



CoSAC

Séminaire final

31 janvier et 01 février 2019

Paris

www.projet-cosac.fr

**Gestion des adventices dans un contexte
de changement :
Connaissances, méthodes et outils pour
l'élaboration de stratégies innovantes**

Actes

ANR

S



Comité d'organisation et d'édition

Nathalie Colbach⁽¹⁾, Frédérique Angevin⁽²⁾, Christian Bockstaller⁽³⁾, Bruno Chauvel⁽¹⁾, Céline Denieul⁽⁴⁾, Delphine Moreau⁽¹⁾, Bertrand Omon⁽⁵⁾, Didier Pellet⁽⁶⁾, Alain Rodriguez⁽⁷⁾, Laure Trannoy⁽⁸⁾, Sandrine Volan⁽⁹⁾, Fanny Vuillemin⁽¹⁰⁾

⁽¹⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France

⁽²⁾ Eco-Innov, INRA, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁽³⁾ LAE, Université de Lorraine, INRA, 68000 Colmar, France
France

⁽⁴⁾ 83 avenue de la grande armée, 75782 Paris CEDEX 16

⁽⁵⁾ Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie, DIRD, 6 rue des Roquemonts - CS 45346, 14053 CAEN Cedex 4

⁽⁶⁾ Agroscope, Route de Duillier 50, CP 1012, CH-1260 Nyon 1, Suisse

⁽⁷⁾ ACTA, 6 chemin de la côte vieille, 31450 Baziège, France

⁽⁸⁾ INRA Transfert, 28, rue du Dr Finlay, 75015 Paris

⁽⁹⁾ Arvalis-Institut du végétal, 21 chemin de Pau-64121 MONTARDON

⁽¹⁰⁾ Terres Inovia, 6 chemin de la côte vieille, 31450 BAZIEGE, France

Table des matières

Gestion des adventices dans un contexte de changement : Connaissances, méthodes et outils pour l'élaboration de stratégies innovantes	1
Comité d'organisation et d'édition	2
Table des matières	3
Programme	5
Jour 1 – Conception de systèmes de culture – méthodes & résultats	5
Jour 2 - Production de connaissances & outils pour la conception de systèmes	6
Posters	7
Introduction	8
CoSAC, un projet pour la Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement (climat, pratiques agricoles, biodiversité)	9
Quelles pratiques permettent de réduire les herbicides sans perdre du rendement ?	12
Conférences invitées.....	15
Concevoir pour et avec les agriculteurs : quels défis pour la recherche ?	16
Les métiers de la R&D et du conseil à l'épreuve de la gestion durable des adventices.....	20
Processus de création variétale dans le cas des plantes de service	24
PestiRed: un projet de co-innovation pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires dans les grandes cultures en Suisse	27
Conception de systèmes de culture.....	31
Conception de systèmes de cultures par algorithmes d'optimisation	32
Evaluation multicritère <i>a priori</i> pour aider à la conception de systèmes innovants. Cas de Syppre Berry	36
Combiner expertise et modèles en ateliers de co-conception de systèmes de culture pour une gestion durable des adventices : apports méthodologiques et perspectives	39
Évaluation par simulation des performances et de la durabilité de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure	42
Comparaison de méthodes de conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices.....	46
Apports de connaissances et méthodes issues de CoSAC pour l'enseignement de spécialisation en école d'ingénieur : exemple du module de conception de systèmes agroécologiques de la dominante Agroécologie pour des Productions Végétales durables (APOGEE) à AgroSup Dijon.....	50
Étude de processus	53
Quels traits des cultures et des adventices expliquent la perte de rendement due à la compétition pour la lumière ?	54
Enfin une méthode pour estimer le statut azoté à l'échelle de la plante dans des couverts hétérogènes !	57
Coupler l'utilisation d'un modèle de simulation et d'une plateforme de phénotypage à haut débit pour caractériser la réponse des adventices à une limitation en eau	60

Les semences de la plante parasite orobanche rameuse ont une dormance saisonnière qui varie au niveau intraspécifique et une faible mortalité au champ	62
Évaluation de performance au champ	65
Effet de la stratégie de gestion de l'interculture sur la régulation des adventices	66
Gestion des adventices en semis-direct : l'effet du couvert varie selon les ressources du sol et le mode de destruction du couvert	71
Estimation de la richesse des communautés adventices dans des parcelles conduites en semis direct sous couvert.....	74
Détection non supervisée des adventices : résultats et limites	77
Développement d'outils et de modèles	80
ECOHERBI : un outil numérique interactif pour réduire l'usage des herbicides	81
Un indicateur « offre trophique pour pollinisateurs par les adventices » pour le modèle FLORSYS84	
Comment conseillers et agriculteurs contribuent au développement d'un modèle d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventice ?	87
Dans quels systèmes de culture les adventices résiduelles peuvent-elles réduire la lixiviation du nitrate et l'érosion des sols ?.....	90
Quelle efficacité d'une gestion à une échelle paysagère large des abondances locales d'aventices? Une approche de modélisation à l'échelle du paysage.	93
Les résistances aux herbicides « non liées à la cible » : une menace pour le désherbage d'automne des céréales ?	96
Annexe: Une courte présentation de FLORSYS	98
Liste des auteurs	101

Programme

INRA, rue de l'université, Paris
Grand amphi

Les diapositives seront en ligne après la fin du colloque.

Jour 1 – Conception de systèmes de culture – méthodes & résultats

Horaire	Intervenant	Titre
9h30		Accueil (café en libre service pendant la matinée)
10h	Nathalie Colbach	Introduction
10h15	Nathalie Colbach	Diagnostic de pratiques d'agriculteurs - Quelles pratiques permettent de réduire les herbicides sans perdre du rendement ?
10h45	Posters	Une diapo par poster – animation par Nathalie Colbach
11h	Pause	Visite de posters
11h15	Session	Conception de systèmes de culture – animation par Frédérique Angevin
11h15	Marianne Cerf	Conférence invitée - Concevoir pour et avec les agriculteurs : quels défis pour la recherche ?
12h00	Thibault Maillot	Construction de rotations culturales par algorithmes d'optimisation
	Sophie Dubois	Evaluation à priori du risque adventice pour aider à la conception de systèmes innovants. Cas du Syppre Berry
		Discussion
13h	Repas	Cantine de l'INRA
14h30	Session	Conception de systèmes de culture (suite) – animation par Alain Rodriguez
14h30	Bastien Van Inghelandt	Combiner prototypage et modèles en ateliers de co-conception de systèmes de culture pour une gestion durable des adventices : apports méthodologiques et perspectives
	Nicolas Cavan	Évaluation des performances et de la durabilité de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure
	À déterminer	Témoignage d'un agriculteur du groupe DEPHY Ferme de l'Eure Place de la conception dans sa démarche, enrichissement des travaux de recherche dans leur démarche, participation à un processus de conception d'outil, de son ajustement, sa mise au point.
	Nicolas Cavan	Comparaison de méthodes de conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices
		Discussion
16h15	Pause	Visite de posters
16h30	Session	Conception de systèmes de culture (suite)
16h30	Marianne Cerf	Conférence invitée - les métiers de la R&D et du conseil à l'épreuve de la gestion durable des adventices
	Discussion	
17h45	Fin de journée	

Jour 2 - Production de connaissances & outils pour la conception de systèmes

Horaire	Intervenant	Titre
9h		Conférence invitée - animation par Delphine Moreau
9h	Nathalie Harzic	Processus de création variétale dans le cas des plantes de service
9h45	Session	Étude de processus animation par Delphine Moreau
9h45	Nathalie Colbach	Quels traits des cultures et des adventices expliquent la perte de rendement due à la compétition pour la lumière ?
	Laurène Perthame	Enfin une méthode pour estimer le statut azoté à l'échelle de la plante dans des couverts hétérogènes !
	Delphine Moreau	Coupler l'utilisation d'un modèle de simulation et d'une plateforme de phénotypage à haut débit pour caractériser la réponse des adventices à une limitation en eau
	Discussion	
11h00	Pause	Visite de posters
11h30		Conférence invitée– animation par Nathalie Colbach
11h30	Bernard Jeangros	Conférence invitée – PestiRed, un nouveau projet de co-innovation pour réduire l'utilisation des pesticides dans les systèmes de grande culture en Suisse
12h00	Session	Évaluation de performances au champ – animation par Céline Denieul
12h00	Pascale Métais & Fanny Vuillemin	Effet de la stratégie de gestion de l'interculture sur la régulation des adventices
	Stéphane Cordeau	Gestion des adventices en semis-direct : l'effet du couvert varie selon les ressources du sol et le mode de destruction du couvert
13h	Repas	(café en libre service l'après-midi dans l'amphi)
14h15	Bruno Chauvel	Étude des communautés adventices et semis direct sous couvert – méthodologies et premiers résultats
	Gawain Jones	Détection non supervisée des adventices par drone : résultats et limites
		Discussion
15h00	Session	Développement d'outils et de modèles – animation par Nathalie Colbach
	Alain Rodriguez	Atelier d'évaluation du guide interactif ECOHERBI
	Christian Bockstaller	Un indicateur « offre trophique pour pollinisateurs par les adventices » pour le modèle FLORSYS
	Floriane Colas	Comment conseillers et agriculteurs contribuent au développement d'un modèle d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventice
		Discussion
16h10	Discussion finale	animation par Nathalie Colbach
	Florian Célette & Didier Pellet	Retour des témoins & discussion
17h00	Fin du colloque	

Posters

Les posters seront affichés dans l'amphithéâtre.

Intervenant	Titre
Olivia Pointurier	Les semences de la plante parasite orobanche rameuse ont une dormance saisonnière qui varie au niveau intraspécifique et une faible mortalité au champ
Delphine Moreau	Dans quels systèmes de culture les adventices résiduelles peuvent-elles diminuer la lixiviation du nitrate ?
Benoît Ricci	Quelle efficacité d'une gestion à une échelle paysagère large des abondances locales d'adventices? Une approche de modélisation à l'échelle du paysage
Valérie Le Corre	Résistances aux herbicides: cible et non-cible, une gestion différente?
Wilfried Queyrel	Apports de connaissances et méthodes issues de CoSAC pour l'enseignement de spécialisation en école d'ingénieur : exemple du module de conception de systèmes agroécologiques de la dominante Agroécologie pour des Productions Végétales durables (APOGEE) AgroSup Dijon

Introduction

CoSAC, un projet pour la Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement (climat, pratiques agricoles, biodiversité)

Nathalie Colbach ¹, Frédérique Angevin ², Pascale Métails ³, Delphine Moreau ¹,
Loïc Pagès ⁴, Alain Rodriguez ⁵, Christian Bockstaller ⁶ & Fanny Vuillemin ⁷

⁽¹⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France

⁽²⁾ Eco-Innov, INRA, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁽³⁾ ARVALIS Institut du végétal, Biopôle Clermont Limagne, 2 rue Mondor, 63360 Saint Beaulieu, France

⁽⁴⁾ PSH, INRA, Site Agroparc, 84914 Avignon, France

⁽⁵⁾ ACTA, 6 chemin de la côte vieille, 31450 Baziège, France

⁽⁶⁾ LAE, Université de Lorraine, INRA, 68000 Colmar, France

⁽⁷⁾ Terres Inovia, 6 chemin de la côte vieille, 31450 BAZIEGE, France

Correspondance : Nathalie.Colbach@inra.fr

Résumé

Le projet CoSAC regroupe des partenaires de la recherche et du développement afin de (1) quantifier et comprendre, à l'aide d'expérimentations, les effets de pratiques agricoles innovantes sur les adventices et le fonctionnement de l'agroécosystème, (2) développer des outils prédisant les effets des pratiques agricoles et du pédoclimat sur la flore adventice, (3) utiliser ces outils pour concevoir des stratégies de gestion durable des adventices et évaluer leurs performances dans différents contextes de changements (pratiques agricoles, climat, biodiversité), (4) permettre l'adoption de ces stratégies innovantes par les agriculteurs. Ce séminaire final présente les résultats majeurs du projet.

Mots-clés : évaluation multicritère, durabilité, système de culture, adventice, modèle

1. Introduction

Dans le cadre de la réduction de l'usage d'herbicides demandée par les réglementations française et européenne, la gestion des adventices va être amenée à évoluer. La flore adventice est un facteur de réduction de la production mais elle est aussi un des piliers de la biodiversité des paysages agricoles. Il est donc nécessaire de proposer des nouveaux systèmes de culture qui permettent de concilier réduction d'usage des herbicides, production agricole et conservation de la biodiversité en grandes cultures. Le projet CoSAC (ANR-14-CE18-0007) regroupe des partenaires de la recherche et du développement afin de : (1) quantifier et comprendre, à l'aide d'expérimentations, les effets de pratiques agricoles innovantes sur les adventices et le fonctionnement de l'agroécosystème, (2) développer des outils prédisant les effets des pratiques agricoles et du pédoclimat sur la flore adventice, (3a) utiliser ces outils pour concevoir des stratégies de gestion durable des adventices, (3b) évaluer la durabilité globale de ces stratégies dans différents contextes de changement (pratiques agricoles, climat, biodiversité) et (4) permettre l'adoption de ces stratégies innovantes par les agriculteurs. Nous présentons ici les objectifs des différentes tâches (Figure 1).

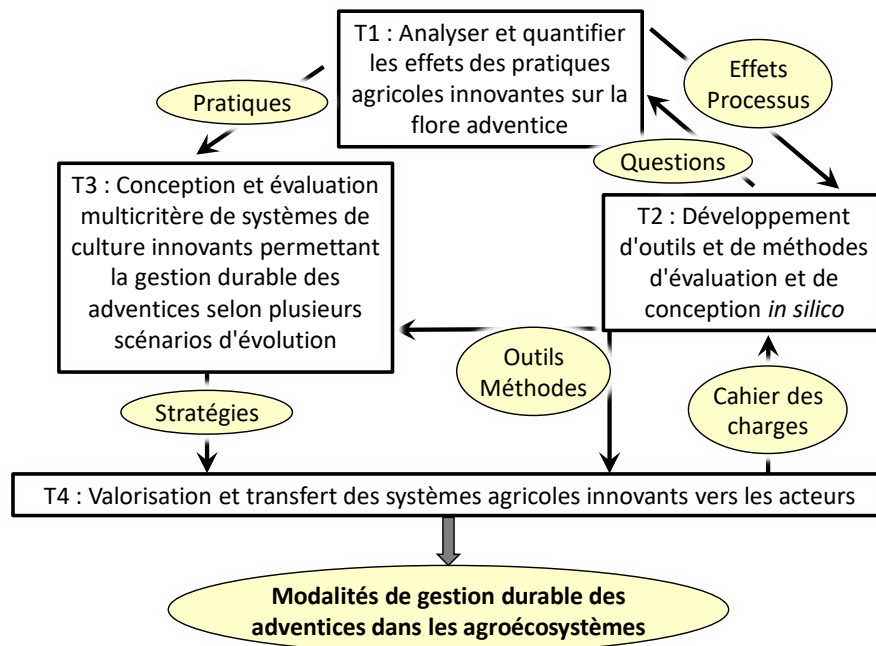


Figure 1. Organigramme du projet CoSAC.

2. Analyser et quantifier les effets des pratiques agricoles innovantes sur la flore adventice

Des essais au champ et en conditions contrôlées ont été menés pour étudier des techniques et/ou combinaisons de techniques innovantes de gestion des adventices et pour lesquelles les mécanismes et processus biophysiques sous-jacents sont mal connus. L'objectif était double : (1) Analyser et quantifier les effets de ces techniques afin d'estimer leur robustesse dans différentes gammes pédoclimatiques et de flores adventices ; (2) Analyser les processus biophysiques sous-jacents à l'aide d'expérimentations analytiques. Les résultats obtenus ont permis de savoir comment améliorer l'efficacité des techniques culturales en optimisant les interactions biologiques et les processus physiques impliqués et ont permis de préparer la modélisation des effets, en identifiant les techniques et processus les plus pertinents à intégrer au modèle FLORSYS (cf. section suivante). Les travaux se sont concentrés sur les stratégies innovantes pour lesquelles un inventaire des nouvelles techniques et des lacunes de connaissances a été réalisé : spatialisation du désherbage chimique à l'intérieur de la parcelle ; diversification des couverts en interculture ou en association ; semis direct ou "strip-till" etc.

3. Développement d'outils et de méthodes d'évaluation et de conception *in silico*

FLORSYS est un modèle de recherche qui prédit les effets des systèmes de culture sur la dynamique de la flore adventice ainsi que son impact sur la biodiversité et la production agricole. Ce modèle a été utilisé comme champ virtuel pour développer des outils et méthodes pour l'évaluation multicritère *in silico* de systèmes de culture et la conception multi-objectif de systèmes de culture innovants pour la gestion durable de la flore adventice (cf. annexe, p. 98).

Pour y parvenir, ce travail a :

- amélioré FLORSYS, à partir notamment des expérimentations évoquées ci-dessus, par l'intégration des techniques culturales innovantes manquantes, la modélisation des processus mal connus initialement et l'ajout d'indicateurs nécessaires pour les évaluer,
- réalisé des simulations avec FLORSYS pour quantifier les effets des techniques et combinaisons de techniques sur les indicateurs de nuisibilité et biodiversité liés à la flore adventice,
- utilisé ces données pour construire des outils plus opérationnels d'évaluation et conception de stratégies de gestion de flore adventice.

4. Conception et évaluation multicritère de systèmes de culture innovants permettant la gestion durable des adventices

Cette étape consistait à proposer des systèmes de culture durables conciliant réduction d'usage d'herbicides, production agricole et conservation de la biodiversité, en tenant compte des freins à l'adoption à l'innovation chez les agriculteurs. Pour ce faire, nous avons :

- Identifié, à partir d'enquêtes, les freins à l'adoption d'innovations techniques concernant la gestion des adventices chez les agriculteurs,
- Évalué une large gamme de systèmes de culture existants (identifiés via des enquêtes en exploitation agricole par ex.) et prospectifs (déjà testés sur les plateformes de prototypage ou conçus à dire d'experts, chercheurs, conseillers et agriculteurs), en termes de nuisibilité et de bénéfices de la flore adventice, à l'aide de FLORSYS et des outils tirés de FLORSYS. Ces simulations ont été réalisées avec des climats actuels et futurs pour évaluer la robustesse des systèmes face au changement climatique,
- Conçu, sur la base de ces diagnostics et en intégrant les résultats des autres tâches (sections 2 et 3), de nouveaux systèmes de culture à dire d'experts et en ateliers avec des agriculteurs, en tenant compte non seulement des freins et leviers à l'adoption mais aussi d'hypothèses sur les changements réglementaires et socio-techniques. Leurs impacts sur la productivité, le contrôle de la flore adventice et la biodiversité ont été prédits par FLORSYS et les nouveaux outils développés dans ce projet,
- Évalué la durabilité globale des systèmes les plus performants identifiés à l'étape précédente grâce à des outils d'évaluation multicritère.

5. Valorisation et transfert des systèmes agricoles innovants vers les acteurs

Afin de faciliter la valorisation et le transfert des résultats vers les acteurs, ces derniers ont été impliqués à différentes étapes du projet via des formations, enquêtes, colloques, ateliers participatifs, lors du développement des nouveaux outils et de la conception et de l'évaluation des nouveaux systèmes de culture. Les outils et résultats produits sont également à la base de modules d'enseignement dans les écoles d'agronomie.

6. Conclusion

Ce projet répondait non seulement aux demandes des pouvoirs publics, notamment dans le cadre du plan Ecophyto, mais aussi à celles des agriculteurs, comme l'a montré leur participation à différentes étapes du projet. Le projet s'est aussi efforcé de transférer les résultats auprès des conseillers car nos travaux suggèrent que les agriculteurs pourraient être plus ouverts à l'innovation que leurs conseillers.

