



PESTICIDES



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

Analysing and modelling the effects of agricultural practices on ecosystem services and disservices depending on weeds. Application to the evaluation and design herbicide-parsimonious cropping systems

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

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

Date : 19/08/2016

N° de contrat : 29000683

Date du contrat : 20/12/2012

Action pilotée par le Ministère chargé du développement durable, avec l'appui financier de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques, par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du Plan Ecophyto

Table des matières

Synthèse	4
Contexte général	6
Objectifs généraux du projet.....	6
Quelques éléments de méthodologie (et éventuelles difficultés rencontrées)	7
Résultats obtenus	7
Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation... ..	11
Partenariats mis en place, projetés, envisagés	13
Pour en savoir plus (quelques références).....	13
Liste des opérations de valorisation issues du contrat (articles de valorisation, participations à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)	15
Résumés	16
Résumé court (environ 5 lignes)	16
Résumé long (2 pages)	17
Mots-clés.....	18
Abstract (2 pages)	19
Key words	20

SYNTHÈSE

(destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics)

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

En français

CONTEXTE GÉNÉRAL

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. Elles peuvent aussi servir de réservoir à d'autres bioagresseurs (ex. de la plante parasite orobanche rameuse ou du champignon responsable du piétin-échaudage des céréales). 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). Aujourd'hui, les agriculteurs utilisent essentiellement des herbicides pour contrôler les adventices alors que le contexte socio-économique pousse à une réduction de 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 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 et la dispersion de ces semences dans les paysages.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU PROJET

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 comprend notamment des travaux sur les interactions entre adventices et deux bioagresseurs associés (l'orobanche rameuse, 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) et de nuisibilité pour la production agricole. Les sorties sont (1) un outil d'évaluation des effets des systèmes de culture sur la flore adventice et les composantes biotiques associées (FLORSYS amélioré), (2) une méthodologie d'**évaluation et de conception de systèmes de culture** à l'aide de simulations, (3) des propositions de systèmes de culture conciliant réduction d'usage d'herbicides, promotion de la biodiversité et contrôle de la nuisibilité des adventices pour la production agricole.

¹ FLORSYS (Colbach *et al.*, 2014) 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.

QUELQUES ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE (ET ÉVENTUELLES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES)

Les étapes de l'étude étaient les suivantes:

- *Étude et modélisation de l'interaction adventice-bioagresseurs dans les systèmes de culture.* Des expérimentations au champ et en conditions contrôlées ont été mises en place pour étudier les processus mal connus (ex. devenir des semences parasites dans le sol, relations hôte-parasite, architecture racinaire des plantes hôtes) du cycle de vie de la plante holoparasite orobanche rameuse (*Phelipanche ramosa* L.). À partir de ces résultats complétés par la littérature, un modèle de dynamique du parasite appelé PHERASYS et inspiré de la structure du modèle FLORSYS a été développé. Ce travail a pris un an de retard puisque les conditions météorologiques de 2013 ont empêché la production de semences parasite en France, ce qui a conduit au report d'un an de l'expérimentation étudiant le devenir des semences parasites dans le sol. Parallèlement, un module appelé TAKEALLSYS a été développé à partir de la littérature et connecté à FLORSYS pour prédire les effets des systèmes de culture sur l'incidence du piétin-échaudage en céréales et la perte de rendement occasionnée, l'augmentation de ce risque en présence d'adventices hôtes et l'impact du champignon sur la dynamique adventice.
- *Développement d'indicateurs d'interactions biologiques et d'autres critères d'évaluation.* Le complexe de modèles FLORSYS prédit un grand nombre de variables décrivant les états du milieu, des adventices et des cultures dans les systèmes de culture. Afin d'évaluer l'impact des adventices sur la biodiversité et la production agricole, un cortège d'indicateurs est développé, à partir de connaissances en écologie et des avis des agriculteurs.
- *Développement de nouveaux modules pour FLORSYS.* Les résultats des premières étapes sont intégrés dans le code source de FLORSYS. D'autres modules sont ajoutés, notamment la résistance aux herbicides chez les adventices, dont la probabilité augmente avec la réduction de la gamme d'herbicides disponibles et des réductions de doses appliquées. Une version spatialement explicite permettant de simuler des micro-paysages est développée pour évaluer s'il est plus facile de concilier production et biodiversité au niveau de parcelles individuelles ("land sharing") ou des groupements de parcelles associant des systèmes de culture contrastés et/ou des champs et habitats semi-naturels ("land sparing").
- *Développement et application de méthodes de diagnostic et conception multicritère de systèmes de culture.* Différentes méthodes et combinaisons de méthodes basées sur des enquêtes auprès d'agriculteurs, analyses de sensibilité de FLORSYS aux pratiques culturales, expérimentations *in silico* et ateliers avec des agriculteurs ont été utilisées. 255 systèmes de culture provenant de 6 régions ont été évalués pour leur capacité à concilier faible usage d'herbicides, promotion de la biodiversité et production agricole, puis des règles et conseils ont été identifiés pour atteindre différents objectifs d'impact de la flore adventice. À partir de là, une méthode d'amélioration pas-à-pas a été appliquée à un petit nombre de systèmes existants pour améliorer leurs performances.

