'expérience passée a montré que les innovations dont les performances ont été démontrées ne sont pas pour autant adoptées par les agriculteurs (Meynard *et al.*, 2013). La détection des freins techniques ou socio-économiques et leur intégration dans le processus de conception est un enjeu important. L'implication des agriculteurs dans le travail de conception est donc indispensable. Nous avons donc 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 bénéfiques de la flore adventice.

3.4.3.1 Picardie

Les conseillers de bureau de conseil et d'une agence de l'eau ont été formés à l'utilisation de FLORSYS puis ont organisé des sessions d'évaluation et de tests de systèmes de culture avec un groupe d'agriculteurs, sur deux journées, en présence de membres de l'équipe FLORSYS. Lors de la première journée, les systèmes de culture existants chez un agriculteur et prospectifs proposés par les participants ont été établis. Ensuite, les conseillers ont simulé ces systèmes avec FLORSYS. Les résultats ont été restitués aux agriculteurs lors de la deuxième journée. Les alternatives testées incluaient des changements de dates de semis, l'introduction de désherbage mécanique, de luzernes et cultures temporaires, ou l'abandon du travail du sol avant certaines cultures.

Il en est ressorti, entre autres, que les agriculteurs étaient souvent prêts à aller plus loin dans les changements de pratiques que ne proposaient les conseillers (ex. tester des techniques et combinaisons de techniques non chimiques plutôt que des alternatives chimiques) et qu'ils avaient une bonne maîtrise des points clé 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).

3.4.3.2 Bourgogne

Une première intervention a été faite auprès du GRCEA de l'Aube en juin 2016, avec une présentation du principe des ateliers de conception de systèmes de culture et du modèle FLORSYS. Cette première prise de contact a notamment permis d'identifier les points forts du modèle aux yeux des agriculteurs (ex. prise en compte des résistances, des interactions entre techniques, de la diversité de réponse des espèces adventices) et les questions qu'ils se posent sur l'utilisation (ex. comment décrire l'état initial de la flore, comment simuler les contraintes du cadre réglementaire, comment intégrer le contexte socio-économique).

3.4.4 COMMENT CONTINUER?

Ce premier travail de simulation visant à évaluer et concevoir des systèmes de culture a déjà identifié des règles et solutions pour améliorer la gestion des adventices. Cependant, face à la multiplicité des situations et objectifs, il n'y a pas de solution unique. Il faut donc continuer à explorer un grand nombre de systèmes de culture, en fonction des contextes socio-économiques et objectifs en termes de gestion de flore adventice. Outre les ateliers de conception de systèmes de culture que nous allons continuer dans le cadre du projet ANR CoSAC (www.projet-cosac.fr), il y a les méthodes d'optimisations sous contraintes (ex. méthodes mathématique de type minimisation numérique avec relaxation quadratique, Shimazu *et al.*, 1993).

L'interaction avec les agriculteurs a montré une autre piste. Certes, un certain nombre d'agriculteurs sont intéressés directement par le modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS. Mais son utilisation directe en atelier de conception n'est pas possible et le développement d'un outil d'aide à la conception plus simple et plus rapide sera utile.

4 Conclusion et perspectives

Dans le présent travail, nous avons pu étendre le modèle "parcelle virtuelle" existant FLORSYS, pour y intégrer (1) les interactions entre adventices et d'autres bioagresseurs pouvant être propagés par une flore adventice résiduelle tolérée en protection intégrée, (2) la résistance aux herbicides, de plus en probable avec la réduction du nombre de matières actives et de doses herbicides utilisées, (3) des indicateurs évaluant l'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement, et (4) la dispersion des adventices dans les paysages pour identifier l'échelle de

conciliation des objectifs multiples (ex. champ vs. paysage). Ensuite, nous avons développé des méthodologies puis utilisé ce nouveau modèle pour (1) évaluer une large gamme de systèmes de culture provenant de différentes régions, puis pour (2) concevoir et tester des systèmes de culture alternatifs en fonction de différentes combinaisons d'objectifs en termes d'impact de la flore adventice. Nous avons pu identifier 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 ont été identifiées.