Face à la diversité des contextes de production, des techniques culturales et des critères d'évaluation à considérer, les outils d'aide à la décision sont indispensables pour identifier et proposer des systèmes agricoles multi-performants. Des modèles "champ virtuel" basés sur une représentation mécaniste des processus biophysiques sont souvent uniquement destinés à la recherche, mais nos premières interactions avec les agriculteurs ont montré qu'il y a également une demande pour un tel outil de la part d'agriculteurs visant à régler très finement leurs pratiques culturales.

7. Perspectives

Le projet CoSAC se termine dans quelques mois mais les travaux engagés ici se poursuivent dans d'autres projets. Nous continuons notamment à améliorer le champ virtuel FLORSYS pour y intégrer des nouvelles techniques, cultures et processus dans le cadre de projets français (Casdar RAID) et européens (H2020 ReMIX, IWM PRAISE). Nous appliquerons les méthodes et outils développés ici dans ces mêmes projets pour concevoir des idéotypes variétaux et des systèmes de culture, notamment pour les associations de culture, permettant de concilier production agricole, faible usage d'herbicides et promotion de la biodiversité.

Quelles pratiques permettent de réduire les herbicides sans perdre du rendement ?

Nathalie Colbach & Stéphane Cordeau

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

Correspondance : Nathalie.Colbach@inra.fr

Résumé

L'objectif était d'analyser les pratiques d'agriculteurs afin de comprendre les relations entre usage d'herbicides, niveau d'infestation par les adventices et pertes de rendement. Nous avons collecté et simulé avec FLORSYS 272 systèmes de culture d'agriculteurs de 7 régions avec la flore adventice typique de ces régions, puis sans aucune adventice, et enfin sans l'usage d'herbicides (et ce sans changer les autres pratiques). Les résultats montrent que (1) la perte de rendement augmente avec la biomasse adventice, (2) il n'y a pas de corrélation entre IFT herbicide d'une part, biomasse adventice et perte de rendement d'autre part (3) les agriculteurs compensent la réduction herbicide par des pratiques alternatives ou complémentaires, (4) la perte de rendement liée aux adventices augmentent lorsqu'on supprime les herbicides dans les systèmes sans aucune autre modification, (5) les effets sont plus marqués à l'échelle pluriannuelle qu'à l'échelle annuelle, (6) il existe des stratégies contrastées permettant de réduire à la fois la perte de rendement et l'usage d'herbicides.

Mots-clés : perte de rendement, IFT herbicide, adventice, simulation, nuisibilité, pratiques alternatives

1. Introduction

Les systèmes de culture des agriculteurs sont basés sur une combinaison de pratiques culturales (rotation, travail du sol, fertilisation, désherbage) raisonnées en fonction de l'ensemble de leurs objectifs. Ces pratiques sont souvent corrélées (ex. l'usage de glyphosate est plus important en semis direct et TCS qu'en parcelle labourée) et interagissent entre elles ; elles ne peuvent pas être considérées indépendamment. Par conséquent, il est difficile de quantifier la nuisibilité des adventices pour la production agricole, ou ceux des herbicides sur les adventices et la production, sans tenir compte des autres pratiques mises en œuvre par l'agriculteur. L'objectif de notre étude était d'étudier ces relations à l'aide de simulations pour discriminer ces effets¹.

2. Expérimenter les pratiques des agriculteurs avec un modèle

Les simulations ont été réalisées avec le modèle "parcelle virtuelle" FLORSYS (cf. annexe, p. 98) dans ces actes) qui simule la croissance des cultures et la dynamique de la flore adventice sur le long terme et son impact sur la production agricole et la biodiversité en fonction des systèmes de culture et du pédoclimat. Nous avons simulé 272 systèmes de culture de 7 régions en France et en Espagne, provenant d'enquêtes en exploitation agricole, du réseau Biovigilance-Flore², des chambres d'agriculture, de dire d'experts, etc. Ces systèmes comprennent des systèmes conventionnels et biologiques, avec une intensité de travail du sol allant du labour systématique au semis direct. Les rotations étaient essentiellement basées sur des céréales (blé, orge, maïs) et du colza. Certaines comprennent aussi des légumineuses (luzerne, féverole, pois etc.), des dicotylédones non légumineuses (tournesol, lin etc.) et des prairies temporaires. Ces rotations varient bien évidemment entre les régions de production.

Chaque système de culture a été simulé sur 30 ans pour évaluer leurs effets à long terme, en partant d'une flore adventice typique de ces régions, et répété 10 fois avec différentes séries climatiques de sa région d'origine pour évaluer la robustesse des systèmes face aux aléas climatiques. Ensuite, tous les systèmes de culture ont été simulés sans adventices. La différence de rendement simulé avec et sans

¹ Détails dans Colbach & Cordeau S (2018) Eur J Agron 94:67-78, Colbach & Cordeau (2018) Phytoma 717:

² Le réseau de Biovigilance Flore des grandes cultures a été mis en place en 2002 sur la France métropolitaine afin de surveiller les changements de flore en lien avec l'évolution des pratiques agricoles.

adventices permet de calculer la perte de rendement lié à la nuisibilité des adventices. Enfin, ces mêmes systèmes ont été simulé sans application herbicides (et sans autres changement de pratiques) pour estimer la perte de rendement due à la suppression des herbicides.

3. La perte de rendement est liée à la biomasse adventice

La perte de rendement annuelle médiane augmente avec le rapport de la biomasse adventice sur la biomasse de la culture au début de la floraison de la culture. Lorsque la biomasse adventice dépasse celle de la culture (rapport > 1), la perte de rendement dépasse les 50%. En revanche, aucune corrélation n'a pu être établie entre perte de rendement et densités de plantes d'adventices. Le lien entre adventices et perte de rendement est bien plus visible à l'échelle pluri-annuelle qu'annuelle.

4. L'enherbement ne dépend pas de l'IFT herbicide

Il n'y a pas de relation entre le niveau d'usage herbicide pratiqué d'une part (évalué ici via l'Indice de Fréquence de Traitement IFT³), et le rendement ou la flore adventice d'autre part. Cette absence de relation est d'autant plus marquante que l'efficacité des herbicides dans les simulations dépassait les 60% (en termes de réduction de biomasse adventice), en moyenne sur tous les traitements, espèces adventices considérées, systèmes de culture, années de rotation et séries climatiques.

Pour évaluer l'impact des herbicides, il faut comparer l'enherbement et le rendement entre les simulations avec et sans application d'herbicides. En moyenne, la suppression des herbicides sans autre changement de pratiques augmente la perte de rendement due aux adventices de 20%.

5. Les agriculteurs compensent la réduction des herbicides par des alternatives non chimiques

L'absence de lien entre enherbement et l'IFT herbicide n'est pas surprenant parce que les agriculteurs prennent des mesures compensatoires lorsqu'ils réduisent l'usage d'herbicides. Par exemple, l'usage d'herbicides est plus faible dans les systèmes incluant un travail du sol en hiver au moins un an sur trois que dans les systèmes où le sol est rarement travaillé en hiver. La fréquence de désherbage mécanique est également cruciale. On remarque que dans certaines situations, les agriculteurs ont tendance à "sur-assurer" par rapport aux expérimentateurs, conseillers et chercheurs, augmentant le nombre de passages pour aboutir à une demie et une dose entière d'herbicides de plus par an.

6. Des stratégies contrastées pour concilier contrôle de l'enherbement et faible IFT herbicide

Enfin, nous avons analysé la performance des systèmes de culture pour identifier, parmi les pratiques agricoles collectées, les combinaisons de techniques culturales permettant de simultanément réduire la perte de rendement liée aux adventices et le niveau d'usage herbicides (Tableau 1). Les trois meilleures stratégies sont basées sur des approches très différentes. La première rassemble les monocultures de maïs, avec du travail du sol superficiel à la fois en été et en hiver, sans labour ou avec labour au plus un an sur deux. Le premier travail est retardé d'au moins trois semaines par rapport à la récolte du précédent. Le programme herbicide est similaire d'une année à l'autre, avec plusieurs produits appliqués par an à dose réduite, privilégiant les produits systémiques et évitant les produits racinaires⁴. Les doses réduites constituent un risque majeur de développement de résistance aux herbicides à long-terme, qui a été ici amoindri par le mélange de produit et un programme de plusieurs passages de désherbage mécanique, mais pas nécessairement tous les ans ou en fréquence variable d'une année à l'autre.

³ Un IFT de 1 correspond à l'application d'un herbicide par campagne, à la dose réglementaire sur l'ensemble du champ.

⁴ Les herbicides foliaires pénètrent dans la plante via les parties émergées et ne détruisent que des plantes levées au jour du traitement. Les herbicides racinaires pénètrent via les racines ; ils persistent pendant plusieurs jours voire semaines et détruisent les plantes (levées ou non) dont les racines se situent dans les horizons superficiels du sol. Les herbicides pseudo-racinaires sont également persistants ; ils sont étalés à la surface du sol et détruisent les adventices lors de leur levée.

La deuxième stratégie est basée sur les rotations diversifiées dans le temps (avec des rotations de 4 ans ou plus) et/ou dans l'espace (avec des mélanges de cultures ou des cultures de couverture), combinant à la fois cultures de printemps et cultures d'hiver. Il s'agit soit de cultures d'hiver très longues (ex. colza), soit de cultures d'hiver plus courtes ou de cultures de printemps précédées de couverts intermédiaires. La récolte est suivie rapidement du premier travail du sol, avec des opérations fréquentes, notamment en été. Les systèmes comprennent toujours du labour, notamment en hiver, mais au plus un an sur deux. Le programme chimique est simplifié par rapport à la première stratégie et variable entre années, lié à la rotation diversifiée, et évitant les passages de printemps en cultures d'hiver. Le désherbage mécanique est similaire à celui de la première stratégie.

La troisième stratégie va encore plus loin dans la diversification des rotations, en incluant aussi des prairies temporaires. Il y a peu de cultures de couverture, laissant place à des intercultures nues plus longues et un travail du sol très fréquent, notamment en été. Les systèmes sont tous labourés au moins un an sur trois en hiver, et ce au moins deux mois avant le semis. Aucun point commun entre les différents systèmes de culture utilisant cette stratégie n'a pu être identifié pour les programmes herbicides ou désherbage mécanique.

7. Pas de pratique miracle à elle seule

S'il a été possible d'identifier des stratégies gagnantes (réduisant simultanément la perte de rendement et le niveau d'usage herbicides) et des stratégies perdantes (augmentant la perte de rendement ou l'usage d'herbicides), il n'a pas été possible d'identifier une ou quelques pratiques permettant de discriminer les deux types de stratégies. Par exemple, tout comme les stratégies gagnantes, les perdantes comprennent aussi bien des systèmes labourés et rarement labourés, des traitements herbicides fréquents ou plus rares, des doses herbicides réduites ou pleines. Ceci démontre de nouveau que ce n'est pas un seul choix technique qui détermine le succès ou l'échec d'un système, mais la combinaison judicieuse de toutes les composantes du système.

Tableau 1. Typologie de systèmes de culture d'agriculteurs en fonction de leur performance en termes de réduction de perte de rendement et d'usage herbicides. Pratiques de gestion majeures des trois meilleures stratégies basées sur 272 systèmes de culture collectés dans 7 régions et simulés avec FLORSYS sur 30 ans et avec 10 répétitions climatiques. Des cellules vides indiquent qu'il n'y a pas de point commun pour ces techniques et type de stratégies.

Perte de rendement		< 10%	< 20%	< 20%
Intensité d'usage herbicides (IFT)		< 0.8	< 0.8	< 1.2
Risque d'échec ^s		0%	0%	0%
Rotation	% cultures d'hiver	0%	25-75%	15%-64%
	% cultures de printemps	100% (maïs)	25-75%	> 36%
	% prairies temporaires	0%	< 20%	> 20%
	Nombre de cultures et variétés	1	> 4	
	Durée du couvert cultivé (/an)	< 6 mois	> 8.3 mois	< 8 mois
Travail du sol	Opérations superficielles /an	< 3.4	> 3.4	> 3.4
	En été /an (avril-sept)	< 2.4	> 2.4	> 2
	1 ^{er} travail (depuis récolte)	> 24 jours	< 24 jours	
	Fréquence de labour	< 1 an /2	< 1 an /2	
	Fréquence de labour oct-Mars		> 1 an / 5	> 1 an /3
Herbicides	1 ^{er} herbicide (depuis semis)	< 5 mois	< 5 mois	
	Dose (% dose pleine)	31-58%	< 58%	
	Produits par an	1.3-3	1.3-2.1	
	Variable entre années	Non	Oui	
	% Systémiques	> 82%	< 82%	< 83%
Désherbage mécanique	Racinaires	< 12%	< 12%	
	Opérations par an	0.25-1.6	0.25-1.6	
	Variable entre années	Oui	Oui	

^s Échec = perte de rendement > 40% ou IFT > 1.6 moyenné sur la rotation

Conférences invitées

Concevoir pour et avec les agriculteurs : quels défis pour la recherche ?

Marianne Cerf & Lorène Prost

UMR LISIS, CNRS, ESIEE Paris, INRA, UPEM, Université Paris-Est, 77454 Marne-La-Vallée, France

Correspondance : marianne.cerf@inra.fr

Résumé

La mise à l'agenda par les pouvoirs publics de la réduction des pesticides puis de l'agro-écologie a été source de nombreux travaux scientifiques affichant le souci d'aider les agriculteurs à mettre en œuvre des pratiques agricoles permettant de répondre à ces injonctions. Mais de quelles connaissances et soutien ont besoin les agriculteur.rices pour réussir à faire évoluer leurs pratiques vers l'agro-écologie ? S'agit-il de leur proposer des leviers dont l'efficacité est avérée, voire des systèmes aux performances connues ? Ou s'agit-il de favoriser une exploration entre un souhaitable et un possible et d'outiller leur capacité à construire cette exploration ? Pour la recherche, les dispositifs à mettre en place dans un cas ou dans l'autre ne sont sans doute pas les mêmes, et le travail de recherche repose sur des méthodes sans doute différentes. L'exposé sera l'occasion d'éclairer ces différences et d'initier un débat sur la diversité des façons dont la recherche conçoit pour et avec les agriculteur.rices.

Mots-clés : conception, participation, agro-écologie

1. Introduction

Il est rare aujourd'hui de ne pas entendre parler de conception ou de reconception des systèmes de culture dès lors que sont évoqués les enjeux de transition vers l'agro-écologie. Selon Meynard et al. (2006) ou Berthet (2014), les enjeux auxquels l'agriculture fait face nécessiteraient de déployer de la conception innovante pour la réinventer en profondeur. Mais en invoquant ce besoin de conception innovante, ou tout simplement de conception, que veut-on mettre en exergue par rapport au travail de recherche que cela impulse ou induit pour les agronomes⁵ ? Salembier et al. (2018) en revisitant les pratiques des agronomes depuis le 18^{ème} siècle, mettent en avant que ces derniers ont toujours mis en œuvre des raisonnements de conception, mais que ceux-ci ne s'inscrivent pas toujours dans les mêmes dispositifs de production de connaissances et de rapport aux acteurs et à l'action. Ils distinguent ainsi plusieurs régimes de conception qui coexistent aujourd'hui. Ainsi, comme le souligne Prost (2018), derrière le terme conception, les agronomes engagent un certain nombre de compétences, outils, étapes, savoir-faire. Ils ont développé leurs propres méthodes de rationalisation de cette activité qui consiste à produire des artefacts matériels ou immatériels : diagnostic, outils d'évaluation, conception participative, modélisation, expérimentation, prototypage, conception *de novo* et conception pas à pas. Mais si l'agronome a développé ces savoirs et savoir-faire de conception est-ce pour autant suffisant pour que les agriculteurs, à leur tour, s'engagent dans des processus de conception ou re-conception de leurs systèmes de cultures ? De fait, si, comme le mettent en avant de nombreux auteurs, l'agro-écologie suppose une plus grande adaptabilité à chaque agroécosystème, ne faut-il pas considérer que les agriculteurs doivent être en mesure de concevoir eux-mêmes leurs systèmes ? Et dans ce cas, quelles conséquences cela peut-il avoir pour le travail de recherche et la façon dont les chercheurs travaillent avec les agriculteurs ? Nous proposons de débattre de ces questions en clarifiant trois points. Nous proposerons d'abord quelques éléments qui permettent de distinguer une activité de conception et une

⁵ Dans la suite du texte, pour désigner les femmes et les hommes qui travaillent dans la recherche, le conseil, ou dans l'agriculture, j'utiliserai la forme masculine pour alléger

activité de découverte scientifique. Nous présenterons ensuite les différents régimes de conception qui ont marqué l'histoire des agronomes et les dispositifs et démarches de conception qu'ils privilégient. Nous pointerons enfin ce que peut signifier l'activité de conception pour un agriculteur et les conséquences que nous pouvons en tirer sur le plan d'un travail de recherche qui viserait à soutenir l'activité de conception des agriculteurs.

2. Activité de conception et activité scientifique

La conception, comme activité professionnelle, relève à la fois d'une activité ingénierique à travers le « engineering design » dont l'essor date des années 1950, et d'une activité artistique « le design ». Ce qui réunit ces deux activités est qu'elles renvoient, comme l'a dit Simon (1969), à une activité qui vise à définir de nouveaux objets ou artefacts ou cours d'action dont l'objectif est de changer les situations existantes en situations qui sont désirables. Plus précisément, la conception pour Simon consiste à définir la façon dont les choses pourraient être, plutôt qu'à découvrir ce qu'elles sont : c'est bien ce qui distingue l'activité de conception d'une activité scientifique. La conception implique un dessein, une visée relative au futur. En conséquence, il est nécessaire de questionner la façon dont cette vision est construite, par qui, dans quelles arènes, et la contribution que le scientifique y apporte. La conception implique une dimension artefactuelle (opposée ici à naturelle) par laquelle le dessein se concrétise, prend forme et a un potentiel transformateur par rapport à l'existant. La façon dont s'opère ce processus, le dialogue entre le souhaité et le possible (Béguin & Cerf, 2004) est au cœur des activités de conception. Là encore qui contribue à construire ce dialogue, comment est-il construit, et quelle place y occupe le scientifique ? La conception peut donc se regarder comme une activité à part entière, et ce même si elle peut s'articuler à une activité scientifique de découverte d'un réel déjà là. Dès lors, on peut s'interroger sur les raisonnements et les modes d'organisation qui rendent cette activité possible ou peuvent la contraindre, et à l'éthique nécessaire pour la mettre en œuvre compte tenu des visées transformatrices qui sont ontologiques de la conception. Comment cela s'est-il fait en agronomie ?

3. Différents régimes de conception

Salembier et al. (2018) ont distingué cinq régimes de conception depuis le milieu du 18^{ème} siècle avec l'ambition de comprendre les conditions d'émergence de certains raisonnements de conception. Le Masson et al. (2013) ont proposé de caractériser un régime de conception par le raisonnement tenu, le modèle d'organisation et la logique de performance adoptés, chaque régime pouvant résulter dans des produits différents. Le modèle organisationnel renvoie aux parties prenantes, leur rôle et la façon dont s'opère la coordination pour définir des intérêts communs en vue de conduire une exploration. La logique de performance concerne l'intention relative au futur, les critères pris en compte pour conduire une exploration et les moyens mobilisés pour ce faire. Dans leur analyse, Salembier et al. (2018) pointent l'évolution des méthodes développées pour soutenir la production des connaissances et des artefacts en cours de conception, méthodes qui, comme dans le monde industriel, visent à rationaliser ces processus.