RÉSULTATS OBTENUS

Étude expérimentale et modélisation des interactions adventices-parasite

Les semences orobanche ne germent que si elles sont stimulées par des exsudats racinaires de plantes voisines. Une fois germé, le parasite qui est incapable de faire de la photosynthèse doit se fixer sur des racines (situées à proximité de la graine

germée) d'un hôte sensible afin de prélever les nutriments nécessaires à sa croissance et ainsi pouvoir lever, se reproduire et réalimenter le stock semencier du sol. Le parasite comprend plusieurs pathovars spécialistes de cultures différentes (O-colza, O-chanvre etc).

Dans une première expérimentation, nous avons enfoui des semences parasites au champ, puis déterré et mesuré leur viabilité et dormance toutes les six semaines pendant 2 ans. Les résultats préliminaires montrent une faible mortalité annuelle (entre 6 et 8% par an, en fonction du pathovar) et une forte saisonnalité de la dormance pour la pathovar O-colza, avec une dormance forte entre novembre et avril (80%) et faible entre mai et octobre (10%).

Une deuxième série d'expérimentations en conditions contrôlées a conduit à la caractérisation de systèmes racinaires pour plusieurs espèces cultivées et adventices, et a montré que les règles qui gouvernent l'architecture racinaire sont peu affectées par le statut azoté des plantes (Moreau *et al.*, submitted).

Une troisième expérimentation en serre a quantifié l'intensité avec laquelle le parasite prélève ses assimilats sur son hôte en fonction de l'espèce hôte, des stades phénologiques de l'hôte et du parasite, et des conditions de croissance des hôtes (Moreau *et al.*, 2016). La sensibilité des hôtes cultivés et adventices dépend de leur famille (forte sensibilité des Brassicacées) et de la précocité du parasite sur l'hôte, suggérant que le parasite se reproduit peu ou pas sur des adventices à cycle court. La biomasse des fleurs et graines de l'hôte est fortement réduite par le parasitisme, au contraire de la biomasse foliaire. La biomasse d'une tige parasite diminue avec le nombre de tiges parasite fixées sur la plante hôte.

Une quatrième expérimentation testant des mélanges cultivés colza-légumineuses a montré que la présence des légumineuses *Medicago sativa* et *Vicia cracca* augmente la fixation de l'orobanche sur les plantes de colza voisin alors que la présence du colza protège partiellement les légumineuses.

Les résultats ont été formalisés sous forme d'équations et complétés à partir de la littérature (Pointurier *et al.*, 2016). Dès la fin de l'expérimentation encore en cours, le modèle sera finalisé et des simulations pourront débiter pour évaluer et concevoir des systèmes de culture adaptés à la gestion du parasite.

Modélisation et évaluation des interactions entre adventices et un champignon pathogène

Le champignon pathogène *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* est responsable du piétin-échaudage, une maladie très nuisible des céréales. Il est très dépendant des pratiques culturales et peut infecter des adventices graminées. Nous avons amélioré un modèle existant qui quantifie les effets des pratiques agricoles sur la maladie en y intégrant l'effet de la présence d'adventices graminées sensibles au champignon (Colbach *et al.*, 2014). Ce nouveau modèle appelé TAKEALLSYS a été couplé à FLORSYS, en intégrant aussi l'effet de la maladie sur la production de semences des adventices. Des simulations montrent que les pratiques économes en herbicides n'augmentent pas la maladie, et peuvent même la diminuer. En effet, l'addition de pois de printemps dans des rotations d'hiver ou certaines pratiques de gestion d'adventices (ex. retard de semis) réduisent la maladie, même en l'absence d'adventices. La présence d'adventices augmente la maladie uniquement lorsque le champ est très infesté (ex semis direct). En aucun cas, ce type de champignon (réduisant la reproduction des plantes mais pas leur levée) ne permet de réguler la dynamique des adventices.