Par conséquent, le travail entamé dans le présent projet continue actuellement, notamment dans le cadre de l'ANR CoSAC (www.projet-cosac.fr), suivant plusieurs axes:

- L'amélioration du complexe de modèles FLORSYS, pour terminer les travaux débutés ici (ex architecture racinaire, dynamique du parasite orobanche, résistance aux herbicides, dispersion des semences adventices, indicateurs d'impact de la flore adventice) et intégrer des techniques culturales innovantes (ex. cultures de couverture, traitements herbicides localisés, semis direct),
- Le développement d'outils d'aide à l'évaluation et la conception de systèmes de culture à partir et en complément du modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS. Ce dernier a l'avantage de représenter les processus biophysiques en détail et prédire l'impact des techniques culturales en moyenne mais aussi toute la variabilité due aux interactions entre techniques et aux conditions pédoclimatiques. Les nouveaux outils devront être plus simples d'utilisation et plus rapides d'exécution pour les utiliser en direct dans des ateliers de conception de systèmes de culture et en tant qu'outil pédagogique dans des formations d'agriculteurs.
- L'intégration 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. Cette intégration est nécessaire pour identifier les freins à l'adoption d'innovations dans la pratique agricole et améliorer le transfert des outils et solutions proposées par la recherche.
- L'évaluation d'un plus grand nombre de systèmes de culture existants, notamment dans le réseau DEPHY, afin de traquer et évaluer les innovations déjà pratiquées par les agriculteurs.

Nous prévoyons aussi de développer d'autres méthodes d'utilisation de modèles comme FLORSYS, pour balayer un plus grand ensemble de systèmes de culture alternatifs, à partir de méthodes d'optimisation numériques.

5 Références

- Abiven F. (2013) Analyse de la diversité des architectures racinaires entre espèces adventices. *Rapport de fin d'étude d'école d'ingénieurs ISA, Lille, France.* p.
- Aubry C., Papy F. & Capillon A. (1998) Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56, 45-65.
- Benharrat H., Boulet C., Theodet C. & Thaluarn P. (2005) Virulence diversity among branched broomrape (*Orobanche ramosa* L.) populations in France. *Agronomy for Sustainable Development* 25, 123-128.
- Bergerot B., Fontaine B., Renard M., Cadi A. & Julliard R. (2010) Preferences for exotic flowers do not promote urban life in butterflies. *Landscape and Urban Planning* 96, 98-107.
- Bergez J. E., Colbach N., Crespo O., Garcia F., Jeuffroy M. H., Justes E., Loyce C., Munier-Jolain N. & Sadok W. (2010) Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32, 3-9.
- Bockstaller C. & Girardin P. (2003) How to validate environmental indicators. *Agricultural Systems* 76, 639-653, 10.1016/s0308-521x(02)00053-7.
- Bockstaller C., Ricou C., Schneller C., Gaba S., Chauvel B., Amiaud B. & Plantureux S. (2012) Assessing the pollination value of field margin flora by means of a predictive indicator. *In: 12th ESA Congress, Helsinki, Finland*
- Boissinot F., Mézière D., Bretagnolle V. & Munier-Jolain N. M. (2011) Réduire l'usage des herbicides en grandes cultures. *Phytoma* 649, 39-44.
- Bouvier A., Adamczyk K., Kiêu K. & Monod H. (2009) Computation of integrated flow of particles between polygons. *Environmental Modelling and Software* 24, 843-849.