Concernant plus précisément la conception de systèmes de cultures, depuis la fin des années 90, plusieurs propositions méthodologiques ont été faites : modélisation (e.g. Bergez et al., 2010), expérimentation (e.g. Debaeke et al., 2009; Silva and Tchamitchian, 2018), prototypage (Vereijken, 1997; Lançon et al., 2007). Comme le souligne Prost (2018), « ces trois types d'outils sont aujourd'hui largement panachés et cohabitent sous un terme de *prototypage* qui est presque devenu un terme générique pour décrire la conception de systèmes de culture ». Le prototypage décrit finalement le fait de prendre le temps de construire un prototype théorique à partir d'un travail collectif de définition des objectifs. Modèles, bases de connaissances structurées ou mise en commun de connaissances scientifiques, expertes, générales ou contextuelles, peuvent alimenter la phase de génération de prototypes. L'ajustement des prototypes se fait dans le cadre de démarches d'évaluation déployées *ex ante* (avant implémentation) ou *ex post* (au fur et à mesure du test *in situ* du système de culture). Le cercle des parties prenantes est plus ou moins divers selon les cas, et peut varier au cours du processus.

Mais comment ce travail de prototypage peut-il être conduit avec et pour les agriculteurs, et est-ce la seule façon de soutenir une dynamique de conception en agriculture au service d'une transition vers l'agro-écologie ? Il nous semble nécessaire de faire un détour par une meilleure compréhension de l'activité de l'agriculteur

4. L'agriculteur concepteur

Dès la fin des années 70, des chercheurs pointent que « les agriculteurs ont de bonnes raisons de faire ce qu'ils font ». Les agronomes, en lien avec les sciences humaines et sociales, se sont dotés de cadres d'analyse pour en rendre compte, en s'intéressant aux pratiques agricoles pas uniquement à travers leurs effets sur l'agroécosystème mais comme le fruit d'un processus social et cognitif. Ces cadres permettent : (i) d'appréhender les visées relatives au futur de chaque agriculteur ou collectif agricole et la façon dont ces visées organisent les processus de production au sein de l'exploitation, (ii) de représenter les processus de décision face à la variabilité des situations, (iii) de comprendre la façon dont se construit le sens des pratiques. Néanmoins peu de travaux se sont intéressés à l'agriculteur comme concepteur. C'est plutôt du côté de l'ergonomie et des sciences de gestion que se fait jour une réflexion à ce sujet vers le milieu des années 1990. Et c'est dans des collaborations renouvelées avec les sciences humaines et sociales qu'à partir des années 2010, un ensemble de travaux est mené par des agronomes pour comprendre la façon dont les agriculteurs réalisent des transitions vers l'agriculture biologique, la réduction des pesticides, l'agriculture durable. Plus récemment encore, différents travaux s'intéressent à l'activité de conception collective entre agriculteurs ou entre agriculteurs et d'autres parties prenantes. Ces travaux soulignent que comprendre l'activité de conception de l'agriculteur implique de s'intéresser au raisonnement qu'il tient pour définir une visée relative au futur, de comprendre l'activité qu'il mène pour articuler ce qu'il souhaite et ce qu'il est possible de mettre en œuvre, et de l'outiller pour cela. Mais c'est aussi comprendre comment cette activité est distribuée entre différents acteurs que l'agriculteur sollicite ou qui sollicitent ce dernier. Il s'agit alors de s'interroger sur la façon dont l'activité de conception des agriculteurs est inscrite dans une activité de conception distribuée entre acteurs et ce que cela a comme conséquences pour le chercheur agronome. En quoi cela va au-delà de la simple participation ?

5. Soutenir l'activité de conception de l'agriculteur ou l'impliquer dans les processus de conception de l'agronome ?

De nombreux travaux aujourd'hui revendiquent la mise en œuvre de démarches participatives pour concevoir des systèmes de cultures avec et pour les agriculteurs. Mais impliquer les agriculteurs dans la conception de prototypes qui sont testés ensuite en station expérimentale, est-ce contribuer de la même façon à leur activité de conception que développer des bases de connaissances et des indicateurs ou des méthodes comme des plateaux de jeu qui sont destinés à fournir des ressources facilitant la conception collective entre agriculteurs ou entre agriculteurs et d'autres parties prenantes ? Si cela renvoie à des régimes de conception différents selon Salembier et al. (2018), cela renvoie aussi à une activité différente de production de connaissances et d'instrumentation pour le chercheur. Il y a un déplacement possible de l'objet de la conception pour l'agronome et c'est sans doute ce qu'il faut instruire : s'il s'agit d'aider l'agriculteur à concevoir, qu'est-ce que l'agronome doit produire comme connaissances, comme instrumentation, comme idées ? Comment peut-il contribuer à la mise en forme de nouveaux systèmes sans imposer une forme et rester ainsi ouvert à la pluralité des desseins et de leur concrétisation ? Cela passe notamment par une meilleure connaissance, pour les agronomes, de ce que sont des processus de conception. Ces derniers incluent, nous l'avons dit : des échanges autour de la volonté relative au futur (le souhaitable), des temps de créativité, d'exploration et de tri de solutions possibles, de tests et d'itérations entre le souhaitable et le possible. L'agronome peut participer à la construction de la visée relative au futur, mais aussi apporter des contributions spécifiques à chacun des temps du processus. Par ailleurs, dans la mesure où l'on reconnaît que la conception est collective et distribuée et s'inscrit dans un projet relatif au futur, comment l'activité de conception d'un scientifique agronome se définit en

tension entre cette dynamique collective et celle qui organise l'activité scientifique ? Et *in fine*, comment l'agronome collabore-t-il non seulement avec les agriculteurs mais avec d'autres disciplines, en particulier les sciences humaines et sociales, pour mieux appréhender la façon dont s'organise, se déploie, l'activité collective de conception avec et pour les agriculteurs ?

6. Remerciements

Ce texte bénéficie des échanges qui ont lieu dans le cadre d'IDEAS (Initiative for Design in Agrifood Systems).

7. Références

- Béguin, P. and Cerf, M. 2004. Formes et enjeux de l'analyse de l'activité pour la conception des systèmes de travail. *Activités* 01(1–1).
- Bergez, J.-E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.-H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., and Sadok, W. 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32(1):3–9.
- Berthet, E. T. A. 2014. Concevoir l'écosystème, un nouveau défi pour l'agriculture. Mines ParisTech.
- Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J.-M., Faloya, V., and Saulas, P. 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and casestudies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29(1):73–86.
- Lançon, J., Wery, J., Rapidel, B., Angokaye, M., Gérardaux, E., Gaborel, C., Ballo, D., and Fadegnon, B. 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable development* 27(2):101–110.
- Le Masson, P., Hatchuel, A., Weil, B., Mina, D., 2013. Teaching at Bauhaus: improving design capacities of creative people? From modular to generic creativity in design-driven innovation. In: 10th European Academy of Design Conference: Crafting the Future, pp. 23 (p. hal-00903440).
- Meynard, J. M., Aggeri, F., Coulon, J. B., Habib, R., and Tillon, J. P. 2006. Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants. INRA.
- Prost L. (2018). Le design est-il un concept utile pour les agronomes ? *AES*, 8 (2), <https://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/revue-aes-vol8-n2-decembre-2018-agronomie-et-design-territorial/revue-aes-vol8-n24-decembre-2018-agronomie-et-design-territorial/>.
- Salembier, C., Segrestin, B., Berthet, E., Weil, B., and Meynard, J.-M. 2018. Genealogy of design-reasoning in agronomy: Lessons for supporting the design of agricultural systems. *Agricultural Systems* 164:277–290.
- Silva, E. M. and Tchamitchian, M. 2018. Long-term systems experiments and long-term agricultural research sites: Tools for overcoming the border problem in agroecological research and design. *AGROECOLOGY AND SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS* 42(6):620–628.
- Simon, H. A. 1969. The sciences of the artificial. MIT press.
- Vereijken, P. 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *Developments in Crop Science* 25:293–308.

Les métiers de la R&D et du conseil à l'épreuve de la gestion durable des adventices.

Marianne Cerf ¹ & Bertrand Omon ²

⁽¹⁾ UMR LISIS, CNRS, ESIEE Paris, INRA, UPEM, Université Paris-Est, 77454 Marne-La-Vallée, France

⁽²⁾ Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie, DIRD, 6 rue des Roquemonts - CS 45346, 14053 CAEN Cedex 4

Correspondance : marianne.cerf@inra.fr

Résumé

L'accompagnement stratégique du changement de pratiques agricoles est devenu un leitmotiv au sein des organisations de conseil aux agriculteur.rices et fait l'objet d'une réflexion tant dans ces organisations qu'au niveau des pouvoirs publics. Si l'on se place au niveau de l'activité de l'agronome de terrain, comment parvient-il à travailler avec les agriculteur.rices pour développer de nouvelles façons de produire moins consommatrices d'intrants et plus attentives à la mobilisation des régulations biologiques au sein du champ ? A partir de l'exemple de la gestion des adventices, nous illustrerons la façon dont ce qui se joue dans l'interaction avec les agriculteur.rices doit être repensé et ce que cela modifie pour le travail de l'agronome de terrain dans ses relations avec les agriculteur.rices et les acteurs de la R&D. Cela permettra alors de se questionner sur les évolutions des métiers de la R&D et du conseil pour accompagner les agriculteur.rices dans le changement de pratiques.

Mots-clés : conseil, accompagnement, transition agroécologique, agronomie

1. Introduction

Depuis les années 1980, le processus d'élaboration de savoirs d'action pour et avec les agriculteurs⁶ s'est opéré dans un contexte d'artificialisation des milieux permettant de réduire la variabilité des milieux et situations culturelles. Dans le cas des adventices, cette réduction de la variabilité s'est appuyée essentiellement sur une régulation chimique croissante de la flore adventice. Le développement de l'agroécologie, dès lors qu'il repose notamment sur la mobilisation des régulations biologiques et vise également à réduire les impacts environnementaux de l'agriculture vient bousculer la capacité à réduire cette variabilité. Ainsi que le soulignent différents auteurs (Doré *et al.*, 2011 ; Barbier & Goulet, 2013 ; Girard, 2014), cela vient à remettre en cause le processus de production de savoirs agronomiques d'action tel qu'il a été construit historiquement.

Ainsi, la transition agro-écologique est une occasion de s'interroger tant sur les modes d'élaboration des connaissances agronomiques que sur le modèle de développement agricole qui les rend disponibles et accessibles aux agriculteurs, en particulier via la relation de conseil. En effet, les conseillers doivent-ils (elles) aller au-delà d'une identification de leviers agronomiques ou solutions techniques qui peuvent être proposés aux agriculteurs pour gérer des agro-éco-systèmes ? Leur expertise est-elle d'animer des échanges entre des agriculteurs pour leur permettre de coproduire des savoirs et normes d'action en s'appuyant essentiellement sur l'expérience des agriculteurs ? Existe-t-il un entre-deux permettant au conseiller de remobiliser son raisonnement et ses connaissances agronomiques autrement qu'en

⁶ Dans la suite du texte, je resterai sur agriculteur pour désigner les femmes et les hommes qui travaillent en agriculture, afin d'alléger l'écriture. De même j'utilise le terme au masculin pour désigner les femmes et les hommes qui travaillent dans les métiers du conseil et de l'accompagnement des agriculteurs.

proposant des indicateurs et des règles de décision pour réaliser des interventions en saison comme cela s'est largement développé depuis les années 1990 ? Comment les conseillers eux-mêmes considèrent-ils les évolutions de leur métier et se repositionnent-ils dans la relation de conseil ? Comment ce faisant, participent-ils à une transformation des dispositifs de production de savoirs d'action pour et avec les agriculteurs ?

2. Des dispositifs de R&D et de conseil qui cadrent l'activité de conseil

Après la seconde guerre mondiale, les organisations de R&D et de conseil en agriculture se sont construites à partir d'une vision linéaire des processus d'innovation. Dans ce contexte, l'agriculteur est vu comme celui qui doit adopter une solution (la « bonne pratique ») ou s'approprier une connaissance plutôt que de participer à leur production ou à leur adaptation. A partir des années 80, s'est développé au sein des structures de conseil ce qui s'appelle l'appui technique : les conseillers interagissent avec les agriculteurs pour transmettre des critères, seuils, règles de décision, leviers agronomiques, itinéraires techniques et aider les agriculteurs à les contextualiser. Cela s'opère souvent lors de visites de champs en cours de campagne, individuelles ou collectives, appelées « tour de plaine »⁷. Cela s'accompagne du développement de dispositifs expérimentaux souvent fondés sur des essais analytiques multi-locaux menés par les acteurs du développement agricole. Enfin, cela repose sur une analyse du fonctionnement du peuplement cultivé dans des conditions optimisées via l'usage d'intrants permettant d'exprimer le potentiel des cultures. Dans ce schéma, une difficulté réside dans la façon de mettre en résonance les savoirs d'action collectifs ou individuels des agriculteurs et ceux élaborés essentiellement par le biais de travaux expérimentaux au sein desquels la variabilité des situations est surtout abordée *en jouant sur* une différenciation des solutions de régulation chimique testées.

Des pratiques alternatives ont cependant toujours existé qui ont privilégié la production de connaissances au sein de collectif d'agriculteurs : l'agent de développement est alors en position d'animer un processus d'échange entre pairs pour aider à élaborer les connaissances utiles à chaque participant et contribuer à l'affirmation d'un ensemble de normes professionnelles. L'apport de connaissances venant de l'extérieur du groupe est fait par des agriculteurs innovants repérés en dehors du collectif, des experts sollicités pour leurs connaissances relatives à différents compartiments de l'agroécosystème, etc.. L'animateur *aide alors à faire émerger le débat entre l'expert et les agriculteurs sans pour autant se positionner en agronome*. Structuration de l'espace d'échange sur les pratiques et identification des experts sont ici au cœur de la relation d'accompagnement développée par ces agents. Une difficulté réside pour eux, comme pour les agriculteurs qu'ils accompagnent, à donner de la valeur aux savoirs produits collectivement et sur la possibilité de transmettre ces derniers à d'autres agriculteurs ou de les rendre enseignables.

3. Tenir conseil : l'enquête au cœur du conseil

Les travaux réalisés dans le cadre du RMT SdCi⁸ et le projet CHANGER ont mis en avant l'importance de développer ces pratiques alternatives pour accompagner les agriculteurs vers des pratiques agroécologiques. Ils mettent en lumière que pour les agronomes de terrain, il y a un enjeu à passer d'une posture de « donner un conseil » à celle de « tenir conseil ». Mais que veut dire tenir conseil et qu'est-ce que cela suppose comme façon de travailler avec les agriculteurs ?

De fait, les conseillers agricoles doivent intervenir auprès des agriculteurs avec un but inédit pour eux : aider à changer la norme des pratiques agricoles, alors même que les résultats de ce changement ne sont

⁸ RMT SdCi : Réseau Mixte Technologique Système de cultures innovants. Projet CHANGER qui porte sur la mise en place de dispositifs d'échange sur le métier de conseil au sein des organisations de conseil. Les deux sont financés par des fonds Cas-Dar du Ministère de l'agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt. Voir <https://www6.inra.fr/systemesdecultureinnovants/>

pas garantis. Pour l'agronome de terrain et les agriculteurs, faire advenir l'agro-écologie les entraînent à modifier leur rapport aux savoirs agronomiques et à renégocier le contrat (formel ou non) passé entre eux à propos des conditions de réalisation du conseil et de son rôle dans la transformation effective des pratiques. Plus précisément, leur rapport aux savoirs d'action et à leur production change sous plusieurs angles. Le premier angle est technique. Pour sortir de la dépendance aux intrants, conseillers et agriculteurs doivent replacer le triptyque sol-plante-climat dans le temps et l'espace d'un agroécosystème et identifier comment le piloter prioritairement *via* des régulations biologiques et des techniques agro-écologiques. Si le concept de « système de cultures » vise à saisir cette étendue du champ conceptuel, le rendre opérationnel pour l'action ne va pas de soi. Cela ne peut pas se faire comme par le passé en produisant des références techniques à partir d'essais analytiques. Les essais "système" peuvent être un lieu d'échange pour cerner le raisonnement mis en œuvre mais cela ne fait pas tout. Le second angle est cognitif. Les conseillers comme les agriculteurs doivent être en mesure de produire les anticipations utiles à la conduite des cultures dès lors que les moyens pour corriger des facteurs limitants la production sont réduits. Sur quelles bases asseoir ces anticipations quand les incertitudes sur les résultats produits sont fortes du fait des délais de réponse de l'agroécosystème et des « trade-offs » nécessaires entre composantes de cet agroécosystème pour assurer un équilibre dynamique en son sein ? C'est le cas par exemple pour la gestion des adventices en jouant sur une combinaison systémique des pratiques : celle-ci ne porte ses fruits que très partiellement sur une première campagne et ses effets ne pourront être évalués que sur plusieurs campagnes de mise en œuvre. Certes, le délai de réponse est d'autant plus court que la rupture dans les façons de gérer est forte. Néanmoins, le résultat reste difficile à anticiper car soumis à la variabilité des effets obtenus pour les différentes pratiques combinées mises en place. Le binôme agriculteur (seul ou en groupe) –conseiller doit assumer cette incertitude au moment de concevoir une combinaison, lors de sa mise en œuvre et jusqu'à l'évaluation agronomique. Il s'avère peu pertinent de vouloir décider les pratiques à combiner sur la base des résultats d'expérimentations factorielles : par exemple ceux conduits sur la pratique du seul faux semis fournissent des résultats extrêmement variables sans que les causes soient bien connues. Néanmoins, le binôme peut choisir de viser une réduction des stocks d'avertices et des pressions initiales en assumant la variabilité de l'effet obtenu sur une année. Finalement cette acceptation de l'incertitude par le binôme peut devenir un atout pour s'engager dans la voie d'une re-conception systémique. Le troisième angle est social : la position et la posture du conseiller dans la relation de conseil sont revisitées car les effets transformateurs du conseil sont d'autant plus difficiles à évaluer que les effets des pratiques agro-écologiques sont différés dans le temps long (par exemple pour la gestion des adventices, mais aussi l'amélioration de la qualité de l'eau...). Ces trois dimensions sont particulièrement présentes pour la gestion des adventices.

Le travail mené dans le RMT SdCi entre 2008 et 2011, puis dans le projet CHANGER a permis aux conseillers d'échanger sur les évolutions auxquelles ils sont confrontés et surtout de repenser l'exercice de leur métier. En parlant de conseil à froid qu'ils contrastent avec le conseil à chaud, ils re-normalisent le travail à réaliser pour aborder le nouveau champ spatio-temporel à prendre en compte. Parallèlement, ils prennent conscience de la nécessité de réaliser une enquête conjointe sur l'agroécosystème et les attentes des agriculteurs à différents niveaux comme, sur le plan agronomique, sa tolérance aux adventices. Cette enquête sur le terrain devient une opportunité de questionner les normes antécédentes mises en place pour évaluer un « beau champ », une situation « qui convient ». Mais l'enquête conjointe peut aussi se déplacer entre les murs d'une salle, quand il s'agit de co-construire les grandes lignes d'un système de cultures qui répond à des attentes et des problèmes qu'expriment alors un ou des agriculteurs. Nous illustrerons ce que cela signifie concrètement dès lors qu'il s'agit de la gestion durable des adventices.

4. Des dispositifs et méthodes à repenser pour étayer l'enquête conjointe

Maîtriser ce processus d'enquête conjointe entre l'agriculteur et le conseiller devient alors essentiel pour le conseiller. Si le questionnement devient clé, celui-ci n'est efficace que s'il parvient à aider l'agriculteur à se construire de nouveaux repères en adéquation avec les leviers d'action qu'il choisit de mettre en œuvre en lien avec son projet de gestion de l'agroécosystème. De plus, le questionnement, pour être efficace, doit aussi contribuer à maintenir une capacité d'étonnement vis-à-vis des situations

observées pour permettre de rediscuter des normes d'évaluation d'un « beau champ » ou d'un travail « bien fait ». Dans ce contexte, quels sont les dispositifs expérimentaux ou les bases de connaissances utiles au conseiller pour tenir conseil ? Quelle contribution du conseiller à leur conception et mise en œuvre afin de tirer aussi profit des enquêtes qu'il met en place avec les agriculteurs ? Comment l'aider à repérer les expériences à partager entre agriculteurs et à mettre en place les situations au champ ou en salle qui permettront de mettre en évidence les interactions dans l'agroécosystème et l'influence des pratiques agricoles sur ces interactions ? Comment permettre à un collectif d'expérimenter de nouvelles pratiques dans leur exploitation et de les évaluer pour qu'ils apprennent à gérer autrement l'agroécosystème ? Quels rôles peuvent jouer les collègues pour permettre d'explorer ensemble des façons de faire efficaces pour conduire cette enquête conjointe sur l'agroécosystème ? Répondre à de telles questions revient à remettre aussi en débat les activités de R&D. Si jusqu'ici elles visaient surtout à la contextualisation des connaissances ou des innovations conçues pour être génériques, elles devraient aujourd'hui produire les savoirs utiles à la réalisation de l'enquête conjointe entre agriculteurs et conseillers et permettre au conseiller comme aux agriculteurs d'être porteurs à la fois de nouvelles solutions et de nouvelles interrogations quant à la gestion des interactions dans les agroécosystèmes.