Modélisation et évaluation du risque de résistance aux herbicides

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, montrant que les effets pléiotropiques (ex. délai de germination, réduction de production de semences) liés à la résistance sont plus importants que le niveau de résistance des populations aux herbicides.

Une version plus simple a été introduite dans FLORSYS et paramétré pour la résistance au glyphosate (Colbach *et al.*, submitted). 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 puis l'effet de cette résistance sur la nuisibilité et les bénéfices de la flore adventice. Des tableaux de conseil ont été élaborés sur la base de ces simulations.

Évaluation de la version "champ" de FLORSYS

L'évaluation du modèle se fait en trois étapes (Colbach *et al.*, 2014) :

- 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, provenant d'essais au champ spécifiques,
- Évaluation de l'ensemble du modèle en comparant des sorties de variables simulées à des observations pluriannuelles provenant d'essais système et du réseau Biovigilance-Flore.

La qualité des prédictions est généralement satisfaisante et même très bonne pour Époisses et la Bourgogne en général, région dans laquelle une grande partie des processus biophysiques a été paramétrée. L'évaluation a cependant identifié deux problèmes: (1) Les stades des adventices et des cultures sont mal prédits à des latitudes plus au sud que la Bourgogne. Des suivis sont actuellement en cours pour améliorer ce module, (2) Les 16 espèces actuellement paramétrées dans FLORSYS ne couvrent pas les principales niches existant en grandes cultures. Neuf nouvelles espèces ont donc été rajoutées récemment.

Développement d'indicateurs de nuisibilité et bénéfices de la flore adventice

Les variables journalières décrivant l'état de la flore adventice dans les systèmes de culture dans FLORSYS sont traduites en indicateurs qui reflètent les conséquences des adventices pour la production agricole, la biodiversité et l'environnement et servent à évaluer les systèmes de culture en termes d'impact de la flore adventice (Colbach *et al.*, 2014). Les indicateurs de nuisibilité ont été développés à partir d'enquêtes auprès des agriculteurs et comprennent la nuisibilité directe (perte de rendement, pollution des récoltes), technique (bourrage de la moissonneuse-batteuse), sociologique (salissement du champ, pour prendre en compte qu'un champ "sale" pose des problèmes d'acceptation, même sans réduction de la production agricole) et indirecte (augmentation de pertes de rendement dues au piétin-échaudage, risque d'orobanche). Les indicateurs de biodiversité comprennent la biodiversité végétale (richesse, équitabilité) et fonctionnelle (offre trophique pour oiseaux, insectes et pollinisateurs). Les derniers indicateurs couplés à FLORSYS

reflètent la contribution des adventices à réduire l'impact des intrants sur l'environnement (réduction de la lixiviation d'azote, du transfert de pesticides).

Concilier au niveau du champ ou du micropaysage?

Initialement, FLORSYS décrit une parcelle unique. Ici, nous l'avons transformé pour simuler un îlot de parcelles composé de champs et d'habitats semi-naturels (ex. bandes enherbées, bordures de route), en introduisant la dispersion de semences par vecteurs naturels (Colbach *et al.*, 2016c). Des simulations ont été réalisées avec des systèmes de culture pour comparer des scénarios de land-sharing tentant de concilier production et biodiversité dans les mêmes champs, et des scénarios de land-sparing séparant surfaces productives et surfaces dédiées à la biodiversité, soit en associant des systèmes de culture contrastés, soit en intégrant des habitats semi-naturels.

La prise en compte des règles de décision des agriculteurs

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. Nous avons donc couplé FLORSYS à un modèle de règles de décision puis évalué différentes règles pour leur aptitude à gérer la flore adventice. Les règles testées proviennent de l'essai "système" de Dijon-Epoisses. Les simulations montrent que ces règles sont plus efficaces pour maximiser le rendement potentiel que pour contrôler l'infestation adventice bien qu'elles produisent des résultats moins variables. Nous avons aussi testé des règles de décision innovantes basées sur des indicateurs biophysiques mais leur effet est encore trop faible et trop variable. Ces règles 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. Nous avons donc travaillé avec des systèmes de culture "fixes".