- Brault M., Betsou F., Jeune B., Tuquet C. & Sallé G. (2007) Variability of *Orobanche ramosa* populations in France as revealed by cross infestations and molecular markers. *Environmental and Experimental Botany* 61, 272-280, 10.1016/j.envexpbot.2007.06.009.
- Briggs G. G., Bromilow R. H. & Evans. A. A. (1982) Relationships between lipophilicity and root uptake and translocation of non-ionised chemicals by barley. *Pesticide Science* 13, 495–504, 10.1002/ps.2780130506.
- Carvalho L., Veldtman R., Shenkute G., Tesfay G., Walter C., Pirk W., Donaldson J. & Nicolson S. (2011) Natural and within-farmland biodiversity enhances crop productivity. *Ecology Letters* 14, 251-259
- Cernay C. (2013) Caractérisation expérimentale de la variabilité phénotypique du système racinaire nodulé de génotypes contrastés de pois (*Pisum sativum* L.). *Mémoire M2 AgroParis-Tech « de l'Agronomie à l'Agroécologie » & fin d'études d'Ingénieur en agriculture de l'ESA*. 22 p.
- Chikowo R., Faloya V., Petit S. & Munier-Jolain N. (2009) Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long term weed control. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 132, 237-242.
- 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. *In: 17th European Weed Research Society Symposium: "Weed management in changing environments", Montpellier, France*
- Colbach N., Duby C., Cavelier A. & Meynard J. M. (1997) Influence of cropping systems on foot and root diseases of winter wheat: fitting of a statistical model. *European Journal of Agronomy* 6, 61-77.
- Colbach N., Busset H., Yamada O., Dürr C. & Caneill J. (2006) ALOMYSYS: modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate. II. Evaluation. *European Journal of Agronomy* 24, 113-128.
- Colbach N., Granger S. & Mézière D. (2013) Using a sensitivity analysis of a weed dynamics model to develop sustainable cropping systems. II. Long-term effect of past crops and management techniques on weed infestation. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 151, 247-267, doi:10.1017/S0021859612000160.
- Colbach N. & Mézière D. (2013) Using a sensitivity analysis of a weed dynamics model to develop sustainable cropping systems. I Annual interactions between crop management techniques and biophysical field state variables. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 151, 229-245, doi:10.1017/S0021859612000159.
- Colbach N. (2014) The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. *In: Workshop on Weed control with less reliance herbicides. Designing resilient cropping systems, ESA, Angers, France*
- 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, 10.1111/wre.12112.
- Colbach N., Busset H., Roger-Estrade J. & Caneill J. (2014b) Predictive modelling of weed seed movement in response to superficial tillage tools. *Soil & Tillage Research* 138, 1-8.
- Colbach N., Collard A., Guyot S. H. M., Mézière D. & Munier-Jolain N. M. (2014c) Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *European Journal of Agronomy* 53, 74-89, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.019>.
- Colbach N., Granger S., Guyot S. H. M. & Mézière D. (2014d) 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.013>.
- Colbach N., Chauvel B., Darmency H., Délye C. & Le Corre V. (2016a) 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*, in press.
- Colbach N., Colas F., Moreau D., Gibot-Leclerc S., Pointurier O., Queyrel W. & Bockstaller C. (2016b) Ex ante evaluation of weed-mediated pests and environmental benefits of cropping systems with simulation-based indicators. *In: 14th congress of the European Society for Agronomy, , , Edinburgh, Scotland*
- Colbach N., Granger S., Ricci B. & Messéan A. (2016c) Landsharing vs. landsparing: how to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. *In: 14th ESA Congress, Edinburgh, Scotland*
- Colbach N., Bockstaller C., Colas F., Gibot-Leclerc S., Moreau D., Pointurier O. & Villerd J. (in preparation-a) Assessing weed-mediated broomrape risk in cropping systems with a simulation-based indicator. *Ecological Indicators*.
- Colbach N., Colas F., Pointurier O., Queyrel W. & Villerd J. (in preparation-b) Proposing a methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. *European Journal of Agronomy*.
- Colbach N., Cordeau S., Garrido A., Granger S., Laughlin D., Ricci B., Thomson F. & Messéan A. (in preparation-c) Landsharing vs landsparing: how to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.