Processus de création variétale dans le cas des plantes de service

Nathalie Harzic & Annick Basset

Jouffray-Drillaud, 4 av de la CEE, 86170 Cissé, France

Correspondance : nharzic@jouffray-drillaud.fr

Résumé

Le processus de création variétale vise à proposer à l'utilisateur final (professionnel ou amateur) une variété apportant un progrès dans son usage. Dans le cadre agricole, ces utilisations s'avèrent de plus en plus diversifiées afin d'améliorer la performance économique et environnementale des exploitations. Les sélectionneurs doivent ainsi anticiper ces nouveaux usages et adapter leurs critères de sélection, en se conformant au cadre réglementaire de la commercialisation des semences. En France, la majorité des espèces utilisées pour un service agricole doivent subir un processus d'inscription sur un catalogue. Face aux nouveaux enjeux agroécologiques, le CTPS⁹, instance gérant le catalogue dans le cadre de sa mission d'appui au Ministère chargé de l'agriculture pour l'inscription des variétés, oriente la sélection en proposant, notamment, la revendication d'usage de plante de service.

Mots-clés : Sélection, variabilité génétique, plante de service

1. La sélection est orientée vers des marchés existants ou émergents

L'objectif de la création variétale est de réunir dans une structure génétique reproductible un maximum de gènes pour des caractères recherchés. En amont de ce processus technique, le sélectionneur doit pouvoir définir les caractères à assembler pour donner à la variété une valeur d'usage, correspondant à un marché. Traditionnellement, l'usage vise à remplir le service de production : la culture est réalisée pour récolter un produit qui sera vendu ou qui acquerra de la valeur sur l'exploitation par sa transformation principalement dans l'alimentation animale. Dans ce cas, la sélection sera orientée par la maximisation de la production, dans un contexte pédoclimatique donné. Les critères de sélection seront de façon générique, l'augmentation du rendement, la résistance aux stress biotiques et abiotiques, la qualité du produit récolté.

La sélection doit aussi proposer des innovations répondant aux problématiques émergentes de l'agriculture. Ainsi, elle accompagne les agriculteurs dans la transition agroécologique, en proposant de nouvelles fonctionnalités, ou services, aux variétés. La notion de plante de services est apparue suite aux études sur le renforcement des interactions biologiques entre les différentes composantes de l'agrobiodiversité (Altieri et Nicholls 2004) et à la popularisation de la notion de services écosystémiques (Millennium Ecosystem Assessment, 2001-2005).

La plante de service est une plante additionnelle cultivée en association ou en interculture, pour les services écosystémiques qu'elle fournit, mais qui n'est pas récoltée. Ces services sont principalement liés aux processus de régulations ou de recyclage des nutriments. Les conséquences attendues de l'usage de ces plantes de service leur donne une valeur : limitation de l'usage d'intrants (herbicides, fongicides, insecticides, engrais azotés ...) ou aide à la résolution d'impasse techniques notamment en agriculture biologique. Une plante récoltée peut aussi apporter un service non marchand, qui peut lui conférer une valeur supplémentaire : c'est le cas de l'amélioration du pouvoir couvrant des variétés de céréales utilisées en agriculture biologique.

Le tableau 1 illustre quelques services, ainsi que les caractéristiques variétales à rechercher. Le sélectionneur définit ainsi un idéotype, ou image de la variété qu'il vise, en fonction de l'usage et donc du marché visé. Les caractères à assembler dans cet idéotype ne seront retenus comme critère de sélection que si ils apportent une plus-value technique, valorisable commercialement.

⁹ Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées

Tableau 1. Quelques hypothèses sur les relations entre services et caractères qui seraient à sélectionner.

Service	Processus	Levier	Caractère à sélectionner
Régulation des adventices	Augmentation de la compétition	Pouvoir couvrant	Port de la plante et/ou surface foliaire
	Réduction de la germination des adventices	Effet allélopathique	Teneur en molécules spécifiques (benzoxazinoïdes par ex)
Régulation des insectes ravageurs	Equilibre des populations de ravageurs	Favoriser la présence d'auxiliaires	Teneur en nectar
	Effet de dilution	Plante compagne	Non identifié
Régulation des pathogènes	Réduction des populations	Biofumigation	Teneur en molécules spécifiques (glucosinolates par ex)
	Réduction des populations	Interruption du cycle de reproduction	Hypersensibilité chez les espèces normalement sensibles Ou production de substances inhibitrices
Bouclage des cycles géochimiques	Limiter la lixiviation	Semis d'un couvert en interculture	Production de biomasse aérienne et/ou structure du système racinaire
	Recycler des éléments nutritifs	Association d'espèces	Maximiser les exsudats racinaires

2. La sélection est un processus long

Suite au processus d'identification de l'usage visé, la création d'une variété est limitée par les contraintes biologiques et techniques de l'espèce. La structure variétale va dépendre du mode de reproduction de l'espèce. De façon générale, les espèces autogames ne présentent pas de dépression de consanguinité et la structure variétale sera la lignée (ensemble d'individus homozygotes, génétiquement identiques). Les espèces allogames présentent de la dépression de consanguinité et la structure variétale sera classiquement la population (ensemble d'individus génétiquement différents). Les variétés hybrides, connues chez des espèces autogames ou allogames, sont créées à partir de systèmes de stérilité mâle (induits par voie mécanique, chimique ou génétique)) permettant de contrôler et de reproduire la première génération issue d'un croisement.

Quelle que soit la structure variétale retenue, les étapes de la sélection sont les suivantes :

- Rassemblement de diversité génétique ;
- Identification par phénotypage et/ou génotypage d'individus porteurs des caractères à sélectionner ;
- Rassemblement par fixation ou recombinaison de ces caractéristiques (croisement, évaluation de la descendance, avec ou sans élimination d'individus) ;
- Multiplication de la structure génétique retenue.

Ce processus nécessite plusieurs générations et dure au minimum une dizaine d'années. La sélection est itérative : les individus améliorés servent de base pour le cycle suivant.

Pour sélectionner un caractère ciblé, il faut donc qu'il soit présent dans l'espèce, qu'il soit transmissible à la descendance, et évaluable de façon fiable à coût réduit : la sélection est un processus d'observation (ou phénotypage) d'un grand nombre d'individus. Dans le cas des plantes de services, la question de la facilité et du coût de la mesure du caractère à sélectionner est primordiale. Le service n'ayant pas de valeur marchande évidente, l'agriculteur ne peut supporter un coût de royalties, mode de rémunération de la sélection, élevé. Leclercq et al (2017) illustrent la diversité et la complexité des évaluations pour répondre aux différents services envisageables dans le cas des plantes de cultures intermédiaires. Ces caractéristiques concernent des étapes clés de l'itinéraire technique (coût de semences lié au rendement grainier, facilité de destruction liée à la sensibilité au gel ou à la sénescence) ou des revendications de services (piégeage d'azote par production de biomasse, lutte contre des bioagresseurs de la culture de rente).

3. Face à la diversité d'usages et de réglementations, le catalogue français accompagne l'innovation.

Dans le système français, une variété doit répondre à un certain nombre de règles de qualité pour être commercialisée. Ces règles concernent la vente des semences en elle-même, qui est encadrée par la certification, mais aussi l'inscription préalable à un catalogue pour en garantir l'originalité et la valeur. Actuellement, au moins 190 espèces de rente ou de services sont soumises au catalogue. Cette liste est en constante évolution. Depuis 2014, les sélectionneurs peuvent ainsi demander l'inscription de leurs variétés en revendiquant un service rendu par la variété candidate. Le CTPS élabore les protocoles et définit le niveau de résultat à atteindre dans le cadre d'une commission regroupant les différentes espèces (Figure 1). Le niveau des variétés candidates doit dépasser un seuil lié à la valeur de variétés témoins.

Leclercq et al (2017) listent les variétés inscrites au 10 mai 2017 et ne mentionnent que des revendications de culture intermédiaire piège à nitrate, avec mention d'opposition à la multiplication d'espèces de nématodes. Ceci illustre la difficulté à sélectionner ou revendiquer des services.

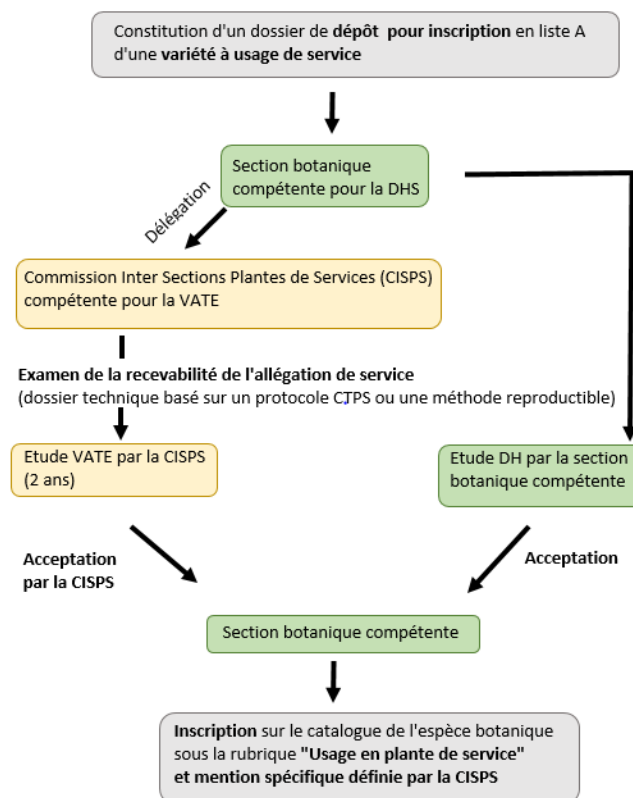


Figure 1. Instruction d'une revendication d'usage de service lors d'une inscription; (DHS : Distinction-Homogénéité-Stabilité, VATE : Valeur Agronomique Technologique Environnementale). D'après Leclercq et al 2017.

4. Références bibliographiques :

- Altieri, M., Nicholls, C. (2004) Biodiversity and pest management in agroecosystems. CRC Press.
- Leclercq D., Basset A., Bourdon P., Gras, M-C., Julier B., Leclerc C., Litrico I. (2017) Catalogue français : valorisation de la sélection pour les variétés de cultures intermédiaires multi-services. Innovations Agronomiques 62, 101-114
- Millennium Ecosystem Assessment (Program). (2005). Ecosystems and human well-being. Washington, D.C: Island Press

PestiRed: un projet de co-innovation pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires dans les grandes cultures en Suisse

**B. Jeangros ¹, P. Jeanneret ², J. Wirth ¹, T. Steinger ³, S. Vogelgsang ³, F. Herzog ²,
M. Lüthi ⁴ & J. Demierre ⁴**

⁽¹⁾ Agroscope, Systèmes de Production Plantes, CH-1260 Nyon, Suisse

⁽²⁾ Agroscope, Agroécologie et environnement, CH-8046 Zürich, Suisse

⁽³⁾ Agroscope, Protection des végétaux, CH-1260 Nyon et CH-8046 Zürich, Suisse

⁽⁴⁾ IP-Suisse, CH-3052 Zollikofen et CH-1001 Lausanne, Suisse

Correspondance : philippe.jeanneret@agroscope.admin.ch

Résumé

Le projet PestiRed soutient la mise en œuvre d'un plan d'action national visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires en Suisse. Grâce à des mesures alternatives combinées de façon optimale, ce projet vise à fortement réduire l'utilisation des produits phytosanitaires dans les grandes cultures tout en préservant le rendement et la qualité des récoltes. Ces stratégies seront définies dans le cadre d'un processus de co-innovation impliquant des agriculteurs, des conseillers agricoles et des chercheurs. Elles seront mises en œuvre et évaluées sur une bonne centaine d'exploitations agricoles réparties dans plusieurs régions du plateau suisse. Les agriculteurs recevront des contributions financières pour compenser la surcharge de travail et les éventuelles pertes de récolte. Le projet sera porté principalement par IP-SUISSE, l'Association suisse des paysannes et paysans pratiquant la production intégrée, et financé à près de 80% par l'Office fédéral de l'agriculture. L'accompagnement scientifique du projet sera assuré par Agroscope.

Mots-clés : grandes cultures, protection intégrée, mesures alternatives, co-innovation

1. Contexte général

En Suisse, le concept de production intégrée (PI) a été développé il y a une trentaine d'années. Il propose différentes mesures pour limiter le développement des organismes nuisibles et réduire l'utilisation des produits phytosanitaires synthétiques (PPh). Depuis 1999, plusieurs recommandations de la PI font l'objet de paiements directs accordés aux agriculteurs suisses qui fournissent des prestations écologiques. Ce mode de production s'est imposé comme une alternative entre agriculture intensive avec des apports élevés d'intrants et production biologique sans intrants synthétiques.

Compte tenu de l'importance des grandes cultures dans la surface agricole utile suisse (environ 25%), les quantités de PPh utilisées dans ces cultures restent malgré tout assez importantes. Les possibilités d'utilisation des PPh synthétiques pour protéger les cultures contre les adventices, les ravageurs et les maladies seront restreintes à l'avenir. Le Conseil fédéral a ainsi lancé en 2017 un plan d'action national visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires.

Des mesures préventives et de lutte alternative contre les bioagresseurs doivent donc être mises en œuvre de manière cohérente afin de réduire l'utilisation des PPh. Malgré de bonnes connaissances sur les effets de différentes mesures alternatives de prévention et de lutte, une évaluation globale de ces mesures sur le moyen terme et dans les conditions de la pratique fait défaut.

2. Objectifs du projet

Des stratégies alternatives de protection des grandes cultures seront définies ensemble régionalement par les agriculteurs, les conseillers agricoles et les chercheurs et mises en place sur une bonne centaine d'exploitations réparties dans quatre régions de Suisse. L'objectif est de fortement réduire l'utilisation des produits phytosanitaires (-75% en moyenne sur la rotation) tout en maintenant le rendement et la qualité des récoltes (au maximum 10% de perte). L'acceptation par les agriculteurs de ces stratégies alternatives sera également évaluée, ainsi que les possibilités de pouvoir les étendre à l'ensemble de la Suisse.

3. Approche et concept

Le projet vise une protection agroécologique des cultures et s'appuie sur les principes de la production intégrée. Il s'agira de produire en s'appuyant sur les fonctionnalités des écosystèmes, de maximiser la biodiversité fonctionnelle et de renforcer les régulations biologiques dans les agroécosystèmes.

Les connaissances fragmentaires sur les mesures préventives et de lutte alternative prises individuellement seront intégrées dans une approche globale sur toute la durée d'une rotation diversifiée pendant une période de 6 ans. Les interactions mutuelles entre les différentes mesures seront ainsi valorisées.

Le projet se base sur une approche de co-innovation. Les connaissances et les expériences passent de la pratique à la recherche et vice versa. Les trois groupes d'acteurs (agriculteurs, conseillers et chercheurs) développeront et optimiseront ensemble les mesures et les stratégies de protection des plantes dans lesquelles la lutte chimique interviendra uniquement en dernier recours (figure 1).

Enfin, l'effet de stratégies alternatives de protection des plantes sera examiné dans les conditions de la pratique et les agriculteurs recevront des contributions financières pour compenser la surcharge de travail et les éventuelles pertes de récolte

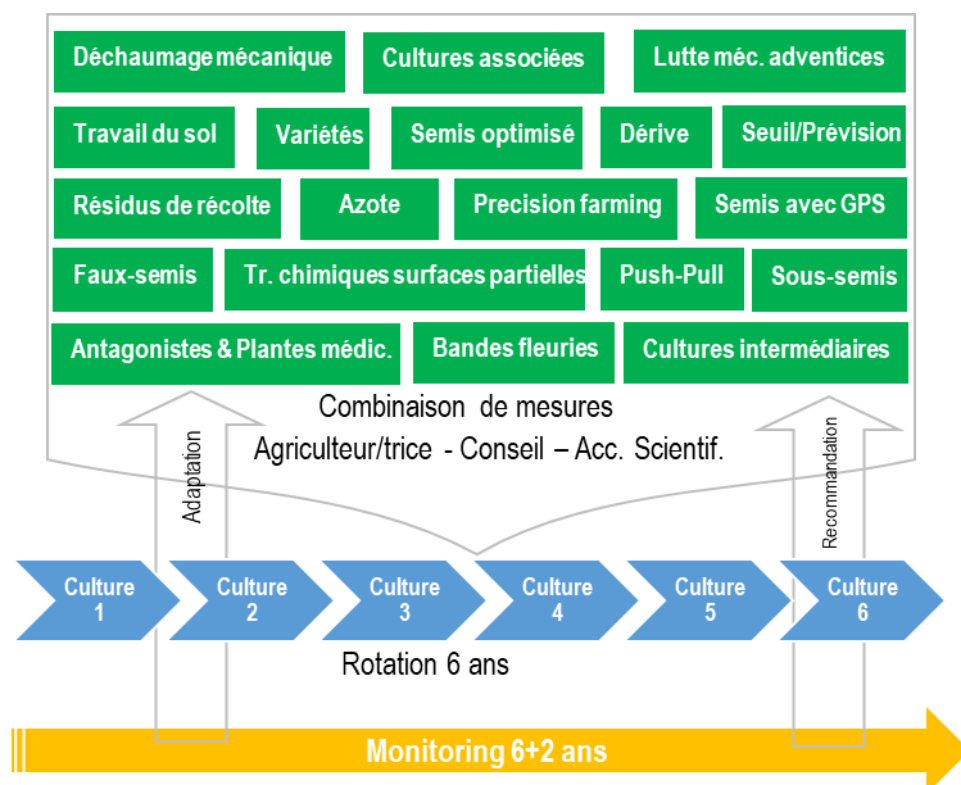


Figure 1. Concept de mise en œuvre du projet PestiRed

4. Mesures préventives et alternatives de protection des plantes

Les mesures s'appuieront sur le principe de la pyramide de la protection intégrée des végétaux. Les mesures préventives (éviter ou réduire les populations initiales d'organismes nuisibles) seront prioritaires, suivies par des mesures curatives non chimiques telles que la régulation biologique, la régulation basée sur les substances naturelles et la régulation physique/mécanique (tableau 1). Une lutte chimique ne sera pratiquée que lorsque les autres mesures ne permettront manifestement pas d'assurer une récolte satisfaisante. La décision d'intervenir sera prise au cas par cas par les conseillers, les agriculteurs et les chercheurs. L'optimisation de la combinaison de mesures sera un élément novateur important du projet à l'interface entre recherche et pratique.

Le catalogue des mesures comprend actuellement 23 mesures (regroupées dans la Fig. 1). Cinq sont des mesures de base obligatoires, par exemple la culture de variétés peu sensibles, et 18 sont des mesures spécifiques, par exemple le semis de bandes pour auxiliaires, qui pourront varier d'une région à l'autre. Le catalogue des mesures évoluera pendant toute la durée du projet en fonction des expériences acquises, dans le cadre du processus de co-innovation.