Diagnostic de systèmes de culture existants

Plusieurs études de simulation ont été réalisées, testant des systèmes de culture identifiés en enquête auprès des agriculteurs, dans le réseau Biovigilance-Flore ou par des experts afin d'évaluer la performance de systèmes existants et d'identifier des pistes pour améliorer ces performances. L'étude préliminaire réalisée en Bourgogne et Poitou-Charentes (Colbach *et al.*, 2014) a montré que (1) la flore adventice des systèmes à faible IFT herbicide n'entraînait ni une meilleure biodiversité ni une augmentation de nuisibilité, car les agriculteurs prennent des mesures pour compenser l'absence d'herbicides; (2) Il existe bien des systèmes de culture permettant de concilier partiellement production agricole et biodiversité mais ils sont peu nombreux, laissant peu de marge de manœuvre aux agriculteurs; (3) aucun des systèmes testés ne permettait de concilier production, biodiversité et faible usage herbicide.

La méthode a été adaptée et étendue à un nombre élevé de systèmes de culture (255) et régions (7) (Colbach *et al.*, 2016b). Des arbres de décision et des grilles de conseil ont été élaborés pour différents objectifs d'impact de la flore adventice. Ces grilles donnent pour chaque technique un conseil, les conditions particulières dans lequel il s'applique, et les raisons. Par exemple, pour réduire le risque du parasite orobanche rameuse lié aux adventices, il faut labourer seulement avant culture de printemps et au moins 7.5 mois avant le semis; cela permet de maximiser l'effet faux

semis sur les adventices tout en inhibant leur levée en enfouissant des semences. Au final, cela conduit à une plus forte réduction du stock semencier parasite et limite la reproduction du parasite sur adventices. Labourer avant culture d'hiver, notamment avant colza, est néfaste car cela risque de déterrer des semences adventices permettant la germination et la reproduction du parasite.

Méthodologie de conception de systèmes de culture

Une méthode itérative de conception de systèmes de culture multi-objectifs a été développée, combinant (1) évaluation multi-critère de systèmes de culture existants avec FLORSYS, (2) identification de modifications de pratiques culturales à partir d'un arbre de décision pour améliorer le système initial, (3) construction des systèmes alternatifs, (4) simulation avec FLORSYS et évaluation à l'aide des indicateurs d'impact des adventices, (5) retour à l'étape 2 si besoin. La méthode a été appliquée à un système bourguignon, avec comme objectif de concilier faible usage d'herbicide, contrôle de la nuisibilité (perte de rendement, salissement du champ, risque parasitaire) et promotion de la biodiversité (offre trophique pour les abeilles). Le risque d'échec peut être réduit, mais les alternatives sont peu nombreuses et ne permettent pas d'atteindre un niveau de performance très élevé. Si l'objectif est seulement de concilier contrôle de la nuisibilité et réduction d'usage herbicide, la gamme des alternatives est beaucoup plus large et diverse, et une performance élevée est possible (ex. perte de rendement < 5%, IFT herbicide < 0.8).

Utilisation de FLORSYS en atelier avec les agriculteurs

Nous avons commencé à mettre en place des ateliers d'interaction avec les agriculteurs, basés sur l'utilisation de FLORSYS pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture permettant de concilier contrôle de la nuisibilité et promotion des bénéfiques de la flore adventice. La détection des freins techniques ou socio-économiques et leur intégration dans le processus de conception est indispensable pour faciliter le transfert des innovations vers la profession. Les premiers résultats montrent, entre autres, que les agriculteurs sont souvent prêts à aller plus loin dans les changements de pratiques que ne le proposent les conseillers (ex. tester des techniques et combinaisons de techniques non chimiques plutôt que des alternatives chimiques) et qu'ils ont une bonne maîtrise des points clés du cycle de vie des adventices, mis en évidence récemment par la recherche (ex. évaluer les stratégies sur la biomasse des adventices plutôt que sur le stock semencier du sol).

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, RÉALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- Implications pratiques :

Bien que le modèle PHERASYS ne soit pas encore opérationnel, les résultats expérimentaux permettent déjà de tirer des conclusions pratiques. Le cycle de dormance observé suggère par exemple que des cultures hôtes développant leur système racinaire entre novembre et avril sont moins sensibles aux attaques parasites.

- Recommandations et limites éventuelles :

Une grille de conseils a été établie à partir des résultats expérimentaux, pour optimiser les pratiques culturales pour la gestion du parasite orobanche rameuse. Ces conseils sont cependant basés sur une évaluation individuelle des pratiques et

néglige les effets à long terme. Ils devront être confirmés et complétés par des études de simulation dès que PHERASYS sera terminé.