- Colbach N., Bertrand M., Busset H., Dugué F., Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N. M., Noilhan C., Strbik F. & Gardarin A. (in revision) Evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. *Environmental Modelling & Software*.
- Colbach N., Darmency H., Fernier A., Granger S., Le Corre V. & Messéan A. (submitted-a) Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. II. Effect on weed harmfulness and benefits. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Colbach N., Fernier A., Le Corre V., Messéan A. & Darmency H. (submitted-b) Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. I. Effect on weeds. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Ellenberg H. (1974) *Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas* Göttingen, Germany
- Ennaïfar S., Makowski D., Meynard J. M. & Lucas P. (2007) Evaluation of models to predict take-all incidence in winter wheat as a function of cropping practices, soil, and climate. *European Journal of Plant Pathology* 118, 127-143.
- Evans D. M., Pockock M. J. O., Brooks J. & Memmott J. (2011) Seeds in farmland food-webs: Resource importance, distribution and the impacts of farm management. *Biological Conservation* 144, 2941-2950, 10.1016/j.biocon.2011.08.013.
- Fernier A. (2014) Évaluation du risque d'apparition de résistances aux herbicides dans les systèmes de culture à base de glyphosate. *Rapport de stage Master 1, Rapport de stage Master 1, AgroParisTech, Paris, France*. 25 p.
- 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. (2008) Modélisation des effets des systèmes de culture sur la levée des adventices à partir de relations fonctionnelles utilisant les traits des espèces. *PhD Thesis, Université de Bourgogne, Dijon, France*. 280 p.
- 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.
- 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004>.
- Garrido A. (2014) Impact des changements de pratiques agricoles sur la biodiversité dépendant de la flore adventice dans les paysages agricoles. *Rapport de stage M1, ESA, Angers, France*. p.
- Gibot-Leclerc S., Brault M., Pinochet X. & Sallé G. (2003) Rôle potentiel des plantes adventices du colza d'hiver dans l'extension de l'orobanche rameuse en Poitou-Charentes. *Comptes Rendus de Biologie* 326, 645-658.
- Gibot-Leclerc S., Pinochet X. & Sallé G. (2006a) Orobanche rameuse (*Orobanche ramosa* L.) du colza : un risque émergent sous surveillance. *OCL* 13, 200-205.
- Gibot-Leclerc S., Pinochet X. & Sallé G. (2006b) Orobanche rameuse (*Orobanche ramosa* L.) du colza : un risque émergent sous surveillance. *OCL* 13, 200-205, doi: 10.1684/ocl.2006.0015.
- Gibot-Leclerc S., Charles J. & Dessaint F. (2009) Sensibilité d'hôtes potentiels vis-à-vis de deux pathovars d'*Orobanche ramosa* L. In: XIIIème Colloque International sur la Biologie des Mauvaises Herbes, Dijon, France, 446-456
- Gibot-Leclerc S., Abdennebi-Abdemessed N., Reibel C. & Colbach N. (2013) Non-host facilitators, a new category that unexpectedly favors parasitic weeds. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 787-793, doi: 10.1007/s13593-013-0153-x.
- Girardin A. (2014) Étude des relations trophiques entre plantes hôte et parasite: cas de l'orobanche rameuse. *Rapport de fin d'étude d'école d'ingénieurs LaSalle, Beauvais, France*. p.
- 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.
- 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, 10.1016/j.envsoft.2013.05.014.
- Juraske R., Castells F., Vijay A., Muñoz P. & Antón A. (2009) Uptake and persistence of pesticides in plants: measurements and model estimates for imidacloprid after foliar and soil application. *Journal of Hazardous Materials* 165, 683-689, 10.1016/j.jhazmat.2008.10.043.
- Kim D. S., Marshall E. J. P., Brain P. & Caseley J. C. (2011) Effects of crop canopy structure on herbicide deposition and performance. *Weed Research*, in press.
- Landolt E. (1977) Ökologischer Zeigerwerte zur Schweizer Flora. In: Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Stiftung Rubel:208