Tableau 1. Domaines d'action des mesures, mécanismes d'action et objectifs à atteindre

Domaines d'action		Mécanisme d'action et objectif du domaine d'action
Préventif	Mesures visant à réduire les populations initiales d'organismes nuisibles (A, mesures 1 à 5)	Réduction de l'utilisation des PPh grâce à des mesures agronomiques, telles qu'une rotation diversifiée des cultures et un travail du sol adapté contre les populations initiales d'organismes nuisibles, c'est-à-dire contre les adventices (réservoir de semences), les maladies (inoculum) et les populations de ravageurs.
	Mesures d'évitement (B, mesures 6 à 16)	Réduction de l'utilisation des PPh grâce à des mesures techniques culturales optimisées, telles que semis optimisé (date, densité, distance), cultures intermédiaires, couverture du sol, cultures associées, sous-semis, variétés compétitives, variétés peu sensibles, techniques de push-pull, utilisation adaptée de l'azote. Les mesures de prévention créent des conditions inappropriées pour le développement de populations d'organismes nuisibles. Promotion des antagonistes naturels par des mesures de gestion de l'habitat.
Curatif (non-chimique)	Mesures de lutte non chimique (C, mesures 17 à 20)	Réduction de l'utilisation des PPh par des mesures de régulation biologique (antagonistes), basées sur des substances naturelles, physiques (procédés thermiques) et/ou de lutte mécanique. Les mesures de lutte curatives non chimiques sont prioritaires.
Curatif (chimique)	Mesures de lutte chimique (D, mesures 21 à 23)	Utilisation ciblée et réduite des PPh par l'application de seuils d'intervention et de systèmes de prévision. Les mesures chimiques ne doivent être utilisées qu'une fois que les possibilités de lutte non chimique ont été épuisées.

5. Monitoring et accompagnement scientifique

Les performances agronomiques, écologiques et économiques des parcelles sur lesquelles des stratégies innovantes de protection des plantes auront été mises en œuvre seront comparées a) à celles de parcelles témoin avec la même culture cultivée de façon traditionnelle et b) à celles obtenues de 2015 à 2018 par les mêmes cultures sur les mêmes exploitations.

Sur les parcelles innovantes et sur les parcelles témoin, l'agriculteur enregistrera précisément toutes ses pratiques agricoles et en particulier celles concernant l'utilisation des PPh, et les caractéristiques de la récolte (rendement et qualité). Agroscope assurera un monitoring précis des adventices, des maladies, des ravageurs ainsi que des antagonistes au niveau des parcelles et de leur environnement immédiat.

La diminution de l'utilisation des PPh sera mesurée à l'aide de trois indicateurs : a) indice de fréquence des traitements (IFT), b) nombre d'interventions et c) quantité de matière active par ha.

Un budget partiel, établi chaque année pour chaque culture et à la fin du projet pour toute la rotation, permettra de préciser d'une part les augmentations et les diminutions de performances (rendement des cultures, prix lié à la qualité de la récolte, paiements directs) et d'autre part les hausses et les baisses de coûts (main d'œuvre, de machine, de PPh) sur les parcelles innovantes et les parcelles témoin.

L'accompagnement scientifique du projet PestiRed sera assuré par Agroscope. Une dizaine de groupes de recherche seront impliqués. Parallèlement, les mêmes mesures ainsi que des mesures plus innovantes seront étudiées sur trois sites expérimentaux d'Agroscope : Changins (canton de Vaud), Oensingen (canton de Soleure) et Reckenholz (canton de Zurich).

6. Calendrier et financement du projet

Le projet commencera en 2019 et se terminera en 2026. Il sera porté par IP-SUISSE, l'Association suisse des paysannes et paysans pratiquant la production intégrée, en étroite collaboration avec les services de l'agriculture et de conseil agricole des trois cantons participants (Vaud, Genève et Soleure). IP-SUISSE et Agroscope en assureront la conduite opérationnelle. Le projet est financé à près de 80% par l'Office fédéral de l'agriculture, le solde étant couvert par IP-SUISSE, les trois cantons impliqués et deux partenaires privés.

Conception de systèmes de culture

Conception de systèmes de cultures par algorithmes d'optimisation

T. Maillot⁽¹⁾, M. Mion⁽¹⁾, J.-B. Vioix⁽²⁾ & N. Colbach⁽¹⁾

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

⁽²⁾ LE2I - IUT R&T routes plaines de l'Yonne, 89000 AUXERRE

Correspondance : thibault.maillot@agrosupdijon.fr

Résumé

La construction d'un système de cultures n'est pas toujours aisée, notamment lorsque l'on souhaite prendre en compte des critères antagonistes (améliorer le rendement tout en préservant la biodiversité). Dans ce travail, nous proposons une méthode de construction de systèmes de cultures, via des algorithmes d'optimisation, en utilisant le modèle FLORSYS. Les simulations sont effectuées sur une période de 30 ans, pour 10 répétitions climatiques. Les systèmes de cultures sont construits pour maximiser/minimiser certains indicateurs de sortie. Les optimisations sont réalisées à l'aide de deux méthodes différentes, en fonction du nombre de campagnes culturales considérées : une approche par PLS-PM est conduite lorsque le choix de cultures et d'itinéraires techniques est restreint ; sinon, une approche par heuristique est utilisée. La présentation sera l'occasion de montrer des exemples d'application de cette méthode de construction et de discuter de son intérêt.

Mots-clés : adventice, simulation, modèle, système de culture

1. Introduction

Les réglementations françaises et européennes imposent une forte réduction des usages des pesticides, notamment des herbicides, ce qui nécessite de repenser les pratiques agricoles. L'allongement de la rotation et la diversification des cultures qui la composent sont deux leviers permettant de réduire l'usage des herbicides tout en améliorant la gestion des adventices.

Grâce au modèle de simulation FLORSYS (Colbach et al., 2014), de nombreuses rotations peuvent être testées en vue d'évaluer leurs impacts sur le niveau de contrôle à long terme de la flore adventice. Ce travail vise à mettre en œuvre des méthodes, utilisant ce modèle de simulation, pour sélectionner des rotations permettant de concilier une faible nuisibilité des adventices pour la production agricole avec une forte contribution des adventices à la biodiversité.

2. Matériel et méthode

FLORSYS est un modèle "parcelle virtuelle" qui simule la dynamique de la flore adventice, son impact sur la production agricole et la biodiversité en fonction des systèmes de culture et du pédoclimat (cf. annexe, p. 98). Chaque simulation est effectuée sur une période de 30 ans, pour 10 répétitions climatiques. Les conditions pédoclimatiques bourguignonnes sont utilisées dans cette étude. FLORSYS prédit de nombreux indicateurs d'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement pour chaque campagne culturale (Colbach et al., 2014). Dans ce travail, nous avons appliqué des méthodes permettant la sélection de rotations en fonction de leurs impacts sur la richesse spécifique de la flore adventice, le rendement en grain ou encore la ressource trophique pour les abeilles.

En fonction du nombre de cultures que nous souhaitons tester dans la rotation culturale, deux méthodes sont applicables. Dans le cas où nous ne considérons que peu de cultures différentes (e.g. 3 cultures : blé, colza, orge avec un itinéraire technique standard), nous utilisons une méthode à base d'une modélisation PLS-PM¹⁰ (Vinzi et al., 2010). Dans ce cas, toutes les combinaisons de cultures sont testées et une analyse de l'influence des différentes cultures sur des indicateurs agronomiques est effectuée pour sélectionner le système de cultures qui semble avoir l'impact le plus important sur un indicateur d'intérêt (Mion, 2018).

¹⁰

PLS-PM : partial least squares path modeling

Lorsque nous considérons un grand nombre de cultures et d'itinéraires techniques différents pour la construction du système de culture, les simulations de toutes les combinaisons possibles prendraient trop de temps. Pour pallier ce problème, nous utilisons une optimisation à base d'un algorithme génétique (Goldberg, 1989). Dans le cas où des indicateurs antagonistes sont considérés (ex. maximiser la production tout en optimisant l'offre trophique aux abeilles par les adventices), la méthode proposée dans cette étude, basée sur la construction d'un front de Pareto, retourne un ensemble de solutions qui permettent d'avoir un compromis (Pareto-Optimal) entre les indicateurs agronomiques considérés. La durée de la rotation est ici fixée à trois ans : dans un premier temps, pour effectuer la preuve du concept, l'algorithme ne travaille que sur la diversification des cultures principales en testant d'autres cultures de vente en combinaison avec des itinéraires techniques variés. La bibliothèque des itinéraires techniques utilisés par l'algorithme d'optimisation contient différents types de cultures (blé, orge, colza, tournesol, maïs, ...) et de conduites des cultures (avec/sans labour, dates de semis, intensités de programme herbicide différentes, ...).

3. Résultats et discussion

La Figure 1 représente un front de Pareto construit via l'utilisation d'un algorithme génétique. Ce front représente l'ensemble de solutions de compromis entre deux indicateurs antagonistes : la production énergétique et la ressource trophique pour les abeilles. Le choix d'un système de culture parmi cet ensemble peut se faire en fonction des attentes et des contraintes de l'agriculteur. Globalement, les rotations avec la plus forte proportion de blé favorisent la biodiversité au détriment de la production énergétique (en haut à gauche de la Figure 1) alors que les rotations les plus diverses (avec colza ou orge de printemps) ont une performance intermédiaire, voir favorisent la production énergétique au détriment de la ressource trophique pour les abeilles (au centre et en bas à droite de la figure). Changer l'ordre des cultures dans la rotation peut également affecter la performance : le système COB (colza/orge/blé) a par exemple une plus forte production que le système CBO (colza/blé/orge). Pour une même rotation, la conduite module également la performance : le système BBO_H-T+ (blé/blé/orge), avec son travail du sol plus intensif, augmente la performance comparée au système BBO-H-.

Les résultats obtenus peuvent être améliorés en autorisant la modification de la durée des rotations testées tout en augmentant la diversité des itinéraires techniques utilisables par l'algorithme d'optimisation. Cependant, il est à souligner que les solutions obtenues dépendent du modèle sur lequel elles ont été obtenues : les limites des résultats de l'optimisation sont aussi liées au modèle et à ces hypothèses sous-jacentes.

4. Conclusion

La possibilité d'établir des systèmes de culture à partir d'algorithme d'optimisation a été étudiée dans ce travail. Des premiers résultats ont permis d'extraire des systèmes de cultures, sur 3 ans, qui favorisent un compromis entre la production d'énergie de la culture et l'offre trophique aux abeilles par les adventices.

Ce travail en est à ses prémices et est à continuer et à améliorer pour trouver des systèmes de cultures adaptés à des contraintes fixées par des agriculteurs (précédents culturels, machines disponibles sur l'exploitation, ...). Les résultats dépendront aussi de la situation de production (contraintes pédoclimatiques, filières disponibles, ...).

5. Remerciements

Le travail présenté est financé par le projet ANR CoSAC (ANR-14-CE18-0007).

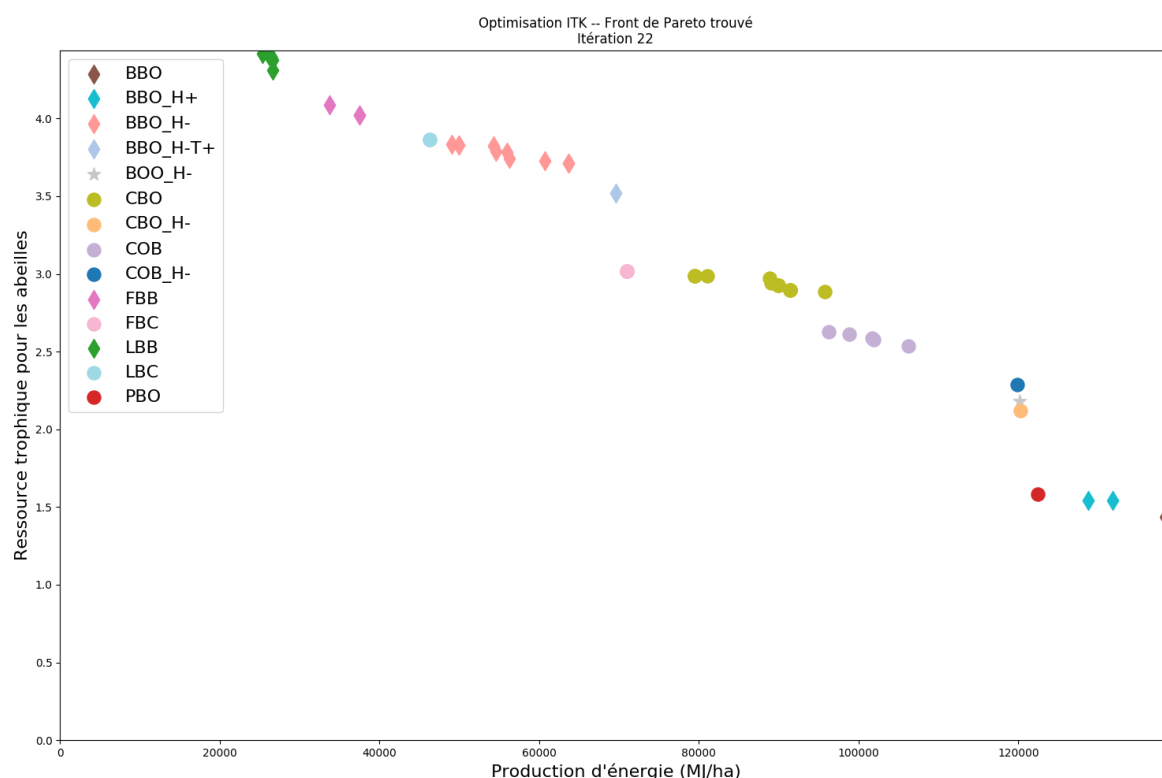


Figure 1. Front de Pareto construit à l'aide d'un algorithme génétique. Les rotations représentées sont Pareto-Optimal entre la production d'énergie, en abscisse, et la ressource trophique pour les abeilles, en ordonnée. Chaque couleur correspond à une rotation culturale indiquée dans la légende. Les losanges représentent les rotations ayant la plus forte proportion de blé, les étoiles celles avec une dominance d'orge et les ronds les rotations plus diverses. Pour les détails des rotations, voir Tableau 1.

Tableau 1. Description synthétique des rotations identifiées par l'algorithme génétique

Rotation	Durée de la rotation	Nombre d'espèces cultivées	Proportion	Opérations/an					Glyphosate en inter-culture	Herbicides sur culture de rente	Désherbage mécanique
			Cultures de couverture	Cultures de printemps	Broyage	Labour	Travail du sol superficiel	Rouleau			
BBO	3 ans	2	0	0	0	0	3,66	0	0,33	3,33	0
BBO_H+	3 ans	2	0	0	0	0,33	3,66	0,67	1	3,33	0
BBO_H-	3 ans	2	0	0	0	0	1,67	0,33	0,33	2,66	0
BBO_H-T+	3 ans	2	0	0	0,33	0,33	2	0,33	0,33	2,66	0
BOO_H-	3 ans	2	0	0	0	0,33	4,33	0	0,67	2,66	0,67
CBO	3 ans	3	0	0	0	0	2	0	0,33	3	0
CBO_H-	3 ans	3	0	0	0	0,33	4	0,33	0,33	2,33	0,67
COB	3 ans	3	0	0	0	0	3	0,33	0,33	3	0
COB_H-	3 ans	3	0	0	0	0,33	4,33	0,33	0,67	2,33	0,67
FBB	3 ans	2	0	0	0,33	0,33	1,33	0,67	0	1,33	1
FBC	3 ans	3	0	0	0,33	0,33	2,66	0,67	0	1,67	1
LBB	3 ans	2	0	0	0,33	0,33	1	0,67	0	1,33	0
LBC	3 ans	3	0	0	0,33	0,33	1,33	1	0,33	1,33	0
PBO	3 ans	3	0	0,33	0	0	3,66	0	0,67	2,66	0

[§] B=blé, O=orge d'hiver, T=triticale, C=colza, F=féverole, L=luzerne, P=pois ; H+, H et H- décrivent l'intensité du programme herbicide ; T- indique une intensité plus faible du travail du sol

6. Références bibliographiques

- Colbach, N., Biju-Duval, L., Gardarin, A., Granger, S., Guyot, S.H.M., Meziere, D., Munier-Jolain, N., Petit Michaut, S., 2014. The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. *Weed Res.* 54, 541 – 555. <https://doi.org/10.1111/wre.12112>
- Goldberg, D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.
- Mion, M., 2018. Développement d'une méthode de conception de systèmes de culture pour une gestion durable de la flore adventice par algorithmes d'optimisation (Rapport de stage de fin d'études). AgroSup Dijon.
- Vinzi, V.E., Trinchera, L., Amato, S., 2010. PLS Path Modeling: From Foundations to Recent Developments and Open Issues for Model Assessment and Improvement, in: Esposito Vinzi, V., Chin, W.W., Henseler, J., Wang, H. (Eds.), *Handbook of Partial Least Squares: Concepts, Methods and Applications*, Springer Handbooks of Computational Statistics. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 47–82. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32827-8_3

Evaluation multicritère *a priori* pour aider à la conception de systèmes innovants. Cas de Syppre Berry

Sophie Dubois ¹, Aurélie Tailleur ¹, Stéphane Cadoux ², Nicolas Cavan ³,
Anne-Laure De Cordoue ¹, Lionel Jouy ¹, Gilles Sauzet ² & Clotilde Toqué ¹

(¹) ARVALIS Institut du végétal, 91720 Boigneville

(²) Terres Inovia, 78850 Thiverval-Grignon

(³) Eco-Innov, INRA, 45075 Ardon

Correspondance : a.tailleur@arvalis.fr

Résumé

Le projet Syppre (ARVALIS, Terres Inovia, ITB) a pour objectif d'accompagner la mise au point de systèmes de grande culture innovants répondant à des objectifs de triple performance : économique, environnementale et sociale. L'évaluation *a priori* de la durabilité des systèmes Syppre intégrant des innovations est faite grâce au modèle DEXiPM (INRA). Cette évaluation est enrichie grâce à la création d'un lien entre le modèle issu du projet *Pure* et d'autres outils tels que SYSTERRE et FLORSYS pour les indicateurs relatifs aux adventices (ex. perte de rendement, biodiversité). L'objectif de la présentation est de montrer l'intérêt de croiser les indicateurs relatifs aux adventices avec d'autres indicateurs technico-économiques, afin d'obtenir une évaluation multicritère complète de la gestion des adventices.

Mots-clés : SYPPRE – Evaluation multicritère – Durabilité – Adventice

1. Introduction

Concilier l'ensemble des enjeux qui s'imposent à l'agriculture implique de faire évoluer les systèmes de culture. Pour relever ce défi, les instituts techniques des grandes cultures, ARVALIS - Institut du végétal, l'Institut Technique de la Betterave et Terres Inovia ont lancé le projet Syppre, qui s'organise en trois volets : un observatoire des pratiques, cinq plateformes expérimentales mises en œuvre dans des milieux contrastés, et des réseaux d'agriculteurs. Il s'agit ici de présenter la démarche mise en œuvre sur Syppre pour concevoir et évaluer la durabilité de systèmes innovants en recourant à différents outils.

2. Conception des systèmes innovants Syppre

La démarche de conception-évaluation de Debaeke et al. (2009) a été mise en œuvre en 2014 (Toqué et al., 2015). Sur chaque plateforme, des ateliers de co-conception¹¹ rassemblant agriculteurs, acteurs de l'aval (ex : coopératives, négoce, industriels) et experts locaux (chercheurs, enseignants, conseillers) ont permis de construire de 5 à 9 prototypes de systèmes de culture répondant aux objectifs globaux de triple performance (productivité, rentabilité, excellence environnementale) et aux enjeux locaux identifiés pour chaque milieu à échéance 2025. Concernant le Berry, les enjeux locaux prioritaires sont d'améliorer la maîtrise des adventices, dans un contexte de forte infestation en particulier géranium et vulpin favorisée par des rotations courtes conduites en non labour, tout en réduisant la dépendance aux engrais et aux produits phytosanitaires. A l'aide de l'outil SYSTERRE (Weber et al., 2018), les performances des prototypes ont été évaluées *ex ante* sur un panel d'indicateurs en lien avec les enjeux identifiés, en comparaison avec celles d'un système témoin (système reposant sur la rotation la plus fréquente du milieu et intégrant les recommandations actuelles des instituts techniques). Cette première évaluation a permis de guider les travaux de conception et de retenir le système innovant le plus prometteur utilisé par la suite (Figure 1 pour l'exemple du Berry).