Voici quelques exemples de conclusions (spécifiques à la région de l'étude et dépendantes du domaine de validité du modèle) basées sur les simulations:

- La gestion intégrée des adventices dans des rotations d'hiver en Bourgogne et dans le Nord 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 bioagresseurs de type piétin-échaudage (impactant la reproduction mais pas la levée) ne permettent pas de réguler la flore adventice. (Mézière *et al.*, 2013)
- 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%. Avec 4 inhibiteurs des ACCases, ce délai est réduit à 6 ans. Les doses réduites avancent la résistance de 1-3 ans dans 50% des cas. Introduire du pois de printemps ou du labour annuel retarde la résistance indéfiniment dans 90% and 60% des cas. (Colbach *et al.*, 2016a)
- Dans les systèmes avec maïs en Aquitaine et Catalogne, (1) l'application de glyphosate entraîne la résistance au glyphosate uniquement si d'autres facteurs cultureux favorisent les adventices (ex. semis direct), (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 la résistance que pour la résistance à l'herbicide, (4) la résistance est la plus fréquente dans des espèces qui n'évitent pas l'herbicide 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). La biodiversité végétale est peu affectée par l'apparition de la résistance, avec un remplacement des populations ou espèces non résistantes par des populations ou espèces résistantes. La nuisibilité des adventices pour la production agricole et l'offre trophique pour oiseaux, carabes et abeilles ne sont affectées que lorsque les adventices sont rares. Cependant, aucune des 25 espèces adventices testées en simulation ne combinait les traits les plus nuisibles avec la résistance au glyphosate.
- Dans les systèmes avec maïs et glyphosate en Aquitaine, le land sparing combinant 75% de systèmes maximisant la production agricole (monoculture de maïs avec glyphosate et travail du sol superficiel) et 25% de systèmes maximisant la biodiversité (semis direct et précoce) dans la micro-région était le plus efficace. Les scénarios combinant 90% de surface cultivée maximisant la production et 10% de bandes enherbées étaient quasiment aussi bons. La production et la biodiversité des scénarios "land sharing" (soja/maïs/blé/maïs, travail superficiel, glyphosate en maïs et herbicides conventionnels ailleurs) étaient presque toujours plus faibles, quel que soit l'assolement annuel.
- Un système historique colza/blé/orge bourguignon (labour 1 an sur 3; 2-3 travaux superficiels par an; 2 herbicides foliaires, 2 pseudo-racinaires, 1 racinaire et 1 multi-mode sur la rotation) a peu de chance de concilier faible usage d'herbicide, contrôle de la nuisibilité (perte de rendement, salissement du champ, risque parasite) et promotion de la biodiversité (offre trophique pour abeilles) (90% de risque d'échec). Remplacer les herbicides retirés du marché par des nouvelles molécules réduit ce risque à 70%. Remplacer de plus un herbicide racinaire/pseudo-racinaire au semis de l'orge par un foliaire de printemps réduit

le risque d'échec à 30%. Remplacer un simple herbicide racinaire par un foliaire, le broyage en interculture, rouler au semis ou rallonger la rotation en ajoutant un tournesol et un blé n'étaient pas efficace. Combiner la meilleure option avec le broyage et le rouleau augmente cependant la meilleure performance possible ($\leq 20\%$ de nuisibilité, $\geq 60\%$ de biodiversité, IFT herbicide 1.25, probabilité de succès 10%).

- **Réalisations pratiques et valorisation :**

Des grilles de conseils et des arbres de décision ont été élaborés dans les différentes études de simulation, afin d'identifier les facteurs à risque et de guider les acteurs dans l'élaboration de leurs stratégies de gestion d'adventices. Ces conseils dépendent du nombre et de la nature des objectifs d'impact des adventices à optimiser, ainsi que de la région et du type de système de culture. Des méthodes de conception de systèmes de culture avec FLORSYS ont été élaborées et un petit nombre de systèmes alternatifs élaborés et proposés dans des ateliers avec des agriculteurs. Les résultats sont tous publiés ou en cours de publication dans des revues scientifiques. La publication dans des congrès et revues pour la profession n'en est qu'à ses débuts.