- Lefèbvre M. (2015) Caractérisation de l'architecture racinaire de géotypes contrastés de pois à l'aide d'un modèle écophysologique. *Mémoire M2 BOP*, Université de Bourgogne. 30 p.
- Liebman M. & Gallandt E. R. (1997) 9 - Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions. In: Ecology in Agriculture (L. E. Jackson, ed.) Academic Press:291-343
- Linders J., Mensink H., Stephenson G., Wauchope D. & Racke K. (2000) IUPAC Technical Report on Pesticides. *Pure Appl Chem* 72, 2199–2218.
- 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.
- McCall P. J., Swann R. L., Laskowski D. A., Unger S. M., Vrona S. A. & Dishburger H. J. (1980) Estimation of chemical mobility in soil from liquid chromatographic retention times. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 24, 190–195, 10.1007/BF01608096.
- 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 77, 193-202.
- Meyer B. (2014) Développement d'un indicateur de valeur de la flore adventice pour les lépidoptères. *Mémoire M2, Université Haute-Alsace, Colmar, France*. 81 p.
- Meynard J.-M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.-B. & Savini I. (2013) Freins et leviers à la diversification des cultures : étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. *OCL - Oléagineux Corps Gras Lipides* 20, 4-10, <http://dx.doi.org/10.1051/ocl/2013007>.
- 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. *European Journal of Agronomy* 47, 33-43, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.01.007>.
- Mézière D., Colbach N., Dessaint F. & Granger S. (2015a) Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators. *European Journal of Agronomy* 68, 22-37, dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.004.
- Mézière D., Granger S. & Colbach N. (2015b) Does reduced herbicide use affect biodiversity and crop production? In: 17th European Weed Research Society Symposium, "Weed management in changing environments", Montpellier, France, 230
- Mézière D., Petit S., Granger S., Biju-Duval L. & Colbach N. (2015c) 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.028>.
- Moreau D., Milard G. & Munier-Jolain N. (2013) A plant nitrophily index based on plant leaf area response to soil nitrogen availability. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 809-815, 10.1007/s13593-013-0145-x.
- 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, 10.3389/fpls.2016.01033.
- Moreau D., Gibot-Leclerc S., Girardin A., Pointurier O., Reibel C., Strbik F., Fernández-Aparicio M. & Colbach N. (accepted) 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*
- Moreau D., Abiven F., Busset H., Matejicek A. & Pagès L. (submitted) Plant root architecture parameters are more affected by interspecific differences than by soil-nitrogen availability in a range of weed and crop species. *Annals of Applied Biology*.
- 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.023>.
- Munier-Jolain N. M., Collard A., Busset H., Guyot S. H. M. & Colbach N. (2014) Modelling the morphological plasticity of weeds in multi-specific canopies. *Field Crops Research* 155, 90-98, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.018>.
- Oerke E. C., Dehne H. W., Schonbeack F. & Weber A. (1994) Crop production and crop protection. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, 808 p.
- Pagès L., Bécel C., Boukcim H., Moreau D., Nguyen C., Sterckeman T. & Voisin A.-S. (2014) Calibration and evaluation of ArchiSimple, a parsimonious model of the root system architecture. *Ecological Modeling*, in press.
- 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
- Pointurier O. (2015) Modélisation des effets des systèmes de culture sur la dynamique de la plante parasite orobanche rameuse en interaction avec la flore adventice. *Rapport de fin d'étude d'ingénieur agronome, SupAgro Montpellier, Montpellier*. 64 p.

- Pointurier O., Gibot-Leclerc S., Moreau D. & Colbach N. (2016) Modelling cropping system effects on branched broomrape dynamics in interaction with weeds. In: AFPP, editor. AFPP – 23e conférence du Columa. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France, in press
- Prince A. (2013) Conception et utilisation d'un module de règles de décision pour la gestion durable d'une flore adventice plurispécifique. Intégration au modèle prédictif FLORSYS. *Rapport de stage, 4ème année d'école ingénieur, ESA, Angers, France.* p.
- Queyrel W. & Colbach N. (in preparation) Pesticide retention by weeds: evaluation of cropping systems with a new indicator of weed impact.
- Reau R., Meynard J. M., Robert D. & Gitton C. (1996) Des essais factoriels aux essais "conduite de culture". In: Expérimenter sur les conduites de cultures: un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation DERF-ACTA, Paris:52-62
- Ricou C. (2014) Conception d'un indicateur prédictif évaluant les effets des pratiques agricoles sur la diversité floristique et ses services en grandes cultures à l'échelle de la bordure de champ. *PhD Thesis, Université de Lorraine.* 205 p.
- Schoeny A., Jeuffroy M. H. & Lucas P. (2001) Influence of take-all epidemics on yield formation of winter wheat. *Phytopathology* 91, 694-701.
- Shimazu Y., Fukushima M. & Ibaraki T. (1993) A successive over-relaxation method for quadratic programming problems with interval constraints. *Journal of the Operations Research Society of Japan* 36, 73–89.
- Swinton S. M., Buhler D. D., Forcella F., Gunsolus J. L. & King R. P. (1994) Estimation of crop yield loss due to interference by multiple weed species. *Weed Science* 42, 103-109.
- Thompson K., Ceriani R. M., Bakker J. P. & Bekker R. M. (2003) Are seed dormancy and persistence in soil related? *Seed Science Research* 13, 97-100.
- Thomson F. J., Moles A. T., Auld T. D. & Kingsford R. T. (2011) Seed dispersal distance is more strongly correlated with plant height than with seed mass. *Journal of Ecology* 99, 1299-1307, 10.1111/j.1365-2745.2011.01867.x.
- Trichard A., Alignier A., Biju-Duval L. & Petit S. (2013) The relative effects of local management and landscape context on weed seed predation and carabid functional groups. *Basic and Applied Ecology* 14, 235-245.
- Vanloqueren G. & Baret P. V. (2008) Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural "lock-in" case study. *Ecological Economics* 66, 436-446.
- Verzat V. (2014) Modélisation de la répartition des assimilats au sein du système racinaire chez le pois de printemps (*Pisum sativum*) *Mémoire M2 AgroParisTech « de l'Agronomie à l'Agroécologie »* 21 p.
- Voisin A. S. & Pagès L. (2010) "PEA NOD": modelling the symbiotic association of a legume plant and an N2 fixing bacteria using developmental and assimilate partitioning rules. In: *Proceedings of 6th international workshop on Functional Structural Plant Models. Davies, USA, 12-17 September,*
- Wilson J. D., Morris A. J., Arroyo B. E., Clark S. C. & Bradbury R. B. (1999) A review of the abundance and diversity of invertebrate and plant foods of granivorous birds in northern Europe in relation to agricultural change. *Agriculture Ecosystems & Environment* 75, 13-30.