¹¹ Exemple du Berry : groupe de 14 personnes réunissant des agriculteurs et des représentants des organismes suivants : Axéreal, ETS Villemont, Chambre d'Agriculture de l'Indre, ARVALIS et Terres Inovia

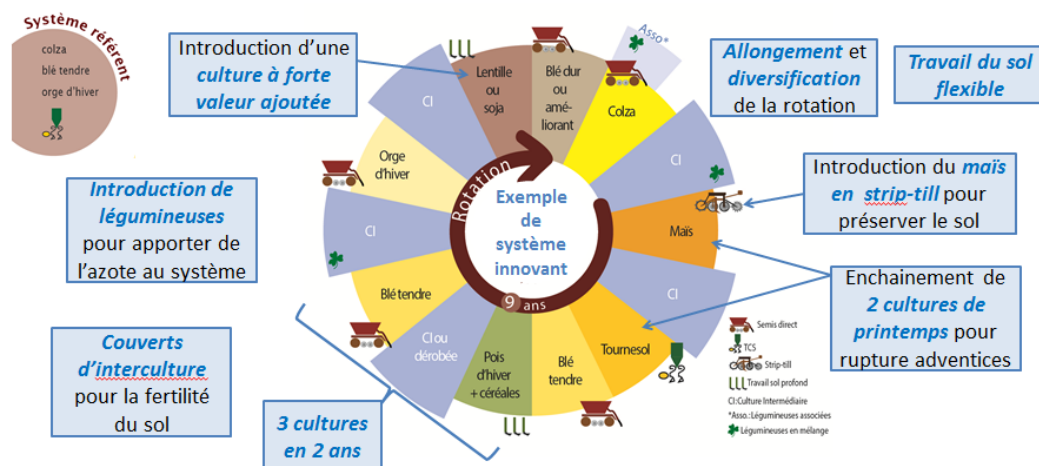


Figure 1. Système témoin (« référent ») et innovant du Berry

3. Evaluation globale de la durabilité des systèmes témoins et innovants

Dans un second temps, une évaluation multicritère plus large est conduite à l'aide d'un modèle développé par l'INRA, DEXiPM (Pelzer et al, 2012), qui agrège des critères économiques, environnementaux et sociaux pour procéder à une estimation qualitative de la durabilité globale du système et d'identifier les forces et faiblesses des systèmes témoin et innovant. Le choix s'est porté vers cet outil notamment du fait de son cadre méthodologique modulable en fonction des objectifs de l'étude et des données d'entrée disponibles. Il est possible d'alimenter directement le modèle à partir de données d'entrée plus précises fournis par d'autres modèles. Dans le cadre de Syppre, nous utilisons ainsi principalement SYSTERRE (outil inter-instituts de calcul d'indicateurs multicritères), et FLORSYS (Colbach et al., 2017) (cf. annexe, p. 98).

4. Résultats : cas du Berry

La deuxième évaluation conduite avec l'outil DEXiPM permet de comparer la durabilité du système témoin et innovant au travers des trois piliers.

La mise en œuvre des leviers agronomiques innovants ne dégradent pas la note globale de la durabilité. C'est également le cas pour la durabilité économique et sociale. En effet, la réduction de la dépendance aux pesticides entraîne une diminution des coûts de production ; cet allègement des charges permet de contrebalancer la perte de produit brut. Pour le volet social, l'augmentation de la complexité du système de culture est notamment compensée par la diminution du risque pour la santé de l'agriculteur.

En revanche, du fait de l'allongement de la rotation et de la réduction des apports en produits phytosanitaires et fertilisants, le système de culture innovant est moins impactant sur l'environnement : moins de ressources utilisées et d'émissions atmosphériques, effet positif sur la biodiversité de surface et aérienne.

Grâce à l'utilisation de FLORSYS pour le calcul des indicateurs concernant la biodiversité des adventices (diversité et abondance) et le croisement avec les autres indicateurs technico-sociaux-économiques, la maîtrise des adventices a pu être évaluée de manière plus globale. Les simulations en cours permettront également de comparer les systèmes témoin et innovant en termes de risque adventice. Nous pouvons ainsi dire que le système innovant répond aux enjeux fixés globaux de triple performance et locaux avec l'amélioration de la maîtrise des adventices et la diminution de la dépendance aux intrants.

Tableau 1. Sélection d'indicateurs obtenus via DEXiPM pour les systèmes témoin et innovant de la plateforme Syppre du Berry, avec leurs points forts (en vert) et leur limites (en rouge).

	Syppre Berry : système innovant	Syppre Berry : système témoin
Durabilité économique	Très élevée	Très élevée
	Marge semi-nette Coût du travail Coût des pesticides Capacité d'investissement	Marge semi-nette Coût du travail Coût des pesticides Capacité d'investissement
Durabilité sociale	Elevée	Moyenne
	Risque de contamination par une mycotoxine Diversité des familles cultivées	Risque de contamination par une mycotoxine Risque sanitaire dû au recours aux pesticides Complexité du système de culture
Durabilité environnementale	Elevée à très élevée	Faible à Moyenne
	Utilisation d'énergie Intensité de l'occupation des sols Effet de pratiques limitant le tassement Lixiviation de nitrates et de pesticides Intensité de la fertilisation Emissions atmosphériques (gaz à effet de serre, ammoniac et pesticide)	Effet de pratiques limitant le tassement Lixiviation de nitrates et de pesticides Perturbation chimique Intensité de la fertilisation Emissions atmosphériques d'ammoniac Emissions de pesticides

5. Conclusion

Les évaluations *ex ante* des systèmes Syppre permettent d'avoir un point de départ dans la mise en place d'innovation et d'identifier des pistes d'amélioration et points de vigilance. Une nouvelle procédure d'amélioration des systèmes innovants est actuellement en cours afin de prendre en compte de nouveaux enjeux en termes de protection phytosanitaire, comme par exemple le retrait du glyphosate. Outre ce diagnostic, les travaux conduits dans le cadre de CoSAC ont permis de produire une version DEXiPM adaptée aux données d'entrée plus précises de SYSTERRE qui pourra être valorisée dans d'autres travaux (DEXiPM-SYSTERRE).

Par ailleurs, la comparaison des simulations conduites avec FLORSYS aux premières observations de terrain pourront contribuer à identifier des possibles causes de divergence entre les résultats simulés et mesurés.

6. Bibliographie

- Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., et al.: 2009. Iterative Design and Evaluation of Rule-Based Cropping Systems: Methodology and Case Studies – A Review. *Agronomic & Sustainable Development*, 29:73–86.
- Toqué C., Cadoux S., Pierson P., Duval R., Toupet A.L., Flenet F., Carroué B., Angevin F., Gate P.: 2015. SYPPRE : A project to promote innovations in arable crop production mobilizing farmers and stakeholders and including co-design, ex ante evaluation and experimentation of multi-service farming systems matching with regional challenges. 5th International Symposium for FSD. 7–10 September 2015.
- Weber S., Wissocq A., Jouy L., Berodier M., 2018. Outil d'évaluation et de conception d'alternatives innovantes multi-performantes. Poser, Phloème.
- Pelzer E., Fortino G., Bockstaller C., Angevin F., Lamine C., Moonen C., Vasileiadis V., Guérin D., Guichard L., Reau R., Messéan A. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18, 171-182, doi:10.1016/j.ecolind.2011.11.019.
- Colbach N., Bockstaller C., Colas F., Gibot-Leclerc S., Granger S., Guyot S., Mézière D., Moreau D., Pointurier O., Queyrel W., Villerd J., Voisin A.-S. (2017) Conception de systèmes de culture multiperformants à l'aide de modèles prédisant la nuisibilité et les services dépendant des adventices. *Innovations Agronomiques* 59, 191-203

Combiner expertise et modèles en ateliers de co-conception de systèmes de culture pour une gestion durable des adventices : apports méthodologiques et perspectives

Bastien Van Inghelandt ¹, Wilfried Queyrel ¹, Nicolas Cavan ², Floriane Colas ¹,
Bérénice Guyot ³ & Nathalie Colbach ¹

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

⁽²⁾ Eco-Innov, INRA, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁽³⁾ Chambre d'Agriculture de l'Aube, 10500 Brienne-le-Château, France

Correspondance : wilfried.queyrel@inra.fr

Résumé

Afin de concevoir des systèmes de culture conciliant production agricole, biodiversité et faible usage d'herbicides, nous avons combiné, en atelier, du prototypage de systèmes de culture par des agriculteurs avec des experts et différents modèles pour évaluer les systèmes en termes de (1) contrôle de la nuisibilité des adventices pour la production et leur contribution à la biodiversité avec les outils DECIFLORSYS (Colas et al., 2019) et FLORSYS (Colbach et al., 2014), (2) de durabilité, économique sociale et environnementale avec DEXiPM (Craheix et al., 2012) ; (3) d'efficacité vis-à-vis de la gestion des adventices et de leur faisabilité technique à partir des connaissances des agriculteurs et de direx d'experts en malherbologie. Plusieurs solutions multi-performantes ont ainsi été construites. La méthodologie a également été évaluée, (4) par les participants à partir d'un questionnaire afin d'évaluer leur satisfaction vis-à-vis du déroulement des ateliers (qualité de l'animation, connaissances échangées, supports et outils mobilisés) ; et (5) par un expert en conception de systèmes de culture afin d'évaluer si la méthode permet d'atteindre l'objectif fixé. La réflexion en atelier a déjà conduit certains participants à modifier les pratiques et investir dans du nouveau matériel.

Mots-clés : conception, approche participative, modèles, prototypage, systèmes de culture

1. Introduction

Les herbicides représentent le moyen le plus efficace pour maîtriser les adventices mais leurs impacts néfastes pour les agroécosystèmes et la santé humaine exigent de réduire leur usage et de proposer d'autres stratégies. Bien que des méthodes de conception de systèmes de cultures assistées par modélisation aient été développées (Loyce et al., 2002 ; Tixier, 2004), peu d'entre elles sont dédiées à la gestion la gestion de la flore adventice (Colbach et al., 2017 ; Llewellyn and Pannell , 2009). Pour cela, une méthode de conception de systèmes de culture et d'évaluation *ex ante* a été mise en œuvre afin de proposer des systèmes de gestion durable de la flore adventice.

2. Matériel et méthodes

La méthode utilisée a pour originalité de combiner le prototypage, valorisant les connaissances des agriculteurs (Reau et al., 2012) et des modèles, pour évaluer la multiperformance des systèmes et compléter l'expertise des agriculteurs (Jeuffroy et al., 2008). Dans cette perspective, le modèle DECIFLORSYS développé par Colas (2019, p. 87 dans ce colloque) a été mobilisé en ateliers de conception pour évaluer en temps réel les propositions des agriculteurs pour concevoir de nouveaux systèmes de culture. Le support d'animation Mission Ecophyt'eau® a été utilisé pour construire les prototypes et faciliter les interactions entre agriculteurs. Les prototypes conçus par deux groupes d'agriculteurs de l'Aube ont également été évalués de manières croisées en mobilisant les différents acteurs et plusieurs méthodes :

- les participants eux-mêmes, par auto-évaluation en direct complétée par un questionnaire portant sur l'efficacité en termes de gestion des adventices, de réduction des herbicides, de la viabilité économique et de la faisabilité technique ;

- des chercheurs en malherbologie pour évaluer par expertise l'efficacité des prototypes en termes de gestion de la flore adventice (pertinence des leviers agronomiques et des combinaisons de techniques mobilisées) et proposer des pistes complémentaires ;
- le modèle d'évaluation multicritère de la durabilité DEXiPM (Pelzer et al., 2012),
- la parcelle cultivée virtuelle FLORSYS (Colbach et al., 2014, cf. annexe, p. 98), pour évaluer l'impact des différentes combinaisons de techniques culturales sur la dynamique de la flore adventice ainsi que les services et dysservices associés à l'échelle du système de culture.

Une évaluation de la méthode de conception a également été réalisée :

- Avec les participants aux ateliers (agriculteurs et conseillers) à partir d'une discussion en fin d'atelier et d'un questionnaire portant sur la satisfaction de l'expérience de travail en atelier, les connaissances échangées, la qualité de l'animation, des avis sur les apports des modèles et des supports mobilisés.
- Avec un chercheur spécialiste de la conception de systèmes de culture pour évaluer la pertinence de la méthode et sa capacité à atteindre les objectifs fixés.

Le but global était de croiser les points de vue et obtenir une évaluation complète en regard des objectifs des agriculteurs.

Après cet atelier de prototypage, les résultats du modèle FLORSYS ont été présentés aux agriculteurs et ont été discutés lors de l'atelier suivant : les traits biologiques des adventices non maîtrisées, les cultures impactées et les pratiques favorisant ou non la maîtrise des adventices de chaque prototype.

3. Résultats

Deux types de prototypes ont été conçus par les agriculteurs : le prototype A favorise un couvert semi-permanent tandis que le prototype B s'appuie sur une diversification de la rotation et une lutte intégrée pour la gestion des adventices. Pour chacun de ces types, différentes options ont été imaginées et comparées au système de culture de référence (Tableau 1). Cette référence correspond à un système existant chez un agriculteur confronté à des problèmes de gestion d'adventices. Globalement, les systèmes proposés par les agriculteurs réduisent la nuisibilité des adventices quand ils sont comparés au système de référence. La contribution des adventices à la biodiversité (offre trophique aux carabes et pollinisateurs) est maintenue ou augmentée. L'usage d'herbicide est divisé par trois environ dans les prototypes comparativement au système témoin.

L'apport des modèles pour aider à la conception a été évalué par les participants et les organisateurs des ateliers. DECIFLORSYS permet d'évaluer en direct, pendant un atelier, les propositions des agriculteurs et évalue les grandes décisions stratégiques pour le système de culture. À cause de sa lenteur et complexité, FLORSYS doit être utilisé hors atelier mais il permet d'aller plus loin, en évaluant des règles plus fines (date et options détaillés de chaque opération) et en prédisant la dynamique de la flore plurispécifique à travers le temps. Il permet aussi de faire du diagnostic, en identifiant les événements opérationnels et météorologiques à l'origine d'une défaillance de maîtrise des adventices. Les agriculteurs peuvent ainsi améliorer les prototypes sur la base des résultats des modèles après avoir discuté de la fiabilité à leur accorder.

Enfin, les agriculteurs étaient particulièrement intéressés par les résultats des critères de temps de travail et de viabilité économique de leurs systèmes innovants, estimés par le modèle d'évaluation multicritère DEXiPM. Ces critères permettent d'évaluer certains aspects de la faisabilité des prototypes, complétant ainsi le raisonnement purement agronomique par les aspects économique et social du système de culture pour proposer des stratégies durables de gestion agroécologique des adventices.

Par ailleurs, les ateliers de co-conception ont permis des apprentissages chez les agriculteurs et ont ouvert de nouveaux horizons dans leurs exploitations. Un agriculteur a, par exemple, exprimé le souhait d'acheter une herse étrille suite aux discussions du deuxième atelier, achat qu'il a réalisé par la suite.

Tableau 1. Performance du système de référence et des prototypes en termes de gestion des adventices. Indicateurs d'impact de la flore adventice sur la production agricole et la biodiversité estimés par l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS. Les cellules sont colorées du rouge (plus mauvaise performance) au vert (meilleure performance).

Système de culture (cultures de printemps en italique, couverts soulignés)	Offre trophique pour		Nuisibilité pour la production agricole		
	Carabes	Abeilles	Perte de rendement	Pollution récolte	Salissement de la parcelle
Référence (colza/blé/blé/orge)	4.65	1.59	45.8	2.82	1.51
Prototype A [§]	4.60	1.59	31.8	2.37	1.02
Prototype B [§] avec herbicides	5.11	1.66	25.5	2.09	0.87
B avec désherbage mécanique	5.01	1.67	24.2	2.11	0.99
B avec herbicides + désh. méca.	4.82	1.60	23.7	2.03	0.84
B-lentille + désh. mécanique ^{&}	5.07	1.74	40.6	2.68	1.28

[§] Colza+légumineuses/blé/couvert gélif puis orge/colza+pois/trèfle puis tournesol ou betterave/blé/orge

[§] Colza/blé/couvert gélif puis orge/couvert gélif puis orge/luzerne (2 ans)/blé/couvert gélif puis chanvre

[&] Luzerne remplacée par lentilles

4. Conclusion

La méthode de co-conception mise en place avec les agriculteurs est adaptée pour concevoir des systèmes de culture permettant de limiter la nuisibilité de la flore adventice tout en diminuant de manière significative les usages en herbicides. Cette expérience a mis en évidence la complémentarité des approches et des outils utilisés. En effet, la mobilisation du modèle DECIFLORSYS en cours d'atelier a permis d'évaluer en direct l'efficacité des prototypes et d'aider les agriculteurs à améliorer leurs propositions ou suggérer d'autres alternatives. L'analyse post atelier avec le modèle FLORSYS a permis d'affiner le diagnostic et de donner une idée de la trajectoire d'évolution de la flore adventice afin d'identifier l'émergence d'éventuelles espèces problématiques, parfois difficiles à déterminer par expertise. L'engagement des agriculteurs tout au long du processus et leurs retours suite aux différents ateliers illustrent l'intérêt qu'ils portent à une telle démarche pour les aider dans leur problématique de gestion de la flore adventice.

5. 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
- Colbach N., Colas F., Pointurier O., Queyrel W., Villerd J. (2017) A methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. *European Journal of Agronomy* 87, 59–73
- Craheix D., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Omon B., Reau R., Doré T. (2012) Multicriteria assessment of the sustainability of cropping systems: A case study of farmer involvement using the MASC model. 10th European IFSA Symposium, Aarhus, Denmark, 9
- Jeuffroy M. H., Bergez J. E., David C., Flénet F., Gate P., Loyce C., Maupas F., Meynard J. M., Reau R., Surleau-Chambenoit C. (2008) Utilisation de modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale: bilan et perspectives. in R. Reau and T. Doré, editors. *Systèmes de culture innovants et durables, quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer?* Ed. Educagri, 109-128
- Llewellyn RS, Pannell DJ (2009) Managing the herbicide resource: an evaluation of extension on management of herbicide-resistant weeds. *AgBioForum* 12, 358–369
- Loyce C., Rellier J., Meynard J. M. (2002) Management planning for winter wheat with multiple objectives (1): the BETHA system. *Agricultural Systems* 72, 9-31
- Pelzer E., Fortino G., Bockstaller C., Angevin F., Lamine C., Moonen C., Vasileiadis V., Guérin D., Guichard L., Reau R., Messéan A. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18, 171-182
- Reau R., Monnot L.-A., Schaub A., Munier-Jolain N.M., Pambou I., Bockstaller C., Cariolle M., Chabert A., Dumans P. (2012) Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs, *Innovations Agronomiques* 20, 5-33
- Tixier P. (2004) Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables: application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Ph. D. thesis, ENSAM, 237 pp.