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETÉS, ENVISAGÉS

Le présent projet regroupait essentiellement des chercheurs travaillant sur le fonctionnement de l'agroécosystème, la modélisation, et l'évaluation et la conception de systèmes de culture. Ce travail continue actuellement dans le cadre de l'ANR CoSAC (www.projet-cosac.fr), regroupant chercheurs, instituts techniques et coopératives agricoles. Ce nouveau projet concerne plusieurs axes

- L'amélioration du modèle FLORSYS, pour terminer les travaux débutés ici et intégrer des techniques culturales innovantes proposées par les partenaires,
- 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. 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'outils pédagogiques 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.

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES RÉFÉRENCES)

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. (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., 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*.
- 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>.
- 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., Abiven F., Busset H., Matejcek 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*.
- 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

LISTE DES OPÉRATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS À DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	6
Publications scientifiques à paraître	6
Publications scientifiques prévues	2
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	4
Participations futures à des colloques	5
THÈSES	
Thèses passées	1
Thèses en cours	1
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	2
Articles de valorisation à paraître	
Articles de valorisation prévus	Via ANR CoSAC
AUTRES ACTIONS VERS LES MÉDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	
Actions vers les médias prévues	
ENSEIGNEMENT - FORMATION	
Enseignements/formations dispensés	3 journées agriculteurs 1 formation conseillers 7 stages d'ingénieur, master 1 ou master 2 Nombreux cours en Masters (écoles d'ingénieur Dijon, Montpellier, Paris, Clermont; université de Bourgogne), Licence Pro (université de Bourgogne)
Enseignements/formations prévus	Ateliers de conception de systèmes de culture, formations FLORSYS (ANR CoSAC)
EXPERTISES	
Expertises menées	
Expertises en cours	
Expertises prévues	
MÉTHODOLOGIES (GUIDES...)	
Méthodologies produites	1 (notice FLORSYS pour évaluation de systèmes de culture)
Méthodologies en cours d'élaboration	
Méthodologies prévues	1 (notice FLORSYS pour conception de systèmes de culture)
AUTRES	
Précisez...	Logiciel (nouvelle version FLORSYS déposée à l'APP)

RÉSUMÉS

En français

RÉSUMÉ COURT (ENVIRON 5 LIGNES)

Les adventices sont nuisibles pour la production agricole mais essentielles pour la conservation de la biodiversité. Nous avons analysé et modélisé les processus biophysiques responsables des effets des techniques culturales sur la flore adventice et des composantes bénéfiques et nuisibles associées. Nous avons développé et utilisé des outils et méthodes de simulation pour évaluer et concevoir des systèmes de culture conciliant production agricole, biodiversité et réduction d'usage herbicide.

RÉSUMÉ LONG (2 PAGES)

Contexte

Parmi les bioagresseurs visés par les pesticides, les adventices sont les plus nuisibles pour la production agricole et peuvent servir de relais à d'autres bioagresseurs. Dans les paysages agricoles, les adventices sont indispensables pour la biodiversité végétale sauvage et pour nourrir de nombreuses autres composantes de la biodiversité. Les adventices sont surtout gérées à l'aide d'herbicides alors que le contexte socio-économique incite à les réduire pour des raisons environnementales, sanitaires et règlementaires. Les stratégies de gestion des adventices économes en herbicides doivent combiner toutes les techniques culturales pour aboutir à une gestion intégrée mettant à profit tous les effets préventifs possibles, 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 et la dispersion de ces semences dans les paysages.

Objectifs

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 via l'adaptation du modèle de dynamique des adventices existant FLORSYS, (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**. Les sorties attendues sont (1) un **outil d'évaluation** des effets des systèmes de culture sur la flore adventice et les composantes biotiques associées, (2) une **méthodologie d'évaluation et de conception de systèmes de culture** à l'aide de simulations, (3) des **propositions de systèmes de culture** conciliant réduction d'usage d'herbicides, biodiversité et production agricole.

Méthodologie

Les étapes de l'étude étaient les suivantes:

- Étude et modélisation de l'interaction adventice-bioagresseurs (la plante parasite orobanche rameuse *Phelipanche ramosa* L., le champignon *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* responsable du piétin-échaudage des céréales) dans les systèmes de culture, à partir d'expérimentations et de la littérature.
- Développement d'indicateurs d'impact de la flore adventice sur la biodiversité, la production agricole et l'environnement, en interaction avec les écologues et les agriculteurs, pour faciliter l'évaluation des systèmes de culture.
- Développement de nouveaux modules pour FLORSYS (interactions adventices-bioagresseurs, la résistance aux herbicides, la dispersion des semences dans les paysages, indicateurs d'impact de la flore adventice).
- Développement et application de méthodes de diagnostic et conception multicritère de systèmes de culture basées sur des simulations avec FLORSYS.