6 Annexe : textes des publications

Les textes des publications se trouvent dans les fichiers zip joints. Seules les publications contenues dans le fichier "diffusables" peuvent être mises en ligne et transmises à des tiers. Celles marquées "confidentielles" ne doivent pas être transmises à des tiers. Les autres publications sont parues mais nous ne détenons pas le copyright nous permettant de les mettre en ligne.

6.1.1 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES OU SOUS PRESSE

- 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 Research* 54, 541–555, 10.1111/wre.12112.
- Colbach N., Chauvel B., Darmency H., Délye C. & Le Corre V. (2016) 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*, in press.
- Mézière D., Colbach N., Dessaint F. & Granger S. (2015) Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators. *European Journal of Agronomy* 68, 22-37, dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.004.

- 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. *European Journal of Agronomy* 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.028>.
- 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, 10.3389/fpls.2016.01033.

6.1.2 PUBLICATIONS SOUMISES OU EN COURS DE SOUMISSION

- Colbach N., Bockstaller C., Colas F., Gibot-Leclerc S., Moreau D., Pointurier O. & Villerd J. (in preparation) Assessing weed-mediated broomrape risk in cropping systems with a simulation-based indicator. *Ecological Indicators*.
- Colbach N., Colas F., Pointurier O., Queyrel W. & Villerd J. (in preparation) Proposing a methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. *European Journal of Agronomy*.
- Colbach N., Cordeau S., Garrido A., Granger S., Laughlin D., Ricci B., Thomson F. & Messéan A. (in preparation) Landsharing vs landsparing: how to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Colbach N., Darmency H., Fernier A., Granger S., Le Corre V. & Messéan A. (submitted) Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. II. Effect on weed harmfulness and benefits. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Colbach N., Fernier A., Le Corre V., Messéan A. & Darmency H. (submitted) Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. I. Effect on weeds. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Moreau D., Abiven F., Busset H., Matejicek A. & Pagès L. (submitted) Plant root architecture parameters are more affected by interspecific differences than by soil-nitrogen availability in a range of weed and crop species. *Annals of Applied Biology*.

6.1.3 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PRÉVUES

- Pointurier, O., Gibot-Leclerc, S., Moreau, D. & Colbach, N. Modelling cropping system effects on branched broomrape dynamics in interaction with weeds.
- Queyrel W. & Colbach N. Pesticide retention by weeds: evaluation of cropping systems with a new indicator of weed impact.

6.1.4 COLLOQUES

- Colas F., Cordeau S., Jeuffroy M.-H., Villerd J., Colbach N.. 17th European Weed Research Society Symposium: "Weed management in changing environments", 23-26 June 2015, Montpellier, France. Which decision-support system for sustainable weed management: needs and constraints of crop advisors. (cofinancement CoSAC)
- Colbach N, Colas F, Moreau D, Gibot-Leclerc S, Pointurier O, Queyrel W, Bockstaller C (2016). Ex ante evaluation of weed-mediated pests and environmental benefits of cropping systems with simulation-based indicators. The fourteenth congress of the European Society for Agronomy, 5-9 September 2016, Edinburgh, Scotland.
- Colbach N., Granger S., Ricci B. & Messéan A. (2016) Landsharing vs. landsparing: how to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. In: 14th ESA Congress, Edinburgh, Scotland
- Mézière D., Granger S. & Colbach N. (2015) Does reduced herbicide use affect biodiversity and crop production? In: 17th European Weed Research Society Symposium, "Weed management in changing environments", Montpellier, France, 230