Évaluation par simulation des performances et de la durabilité de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure

Nicolas Cavan ⁽¹⁾, Bertrand Omon ⁽²⁾, Thierry Castel ⁽³⁾, Nathalie Colbach ⁽⁴⁾ & Frédérique Angevin ⁽¹⁾

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

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

⁽³⁾ Centre de Recherches de Climatologie, CNRS, Univ Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

⁽⁴⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

Correspondance : nicolas.cavan@inra.fr

Résumé

Les systèmes de culture d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure, majoritairement spécialisé en grande culture, ont été évalués avec le modèle de dynamique adventice FLORSYS. Les objectifs de ce groupe sont l'amélioration de la durabilité de leurs systèmes et le maintien ou la réduction de leur utilisation de produits phytosanitaires, dont les herbicides. L'évaluation porte sur une étape de l'innovation, en comparant le système de culture actuellement pratiqué aux systèmes innovants envisagés. Avec un indice de fréquence de traitement (IFT) herbicides moyen de 1,2 dans les systèmes de culture pratiqués, les systèmes innovants proposés par les agriculteurs permettent (à deux exceptions près) une réduction allant de -0,1 à -0,6 en IFT. La nuisibilité des adventices pour la production, évaluée par simulation avec FLORSYS, ne varie pas significativement pour six des systèmes innovants, diminue pour trois systèmes de culture, et augmente pour les deux derniers. Afin de vérifier que les pistes envisagées (notamment le recours à des opérations de travail du sol plus fréquentes et plus profondes, allant jusqu'à la réintroduction du labour) n'ont pas d'effets négatifs sur la fertilité du sol, des analyses multicritères ont été réalisées avec le modèle DEXiSOL. Les premiers résultats indiquent que la qualité physique du sol augmente pour quatre systèmes innovants et reste stable pour six autres. Une analyse de durabilité complète et l'étude des performances des systèmes de culture innovants avec des scénarios climatiques futurs restent à faire.

Mots-clés : système de culture, adventices, évaluation multicritère, changement climatique

1. Introduction

Le groupe DEPHY Ferme de l'Eure considéré s'est investi dans une démarche de réduction de l'usage des produits phytosanitaires, notamment les herbicides, et plus globalement d'amélioration de la durabilité de leurs systèmes de culture. Plusieurs évaluations multicritères de leurs systèmes ont déjà été réalisées, conduisant à des évolutions successives de pratiques. L'utilisation du modèle de dynamique adventice FLORSYS (cf. annexe, p. 98) pour évaluer leurs systèmes actuellement pratiqués et les systèmes innovants envisagés constitue une nouvelle opportunité d'évolution de leurs systèmes de culture. La comparaison des résultats de simulation des systèmes pratiqués et innovants permettra ainsi de caractériser les effets d'une étape dans le processus d'évolution des systèmes de culture de chaque agriculteur du groupe, et d'identifier des systèmes de culture innovants performants pour la gestion durable des adventices.

2. Matériels et méthode

Au sein du groupe DEPHY Ferme, l'animateur du groupe a collecté les pratiques actuelles des agriculteurs (systèmes de culture *Pratiqués*), ainsi que les changements de pratiques envisagés par les agriculteurs, qui constituent les systèmes *Innovants*. La principale culture des successions culturales est

le blé tendre d'hiver, avec la betterave sucrière. Les rotations sont complétées avec colza, orge, pois, lin textile ou maïs grain, selon les agriculteurs.

Chacun de ces systèmes a été évalué avec FLORSYS qui simule la dynamique de la flore adventice et l'effet sur la production, en fonction des systèmes de culture et du pédoclimat. Chaque système a été simulé sur 30 années, avec 10 répétitions climatiques. Les différences entre systèmes de culture ont été caractérisées en utilisant six indicateurs simulés par FLORSYS :

- un indicateur d'usage herbicides : le niveau d'usage herbicides, via l'IFT herbicides ;
- trois indicateurs de nuisibilité des adventices :
 - o le ratio de biomasse adventice sur la biomasse de la culture au début de la floraison des cultures comme proxy de la perte de rendement de l'année n ($RBAC_n$) ;
 - o la résilience du système face à un pic de nuisibilité des adventices estimée par le nombre de pics de nuisibilité $\times$ leurs durées respectives, définis ci-dessous :
 - les **pics de nuisibilité des adventices** sont définis comme les années de simulation telles que $RBAC_n > 1,01$ (Colbach et Cordeau, 2018) et $RBAC_n > RBAC_{n-1}$
 - la **durée d'un pic** est le nombre d'années nécessaires pour un retour à $RBAC_n < 1,01$.
 - o le risque de non-maîtrise des adventices à moyen ou long terme ("dérive"), estimé par la corrélation de Spearman entre $RBAC_n$ et l'année de simulation n ;
- deux indicateurs de contribution des adventices à la biodiversité :
 - la diversité de la biodiversité végétale sauvage, via l'indice de Piélou ;
 - un indicateur composite caractérisant les ressources trophiques pour la faune sauvage. Il s'agit de la première composante d'une Analyse en Composantes Principales portant sur les indicateurs de ressources trophiques pour les oiseaux, carabes, abeilles, bourdons, syrphes, et papillons prédits par FLORSYS. Cette composante explique 80 % de la variabilité de ces six indicateurs.

La contribution des systèmes de culture à la qualité physique du sol a été évaluée en utilisant la partie correspondante du modèle DEXiSOL (Thibault, 2017).

3. Résultats

Les résultats des simulations FLORSYS pour les systèmes de culture sont présentés dans le Tableau 1.

Les systèmes innovants envisagés par les agriculteurs **1, 3 et 6** permettent de réduire l'utilisation d'herbicides (de -0,1 à -0,4 IFT) sans augmenter la nuisibilité des adventices (et en diminuant le risque de dérive adventice à moyen – long terme pour le système innovant 1B). Les systèmes innovants de ces 3 agriculteurs incluent des opérations de désherbage mécanique, ainsi que des implantations plus fréquentes de couvert en interculture longue. L'agriculteur **1** combine ces deux premiers leviers avec la réintroduction du labour (associée à une réduction de l'usage du glyphosate), tandis que l'agriculteur **6** privilégie la modification de sa succession de culture. L'agriculteur **7** combine les différents leviers mobilisés par les agriculteurs **1, 3 et 6**, avec une modification plus importante de sa succession culturale : réduction de la présence de la betterave (une culture sur six au lieu d'une sur quatre) et ajout du maïs grain dans la rotation. Cela lui permet de réduire la nuisibilité des adventices et le risque de dérive de la pression adventice (significatif pour le système Pratiqué A).

L'agriculteur **5** envisage de modifier les successions de culture de ses deux systèmes : abandon de la betterave (Innovant A), remplacement de l'avoine de printemps par du maïs grain (Innovant B), et introduction du pois de printemps dans les deux systèmes. En introduisant également le désherbage mécanique, ces changements permettent une diminution de la nuisibilité, mais aussi une diminution de l'équitabilité de la flore adventice, ainsi que des ressources trophiques disponibles.

Enfin, les agriculteurs **2 et 4**, en cherchant à réduire l'IFT herbicide déjà très bas dans leur système pratiqué, connaissent une augmentation de la nuisibilité des adventices, ainsi qu'une augmentation de l'équitabilité de la flore adventice et des ressources trophiques disponibles. Ces rotations sont caractérisées par une prairie en tête de rotation (exploitation en polyculture élevage). L'agriculteur **2** augmente la part des grandes cultures (rotation de 9 ans au lieu de 6, avec 3 ans de prairie), pouvant expliquer l'augmentation de nuisibilité, qui reste néanmoins assez faible ($RBAC < 1$ en moyenne).

La réintroduction du labour dans les systèmes innovants des agriculteurs 1 et 7 ne conduit pas à la dégradation de la qualité physique du sol, et permet même une augmentation dans le cas de l'agriculteur 7. En effet, la pratique du labour moins d'un an sur trois permet de faciliter la régénération de la structure du sol sans accélérer sa dégradation. Par ailleurs, le principal facteur expliquant une évolution de la qualité physique du sol pour les innovations proposées est la proportion de cultures récoltées à l'automne (maïs grain et betterave), dans des conditions humides. Une diminution de la proportion de ces cultures dans les pistes proposées par les agriculteurs 2, 5 (Innovant A) et 7 conduit à une amélioration de la qualité physique du sol pour ces systèmes. Aucune dégradation de la qualité des sols n'est constatée pour les autres systèmes innovants proposés.

Tableau 1. Performances des systèmes de culture du groupe DEPHY Ferme pour la gestion d'adventices simulées avec FLORSYS. L'intensité croissante des couleurs représente les valeurs croissantes de chaque variable (rouge pour les variables de nuisibilité et l'IFT, vert pour les variables de biodiversité). Les valeurs d'une colonne suivies de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes (méthode de Tukey, p-value 0,05). * : p-value inférieure à 0,05 pour la corrélation de Spearman entre RBAC_n et l'année de simulation n. Principaux changements envisagés dans les systèmes de culture innovants : RL : réintroduction du labour ; DG : diminution de l'usage du glyphosate ; DM : désherbage mécanique ; CS : changements dans la succession de cultures.

Agriculteur <i>Changements du système innovant</i>	Système de culture	Nuisibilité pour la production					Usage herbicides	Contribution à la biodiversité					
		Perte de rendement log(RBAC)		Résilience (Pics)		Dérive	IFT herbicide	Équitabilité de la flore adventice (Piélou)		Ressources trophiques pour faune sauvage			
1	Pratiqué	-1,02	<i>de</i>	23,5	<i>abcde</i>	0,60	*	1,74	<i>j</i>	0,30	<i>f</i>	0,18	<i>f</i>
<i>RL – DG – DM</i>	Innovant A	-0,64	<i>ef</i>	27,2	<i>abcdef</i>	0,36	*	1,63	<i>ij</i>	0,33	<i>g</i>	0,42	<i>f</i>
<i>RL – DG – DM</i>	Innovant B	-0,85	<i>e</i>	25,0	<i>abcde</i>	0,33		1,32	<i>fgh</i>	0,31	<i>fg</i>	0,27	<i>f</i>
<i>RL – DG – DM</i>	Innovant C	-0,65	<i>ef</i>	22,5	<i>abcd</i>	0,37	*	1,26	<i>efg</i>	0,33	<i>g</i>	0,82	<i>gh</i>
2	Pratiqué	-1,53	<i>cd</i>	18,7	<i>abc</i>	0,21		0,53	<i>ab</i>	0,22	<i>abc</i>	0,77	<i>g</i>
CS	Innovant	-0,13	<i>f</i>	22,1	<i>abcd</i>	0,26		0,4	<i>a</i>	0,25	<i>de</i>	1,17	<i>i</i>
3	Pratiqué	1,29	<i>g</i>	34,8	<i>cdefg</i>	0,02		1,36	<i>fgh</i>	0,20	<i>a</i>	-1,32	<i>ab</i>
<i>DM</i>	Innovant A	0,99	<i>g</i>	39,7	<i>efg</i>	0,22		1,01	<i>cd</i>	0,20	<i>a</i>	-1,41	<i>a</i>
<i>DM</i>	Innovant B	0,77	<i>g</i>	42,5	<i>fg</i>	-0,05		1,13	<i>de</i>	0,20	<i>a</i>	-1,44	<i>a</i>
4	Pratiqué	-0,72	<i>ef</i>	36,1	<i>defg</i>	0,20		0,66	<i>b</i>	0,24	<i>bcd</i>	-0,16	<i>e</i>
<i>CS – DM</i>	Innovant	1,03	<i>g</i>	29,9	<i>bcdef</i>	0,42	*	0,43	<i>a</i>	0,25	<i>de</i>	1,08	<i>hi</i>
5	Pratiqué A	1,17	<i>g</i>	50,8	<i>g</i>	0,04		0,91	<i>c</i>	0,26	<i>de</i>	0,35	<i>f</i>
<i>CS – DM</i>	Innovant A	-3,02	<i>a</i>	18,1	<i>ab</i>	0,12		0,98	<i>cd</i>	0,24	<i>cd</i>	-1,04	<i>b</i>
5	Pratiqué B	-1,24	<i>de</i>	13,6	<i>a</i>	0,06		1,47	<i>hi</i>	0,27	<i>e</i>	0,33	<i>f</i>
<i>CS – DM</i>	Innovant B	-2,65	<i>ab</i>	15,8	<i>abc</i>	0,31		1,01	<i>cd</i>	0,24	<i>bcd</i>	-0,22	<i>de</i>
6	Pratiqué	-2,10	<i>bc</i>	12,2	<i>a</i>	-0,09		1,41	<i>gh</i>	0,20	<i>a</i>	-0,50	<i>cd</i>
<i>CS – DM</i>	Innovant	-1,37	<i>cde</i>	16,3	<i>abc</i>	0,27		1,17	<i>def</i>	0,21	<i>ab</i>	-0,69	<i>c</i>
7	Pratiqué A	-0,13	<i>f</i>	27,2	<i>abcdef</i>	-0,25		1,65	<i>j</i>	0,27	<i>e</i>	0,19	<i>f</i>
7	Pratiqué B	-0,96	<i>de</i>	18,4	<i>ab</i>	0,02		1,27	<i>efg</i>	0,24	<i>cd</i>	0,36	<i>f</i>
<i>RL – DG – DM – CS</i>	Innovant	-2,29	<i>b</i>	19,7	<i>abc</i>	-0,02		1,34	<i>fgh</i>	0,24	<i>cd</i>	0,44	<i>f</i>

4. Conclusion

Parmi les systèmes innovants proposés, la plupart permettent de réduire l'IFT herbicides sans augmenter la nuisibilité des adventices, ou réduire la nuisibilité des adventices pour la production sans augmenter l'IFT herbicides (donc avec l'utilisation de nouveaux leviers de gestion des adventices). Réduire conjointement l'IFT herbicides et la nuisibilité des adventices est également possible, mais nécessite des innovations plus importantes (notamment plusieurs changements dans la succession de culture).

L'utilisation de FLORSYS dans le contexte d'un groupe DEPHY Ferme permet d'alimenter les réflexions sur les leviers de gestion des adventices. Cela peut donner des indications supplémentaires par rapport à l'expertise, notamment sur les combinaisons de changement de pratiques et leurs effets possibles à moyen et long termes. Néanmoins, l'utilisation de FLORSYS au sein de ce groupe nécessite, pour être efficace, un temps de travail et d'interprétation importants. Par ailleurs, ce travail doit être complété en évaluant les performances des systèmes innovants dans un contexte de changement climatique et de changement de flore adventice.

Enfin, l'autre objectif des agriculteurs du groupe est d'améliorer la durabilité de leur système de culture. Si la qualité physique du sol ne change pas, voire est améliorée pour certains systèmes innovants envisagés, il faut compléter ces résultats avec une analyse de durabilité exhaustive (économique, sociale et environnementale) des systèmes innovants envisagés.

5. Références

- Colbach, N., Cordeau, S., 2018. Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *Eur. J. Agron.* 94, 67–78.
- Thibault C., 2017. Conception d'un modèle d'évaluation multicritère des effets du travail du sol. Mémoire de fin d'études, INP ENSAT. 63 p.

Comparaison de méthodes de conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices

Nicolas Cavan¹, Bertrand Omon², Aurélie Tailleur³, Sophie Dubois⁴, Wilfried Queyrel⁵, Bastien Van Inghelandt⁵, Nathalie Colbach⁵, Frédérique Angevin¹

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

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

⁽³⁾ Arvalis – Institut du végétal – station de la Jaillière, 44370 La Chapelle Saint Sauveur, France

⁽⁴⁾ Arvalis – Institut du végétal – station de Boigneville – 91270 Boigneville, France

⁽⁵⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

Correspondance : nicolas.cavan@inra.fr

Résumé

Trois démarches de conception de systèmes de culture ont été comparées sur leur contribution à l'amélioration de la gestion durable des adventices et sur l'importance des changements de pratiques envisagés : (i) conception par expertise d'acteurs multiples ; (ii) co-conception d'un système innovant par un groupe d'agriculteurs ; (iii) co-conception de systèmes innovants pour chaque système pratiqué d'un groupe d'agriculteurs. En effet, la gestion des adventices et les changements de pratique envisagés peuvent varier fortement selon les acteurs impliqués dans la démarche, l'objet d'étude (un système de culture « synthétique » pour le groupe ou un système innovant par agriculteur) et la durée de la démarche, conduisant à des méthodes de conception complémentaires. Les systèmes de culture issus de ces trois démarches ont été simulés avec le modèle de dynamique de la flore adventice FLORSYS. Six indicateurs décrivant la nuisibilité des adventices pour la production, la diversité des adventices et l'intensité d'usage d'herbicides (représenté par l'Indice de Fréquence de Traitement – IFT herbicides) ont été utilisés pour évaluer les systèmes. Une Analyse en Composantes Principales réalisée sur cet échantillon indique plusieurs résultats majeurs. Tout d'abord, la nuisibilité des adventices et l'IFT herbicides ne sont pas corrélés. Ensuite, les systèmes innovants conçus par expertise d'acteurs multiples (i) conduisent à des changements d'efficacité de gestion des adventices importants et contrastés, à l'inverse de la co-conception par des agriculteurs (changements plus faibles et moins variables entre systèmes). Enfin, l'évolution des systèmes innovants co-conçus pour chaque agriculteur (iii) porte surtout sur une amélioration de l'efficacité des pratiques de gestion des adventices et la substitution de l'usage des herbicides par des pratiques alternatives, avec une réduction faible de l'IFT herbicides. Cette réduction est plus forte pour les systèmes issus de la démarche (ii), et de la démarche (i) lorsque cela faisait partie des objectifs de conception initiaux.

Mots-clés : conception, système de culture, adventices, herbicides, pratiques culturales, évaluation multicritère

1. Introduction

Plusieurs méthodes de conception de systèmes de culture innovants peuvent être mobilisées, conduisant à des innovations plus ou moins importantes sur l'échelle Efficience – Substitution – Reconception (Hill & McRae, 1995) et à des évolutions différentes des performances du système en termes de gestion des adventices. Trois démarches de conception sont comparées sur ces performances : (i) conception de système de culture innovant par expertise d'acteurs multiples pour la mise en place d'essais longue durée ; (ii) co-conception collective par un groupe d'agriculteurs d'un système de culture innovant (et ses quelques variantes) ; (iii) co-conception d'un système innovant pour le système de chaque agriculteur présent dans un groupe DEPHY Ferme.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence des complémentarités éventuelles entre méthodes de conception. En effet, on peut supposer que des systèmes innovants basés sur l'efficacité et/ou la substitution sont plus simples à mettre en œuvre par des agriculteurs, mais conduisent à de faibles

changements des performances en termes de gestion des adventices. A l'inverse, des systèmes très innovants (basés sur la reconception), plus difficiles à prendre en main pour des agriculteurs, peuvent conduire à des évolutions marquées des performances et sont utiles pour la recherche.

2. Matériel et méthodes

Les systèmes innovants utilisés dans cette étude sont issus de trois démarches de conception différentes :

- (i) *Les systèmes innovants du projet Syppre¹²* : pour chaque plateforme expérimentale, 10 à 15 personnes ont participé à la conception de systèmes de culture innovants, comprenant des agriculteurs, des acteurs des filières et des experts locaux. Le système innovant le plus prometteur a été sélectionné pour être mis en place sur la plateforme, en plus d'un système témoin représentatif de la région (cf. présentation de Dubois et Tailleur, p. 36).
- (ii) *Ateliers de co-conception collective* : conception par un groupe d'agriculteurs d'un système de culture innovant (et quelques variantes possibles) à partir d'un système de référence local, en mobilisant des apports de connaissances ponctuels par des experts et un outil d'aide à la conception (cf. présentation de Van Inghelandt et al, p. 39).
- (iii) *Co-conception de systèmes innovants pour chaque système pratiqué d'un groupe d'agriculteurs DEPHY Ferme* : démarche similaire à celle du point (ii), mais s'inscrivant sur un temps plus long (plusieurs années). Cette durée permet de définir, en ateliers et individuellement, au moins un système de culture innovant pour chaque agriculteur, et de faire évoluer ces systèmes innovants par itérations (cf. présentation Cavan et al, p. 42).