Principaux résultats obtenus

- Des nouvelles connaissances sur les interactions entre adventices et bioagresseurs (ex. les adventices favorisant le plus le parasite orobanche rameuse sont des crucifères, à long cycle, développement racinaire printanier/estival et forte biomasse; les stratégies de gestion intégrée des adventices n'augmentent pas le risque de piétin-échaudage);
- Une nouvelle version de FLORSYS, son domaine de validité et des pistes d'amélioration (ex. améliorer la prédiction des dates de floraison aux latitudes du sud, ajouter des adventices estivales),

- Des indicateurs d'impact de la flore adventice, évaluant les contributions à la biodiversité (biodiversité végétale, offre trophique pour d'autres organismes) et à la réduction des transferts d'intrants (lixiviation d'azote, transfert de pesticides), ainsi que la nuisibilité directe (perte de rendement, pollution des récoltes), technique (bourrage de la moissonneuse-batteuse), sociologique (un champ "sale" affecte la crédibilité de l'agriculteur auprès de ses pairs, indépendamment de l'effet sur la production) et indirecte (augmentation d'autres bioagresseurs).
- Des conseils et recommandations issues d'études de simulation sur des cas d'étude (risque de résistance aux herbicides; quelles pratiques pour réduire le risque parasite ou pour concilier production, biodiversité et réduction d'usage herbicides; concilier au niveau de la parcelle ou du micropaysage etc)
- Une méthode itérative de conception de systèmes de culture multi-objectifs combinant évaluation multi-critère de systèmes existants avec FLORSYS, l'identification de modifications prometteuses de pratiques culturales à partir d'arbres de décision, la construction des systèmes alternatifs et test avec FLORSYS.
- La prise en compte des objectifs et contraintes des agriculteurs, via le test de règles de décision dans des simulations FLORSYS, et des ateliers d'interaction avec les agriculteurs, basés sur l'utilisation de FLORSYS pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture.

Sorties opérationnelles pour décideurs, applications éventuelles

Des exemples de conclusions (spécifiques à la région de l'étude et dépendantes du domaine de validité du modèle) basées sur les simulations:

- La gestion intégrée des adventices (rotations d'hiver, Bourgogne, Nord) n'augmente pas le piétin-échaudage des céréales et peut même le diminuer. Le piétin-échaudage ne permet pas de réguler la flore adventice.
- Appliquer un herbicide inhibiteur des ACCases (colza/blé/orge, Bourgogne) entraîne l'apparition de résistance en moyenne après 18 ans, avec une probabilité de 40%. Avec 4 inhibiteurs, ce délai est réduit à 6 ans. Les doses réduites avancent la résistance de 1-3 ans (50% des cas). Introduire du labour annuel ou un pois de printemps retarde la résistance indéfiniment (60-90% des cas).
- Le glyphosate (maïs, Aquitaine) n'entraîne la résistance au glyphosate que si d'autres facteurs cultureux favorisent les adventices (ex. semis direct). Le glyphosate sélectionne surtout pour des traits d'espèces permettant d'éviter l'exposition à l'herbicide ou de compenser les coûts de la résistance.
- Il vaut mieux concilier production et biodiversité au niveau du micro-paysage (en introduisant des bandes enherbées ou des systèmes maximisant la biodiversité) que de chercher à concilier production et biodiversité dans chaque parcelle (maïs, Aquitaine).
- Des systèmes ont été identifiés pour concilier production et biodiversité, ou production et faible usage d'herbicide. Aucun ne concilie efficacement les 3 objectifs.

Recommandations

Les objectifs d'impact de la flore adventice et les pratiques culturales recommandées doivent être spécifiques à chaque contexte de production et type d'exploitation.

MOTS-CLÉS

Adventice, modèle, système de culture, évaluation multicritère, conception multi-objectifs, biodiversité, nuisibilité, IFT herbicide, processus biophysique

In English

ABSTRACT (2 PAGES)

Context

Among the pests currently managed by pesticides, weeds are the most harmful for crop production and they are potential hosts for other pests. Weeds are the major component of wild vegetal biodiversity in agricultural landscapes and contribute to feeding many other biodiversity components. Today, weeds are most managed with herbicide applications even though society demands a reduction of pesticide use because of environmental, health and regulatory issues. Herbicide-parsimonious weed management strategies must combine all cultural techniques to result in integrated crop protection optimizing all possible preventive effects, and to reconcile several, often antagonistic weed management objectives. Studying and managing weeds is difficult because weed seeds survive for several years in the soil and seeds are dispersed in landscapes.