- Moreau D, Abiven F, Busset H, Matejcek A, Pagès L (2016) Root dynamics of weed species in relation to soil-nitrogen level. How to represent them? AFPP 23^{ème} conférence du Columa. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, décembre 2016, Dijon, France. Communication orale.
- Moreau D, Abiven F, Busset H, Matejcek A, Pagès L (2016) Root dynamics of weed species in relation to soil-nitrogen level. The fourteenth congress of the European Society for Agronomy, 5-9 September 2016, Edinburgh, Scotland. Poster.
- Moreau D, Gibot-Leclerc S, Girardin A, Reibel C, Strbik F, Colbach N (2015). Trophic relationships between host and parasitic plants: a case study with the parasitic plant species *Phelipanche ramosa*. The Seventeenth Symposium of European Weed Research Society. 23-26 June 2015, Montpellier, France. Poster.
- Pointurier, O., Gibot-Leclerc, S., Moreau, D. & Colbach, N. (2016). Modelling cropping system effects on branched broomrape dynamics in interaction with weeds. In *23^e Conférence du COLUMA: Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes*, Dijon, France
- Pointurier, O., Gibot-Leclerc, S., Moreau, D., Darmency, H. & Colbach, N. (2016). Modelling cropping system effects on branched broomrape dynamics in interaction with weeds. In *7th International Weed Science Congress*, Prague, Czech Republic.
- Queyrel W. & Colbach N. (2015) Pesticide retention by weeds during summer fallow: development of a new indicator of weed impact. In: 17th European Weed Research Society Symposium, "Weed management in changing environments" Montpellier, France, 263

6.1.5 RAPPORTS DE STAGE

- Abiven F. (2013). Analyse de la diversité des architectures racinaires entre espèces adventices. Mémoire de fin d'études de l'Institut Supérieur d'Agriculture de Lille.
- Girardin A. (2014). Etude des relations trophiques entre plante hôte et parasite. Cas de l'orobanche rameuse. Mémoire de fin d'études de l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais.
- Pointurier, O. (2015). Modélisation des effets des systèmes de culture sur la dynamique de la plante parasite orobanche rameuse en interaction avec la flore adventice. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, spécialité Protection des Plantes et Environnement, Montpellier SupAgro, Agrocampus Ouest, AgroParisTech. 64 p.
- Meyer B. (2014) Développement d'un indicateur de valeur de la flore adventice pour les lépidoptères. Mémoire M2, Université Haute-Alsace, Colmar, France. 81 p.
- Fernier A. (2014) Évaluation du risque d'apparition de résistances aux herbicides dans les systèmes de culture à base de glyphosate. Rapport de stage Master 1, Rapport de stage Master 1, AgroParisTech, Paris, France. 25 p. (cofinancement AMIGA)
- Garrido A. (2014) Étude in silico de l'impact des changements de pratiques agricoles sur la biodiversité dépendant de la flore adventice dans les paysages agricoles, Rapport de stage, 4^{ème} année d'école ingénieur, ESA, Angers, France,. 50 p. (cofinancement AMIGA)
- Prince A. (2013) Conception et utilisation d'un module de règles de décision pour la gestion durable d'une flore adventice plurispécifique. Intégration au modèle prédictif FLORSYS. Rapport de stage, 4^{ème} année d'école ingénieur, ESA, Angers, France. p.

6.1.6 PUBLICATIONS ET DOCUMENTS DE TRANSFERT

- 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. Information sur son adaptation à de nouveaux hôtes, découverte du phénomène de facilitation, et travail de modélisation. *Phytoma* 669, 44-47
- Colbach N., Vacher C. (2014) Travail du sol et gestion de la flore adventice. In. Faut-il travailler le sol? Acquis et innovations pour une agriculture durable (J. Labreuche, F. Laurent, J. Roger-estrade, coord.) éditions Quae, Arvalis – Institut du végétal, 113-125