Objectives

The objective of our project was (1) to improve our understanding of the functioning of the agroecosystem, particularly of the effects of cropping systems on weed floras and their associated biotic components, via the adaptation of the existing weed dynamics model FLORSYS, (2) to evaluate cropping systems *ex ante* with simulations to identify optimal systems reconciling **reduced herbicide use** and **biodiversity** while **maintaining crop production**. The expected output were (1) a **tool for evaluating** the effects of cropping systems on weed flora and associated biotic component, (2) a simulation-based **methodology for evaluating and designing cropping systems**, (3) **novel cropping systems** reconciling reduced herbicide use, biodiversity and crop production.

Methodology

The project steps were:

- Analysis and modelling of interactions between weeds and two associated pests (the parasitic plant branched broomrape *Phelipanche ramosa* L., the fungus *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* causing take-all in cereals) in cropping systems, from experiments and literature,
- Development of indicators of weed impact on biodiversity, crop production and the environment, together with ecologists and farmers, in order to facilitate cropping system evaluation,
- Development of new submodels for FLORSYS (weed-pest interactions, herbicide resistance, seed dispersal in landscapes, weed impact indicators),
- Development and application of methods for multicriteria evaluation and design of cropping systems with FLORSYS simulations.

Main results

- New knowledge on weed-pest interactions (e.g. the weeds that most favour broomrape are Brassicaceae, with a long life cycle, spring/summer root development and a large plant biomass; integrated weed management does not increase take-all incidence),
- A new FLORSYS version, its domain of validity and indications for future improvement (e.g. improve prediction of flowering dates at Southern latitudes, add summer weeds),

- Weed-impact indicators for contribution to biodiversity (vegetal biodiversity, food offer for other organisms) and to reducing input leaching (nitrogen, pesticides) and for direct (yield loss, harvest contamination), technical (harvesting problems), sociological (field infestation which lowers the farmers credibility among his peers regardless of yield loss) and indirect harmfulness (increase of other pests) for crop production,
- Advice and recommendations from case-study simulations (e.g. risk of herbicide resistance; which practices to reduce parasite risk or to reconcile production, biodiversity and reduced herbicide use; reconcile at the scale of the field of the micro-landscape),
- An iterative method for designing multi-objective cropping systems, combining multi-criteria evaluation of cropping systems with FLORSYS, identification of promising modifications from decision trees, design and test of alternative systems with FLORSYS,
- Integrating the objectives and constraints of farmers, by testing decision rules in FLORSYS simulations, and with farmer workshops where FLORSYS was used to evaluate and design cropping systems.

Applications for public policies

A few conclusions (specific to the studied region and depending on the model's domain of validity) based on the simulations:

- Integrated weed management (winter rotations, Burgundy, North) does not increase the risk of cereal take-all and can even decrease it. Take-all is not suitable for biological weed control.
- The application of an ACCase-inhibiting herbicide (oilseed rape/wheat/barley, Burgundy) result in resistance advent after 18 years in average, with a probability of 40%. With 4 inhibitors, this delay is reduced to 6 years. Reduced herbicide rates advance resistance by 1-3 years (50% probability). Yearly mouldboard ploughing or adding a spring pea delays resistance indefinitely (60-90% probability).
- Glyphosate applications (maize, Aquitaine) result in glyphosate resistance only if other cultural practices favour weeds (e.g. no till). Glyphosate mostly selects for species traits permitting to avoid exposure to weeds or to compensate resistance costs.
- Reconciling production and biodiversity at the micro-landscape (by introduction grass strips or systems that maximise biodiversity) works better than in each field (maize, Aquitaine).
- Cropping systems that reconcile production and biodiversity, or production and reduced herbicide use were identified. None reconcile all 3 objectives efficiently.
-

Recommendations

Weed-impact objectives and recommended cultural practices must be particular to each production context and farm type.

KEY WORDS

Weed, model, cropping system, multicriteria evaluation, multi-objective design, biodiversity, harmfulness, herbicide treatment frequency index, biophysical process