Au total, les trois méthodes de conception ont abouti à 24 systèmes de culture innovants (+ 18 systèmes de culture initiaux) qui ont ensuite été évalués avec le modèle de dynamique adventice FLORSYS, simulateur de la dynamique de la flore adventice en fonction du système de culture et du pédoclimat (cf. annexe, p. 98). Chaque système de culture a été simulé pendant 30 ans, avec dix répétitions climatiques. Six indicateurs tirés de ces simulations ont été utilisés : (1) la richesse spécifique des adventices, (2) l'équitabilité de la flore adventice (Indice de Pielou), (3) l'offre trophique pour les abeilles, bourdons, syrphes, papillons, carabes et oiseaux, (4) le ratio entre la biomasse adventices et la biomasse de la culture au début du de la floraison de la culture de rente, qui constitue un proxy de la perte de rendement des cultures due aux adventices, (5) le nombre et la durée de « pics » de perte de rendement utilisés comme proxy de la résilience du système de culture face à une forte nuisibilité ponctuelle des adventices et (6) le risque de non-maîtrise à moyen terme (« dérive ») – cf Cavan et al., p 42 pour plus d'explications. 24 descripteurs ont été calculés pour décrire de manière synthétique chaque système de culture, selon les grandes thématiques suivantes : (i) diversité de la succession de cultures ; (ii) opérations de travail du sol ; (iii) couverture du sol en interculture ; (iv) implantation de la culture de rente ; (v) désherbage mécanique et (vi) utilisation d'herbicides.

Pour identifier les différences entre les méthodes de conception, il est nécessaire de limiter les effets des contextes agronomiques et pédoclimatiques très variés qui caractérisent notre échantillon de systèmes de culture. Dans ce but, les analyses statistiques porteront sur les évolutions des indicateurs entre systèmes de culture initial ($SC_{Initial}$) et innovant ($SC_{Innovant}$), caractérisées pour chaque indicateur I par la différence $d = I_{SC_{Innovant}} - I_{SC_{Initial}}$. A partir des 42 systèmes de culture simulés (dont 24 systèmes innovants), 25 évolutions de systèmes ont pu être identifiées (un des systèmes innovants ayant été conçu pour remplacer deux systèmes de culture actuellement pratiqué par un agriculteur).

Devant le nombre élevé d'indicateurs de performance et de descripteurs de systèmes de culture ($6+24=30$) et relativement faible d'individus (25), le recours à une Analyse en Composantes Principales (ACP), associée à une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) permet d'identifier rapidement les principales différences entre méthodes de conception du point de vue de la gestion des adventices (*FactoMineR* v1.36). Les descripteurs sont utilisés uniquement comme variables quantitatives supplémentaires dans l'ACP et la CAH. Ils ne sont pas présentés dans le cercle des corrélations, mais utilisés pour décrire les principales différences de pratiques culturelles entre les classes identifiées par la CAH.

¹² Programme d'essais longue durée avec des systèmes de culture innovants répondant à trois objectifs : la productivité physique, la rentabilité économique et l'excellence environnementale. Ce programme est décliné dans 5 milieux agricoles contrastés de grande culture (les plateformes) avec des objectifs spécifiques supplémentaires.

Dans la présentation des résultats, les évolutions de système de culture (c'est-à-dire les individus de l'ACP) sont numérotées de la manière suivante :

- (i) 9 évolutions (individus 1 à 9) issues des systèmes de culture innovants conçus par expertise d'acteurs multiples pour les essais des plateformes Syppre (5 systèmes innovants étant mis en place sur la plateforme du Béarn) ;
- (ii) 4 évolutions (individus 10 à 13) issues de deux ateliers de co-conception par un groupe d'agriculteurs d'un système de culture innovant principal (avec une variante) ;
- (iii) 2 évolutions (individus 14 à 25) issues des systèmes de culture innovants proposés par les membres d'un groupe DEPHY Ferme pour leurs systèmes de cultures respectifs.

3. Résultats

Les principales corrélations entre les différences des indicateurs (entre système innovant et système initial) sont présentées dans la Figure 1.A. Les variations des indicateurs de nuisibilité des adventices (perte de rendement, risque de dérive à moyen terme, manque de résilience du système de culture – « Pics résilience ») sont fortement corrélées entre elles, et corrélées à la richesse spécifique des adventices ainsi qu'à l'offre trophique pour les pollinisateurs, carabes et oiseaux. Les systèmes de culture innovants qui favorisent la richesse spécifique des adventices et l'offre trophique sont donc souvent aussi ceux qui augmentent la nuisibilité des adventices pour la production. La différence d'intensité d'usage herbicide (IFT) n'est pas corrélée à la variation de nuisibilité des adventices. En effet, la réduction des herbicides est compensée par des méthodes alternatives préventives et curatives. Enfin, il n'y a pas non plus de corrélation entre nuisibilité ou biodiversité fonctionnelle (offre trophique pour pollinisateurs, carabes et oiseaux) d'une part, et l'équitabilité de la flore (Piélu) d'autre part.

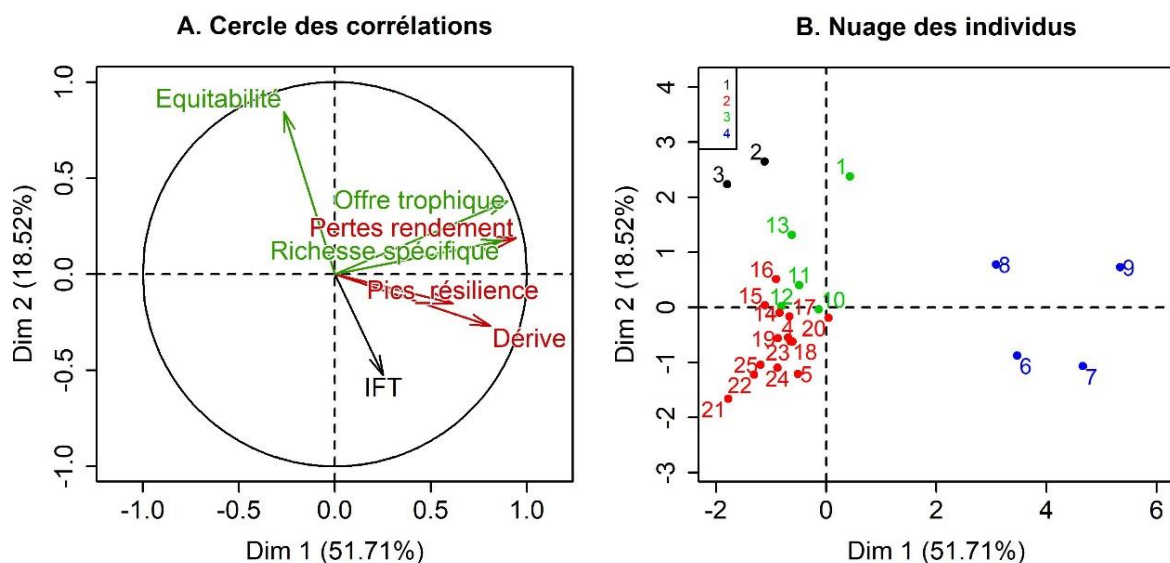


Figure 1. Performance en termes de gestion d'adventices des systèmes de culture innovants comparée au système initial. Analyse en Composantes Principales des variations des valeurs d'indicateurs des systèmes de culture comparées au système initial dans chaque situation de production. A. Compromis entre biodiversité (en vert), nuisibilité pour la production (en rouge) dépendant des adventices et niveau d'usage herbicide (en noir). B. Nuage des individus. Les couleurs représentent les classes de la Classification Ascendante Hiérarchique, les numéros permettent d'identifier les méthodes de conception (cf. Matériel et méthodes).

La figure 1.B. représente le nuage des individus (chaque individu représentant les variations des valeurs des indicateurs lors du passage d'un système de culture initial à un système innovant). Les systèmes innovants co-conçus par des agriculteurs représentent une faible variation des performances en termes de gestion des adventices, en comparaison aux systèmes conçus par expertise d'acteurs multiples

(individus 1 à 9). En effet, les individus représentant les deux méthodes de co-conception par des agriculteurs (individus 10 à 25) sont assez groupés, et proches de l'origine, à l'inverse des systèmes conçus par expertise multiple. De plus, ces derniers sont répartis sur les quatre classes issues de la Classification Ascendante Hiérarchique, alors que tous les individus des deux méthodes de co-conception sont présents dans une seule classe.

La **classe 1** (rouge) contient les systèmes du groupe DEPHY Ferme (iii), ainsi que le système innovant de la plateforme Syppre de Picardie et un des systèmes innovant de la plateforme Syppre Béarn. Ils sont caractérisés par une réduction plus faible de l'usage d'herbicides, un recours plus fréquent au désherbage mécanique et la réintroduction du labour pour certains systèmes. C'est le seul groupe avec une diminution significative de la perte de rendement.

La **classe 2** (vert) regroupe les systèmes co-conçus collectivement par des agriculteurs (ii), ainsi que le système innovant de la plateforme Syppre Berry (individu 1). Elle est caractérisée par une forte réduction de l'usage d'herbicides (-0,9 en IFT, contre -0,4 pour l'ensemble des systèmes de culture innovants), ainsi qu'une diversification de la succession culturale plus importante (+3,2 cultures dans la rotation, contre +1,6 en moyenne). Cela se traduit par un maintien ou une augmentation de la nuisibilité des adventices pour la production.

La **classe 3** (noir) regroupe les systèmes des plateformes Syppre du Lauragais et de Champagne (individus 2 et 3), caractérisées par une forte augmentation de l'équitabilité, associée à la diversification importante de la rotation (+ 5 cultures en moyenne). Si la réduction des pertes de rendement n'est pas significative dans ce groupe, la résilience des systèmes face à des pics de pression adventice augmente.

Enfin, la classe 4 (bleu) regroupe les systèmes du cas Syppre Béarn. Comme la nuisibilité du système initial (monoculture de maïs, labour annuel) est très faible, elle augmente fortement dans tous les systèmes innovants basés sur le strip till et semis direct sous couvert (tout en restant assez faible dans le cas du semis direct sous couvert – individus 6 et 8).

4. Conclusion

Sur l'ensemble des systèmes de culture innovants évalués, nuisibilité des adventices et niveau d'usage herbicides ne sont pas corrélés : la réduction des herbicides est compensée par d'autres leviers pour une gestion durable des adventices, ce qui est similaire aux résultats de Colbach et Cordeau (2018, p. 12 dans ce colloque). La conception de système innovant pour chaque agriculteur au sein d'un groupe DEPHY Ferme conduit à des changements incrémentiels des systèmes (efficacité, substitution) et de la gestion des adventices. La conception collective d'un système innovant (méthodes (i) et (ii)) conduit à des changements plus profonds dans les systèmes de culture (reconception). Les performances en termes de gestion des adventices varient peu et de manière homogène pour la co-conception par des agriculteurs, en comparaison à la conception par expertise d'acteurs multiples. Les systèmes de culture des cinq plateformes Syppre correspondent à des contextes agronomiques et pédoclimatiques très divers (en comparaison au contexte assez homogène de chaque groupe de co-conception), ce qui pourrait expliquer cette variabilité plus grande. Celle-ci pourrait être due également à des systèmes plus complexes, nécessitant un ajustement fréquent des pratiques lors de leur mise en œuvre au champ (ce qui n'est pas pris en compte par FLORSYS) ou à l'utilisation de FLORSYS hors des limites de son domaine de validité pour les systèmes les plus innovants. Ces systèmes, plus complexes et difficiles à mettre en œuvre, constituent néanmoins des pistes de recherche pour la gestion durable des adventices. Ils sont complémentaires des systèmes co-conçus par les agriculteurs, *a priori* plus faciles à mettre en œuvre mais conduisant à des évolutions plus lentes des performances en termes de gestion des adventices.

5. Références

- Colbach, N., Cordeau, S., 2018. Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. Eur. J. Agron. 94, 67–78.
- Hill S.B., MacRae R.J., 1995. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. Journal of Sustainable Agriculture, 7(1), 81-87.

Apports de connaissances et méthodes issues de CoSAC pour l'enseignement de spécialisation en école d'ingénieur : exemple du module de conception de systèmes agroécologiques de la dominante Agroécologie pour des Productions Végétales durables (APOGEE) à AgroSup Dijon

Wilfried Queyrel, Sylvie Granger & Jacques Caneill

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

Correspondance : wilfried.queyrel@agrosupdijon.fr

Résumé

Les connaissances et méthodes développées dans le cadre de CoSAC ont été utilisées pour l'élaboration de travaux dirigés (TD) dans le cadre du module d'enseignement « conception de systèmes agroécologiques » en troisième année d'école d'ingénieur en agronomie. Ce module a pour objectif de former des étudiants à la conception de systèmes de cultures selon les principes de l'agroécologie. Différents supports issus de CoSAC sont mobilisés : (1) fiches descriptives de techniques innovantes pour la gestion de la flore adventices, (2) grilles de conseils, (3) plateau de jeu afin de réaliser des apports de connaissances sur les cultures, les principaux bioagresseurs, les leviers agronomiques et leurs combinaisons pour une gestion durable de la flore adventice. La méthode d'animation des ateliers de conception couplée au modèle d'évaluation DECIFLORSYS (Colas et al. soumis), développée dans le projet CoSAC, est exploitée dans le contexte de la formation selon les principes de la pédagogie inversée (Mazur, 1997). La finalité de ce TD est de faire manipuler aux étudiants des concepts et connaissances importants pour construire de nouveaux systèmes de culture répondant aux différentes attentes sociétales.

Mots-clés : formation, co-conception, agroécologie, système de culture, adventices

1. Introduction

Les attentes grandissantes de la société en termes de préservation des ressources naturelles, de qualité d'alimentation (sanitaire, nutritionnelle et gustative) amènent à réfléchir à de nouvelles formes d'agriculture qualifiées d'agroécologiques. Il s'agit de réduire de manière drastique les intrants de synthèse grâce à une meilleure prise en compte (i) des interactions biotiques, (ii) de la diversité des systèmes de culture et du paysage pour gérer les bioagresseurs, (iii) des cycles biogéochimiques à plusieurs échelles de temps et d'espace et enfin (iv) d'un matériel végétal adapté à ces nouvelles pratiques. C'est dans cette perspective qu'ont été construits les enseignements du module "conception de systèmes agroécologiques" de la dominante Agroécologie pour des Productions Végétales durables (APOGEE) à AgroSup Dijon. L'objectif est de former des ingénieurs agronomes généralistes dans le domaine de la production végétale capables d'imaginer et d'appliquer une démarche agroécologique pour concevoir des systèmes de cultures multiperformants sur le plan agronomique, économique, environnemental, en intégrant des contraintes réglementaires et technico-socio-économique. La gestion de bioagresseurs tels que les adventices est un élément prégnant dans la conception de systèmes de culture agroécologiques. Il a donc été choisi d'intégrer de nouvelles approches et connaissances scientifiques issues du projet CoSAC dans les travaux dirigés du module. Ces séances ont pour objectif de former les étudiants à des méthodes de conception de systèmes de culture en atelier participatif dans un contexte de réduction des produits phytopharmaceutiques (herbicides principalement). Cet apprentissage passe par la mise en situation des étudiants dans le cadre d'une approche participative, différente d'une approche descendante, afin de les familiariser à une posture de co-construction de connaissances avec différents acteurs du monde agricole.

2. Matériels et méthodes

Le contenu de la séance de travaux dirigés (TD) s'appuie au niveau scientifique sur les avancées des disciplines en lien avec la gestion de la flore adventice dans un contexte de production végétale : agronomie, écologie, écophysiologie et science des sols. Une partie de ces connaissances proviennent de prérequis des années précédentes ou d'autres modules de la dominante, l'autre est apportée à partir de différents supports :

- des fiches descriptives des pratiques innovantes de gestion de la flore adventice, provenant des études expérimentales et de modélisation réalisées dans le projet CoSAC ;
- de grilles de conseils permettant de mieux appréhender l'effet de combinaison de techniques sur la flore adventices, provenant également de CoSAC ;
- des fiches synthétiques sur la biologie des principales adventices rencontrées (support mission Ecophyt'eau®).

Le deuxième support mobilisé est le plateau de jeu mission Ecophyt'eau® qui permet de faciliter la conception et les interactions entre les participants de l'atelier. La méthode d'animation est basée sur le principe de prototypage en atelier développé par (Vereijken 1997) et reprise dans le cadre de conception avec des groupes d'agriculteurs par (Reau et al., 2012). Elle vise à définir correctement les objectifs et le cadre de contraintes, puis de favoriser les interactions entre les participants pour concevoir des systèmes de cultures innovants.

Le troisième support est l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS. Il permet d'évaluer en direct les performances des systèmes en termes de gestion des adventices par l'intermédiaire d'un prédicteur rapide émulant le modèle de recherche FLORSYS (cf. annexe, p. 98). Il aide également à l'analyse des combinaisons de pratiques pour connaître leurs effets sur la flore à partir d'un arbre de régression.

Dans le contexte du TD, l'apport et la mobilisation des connaissances pour la conception reposent sur les principes de la pédagogie inversée (Mazur, 1997). Dans cette approche, les enseignants ou formateurs/animateurs apportent les informations au fur et à mesure de la progression du groupe. Les étudiants doivent s'approprier l'information, échanger des connaissances entre eux pour concevoir ensemble de nouveaux systèmes de culture. L'enseignant est alors en posture d'accompagnant favorisant une approche « bottom up » plutôt que « top-down ». La mobilisation du modèle DECIFLORSYS en de conception permet d'avoir un retour rapide aux étudiants pour savoir s'il s'approche de l'objectif visé. Par ailleurs, les connaissances synthétisées dans le modèle permettent de compléter les acquis des étudiants (Figure 1).

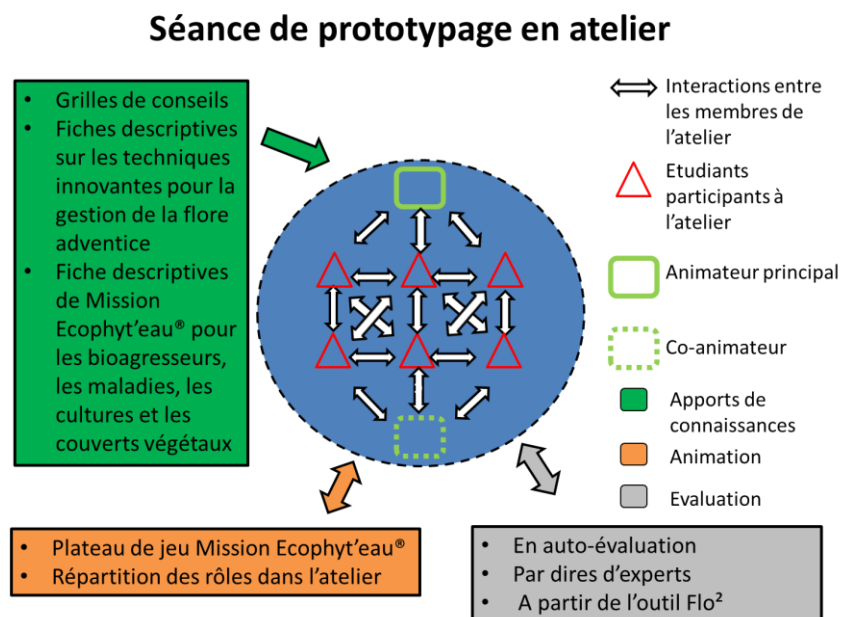


Figure 1. Organisation de la séance de travaux dirigés conception de systèmes de culture dans un contexte de réduction de l'usage des herbicides

3. Résultats attendus

La mise en pratique de ces séances de TD a pour finalité :

- de sensibiliser les étudiants à l'intérêt de l'approche participative et de l'apprentissage entre pairs dans la co-conception de système de culture ;
- de transmettre des connaissances et faire manipuler aux étudiants des concepts importants pour construire des systèmes innovants ;
- de les mettre dans une situation la plus proche possible d'un atelier avec des agriculteurs ;
- de les faire réfléchir à la posture à adopter pour animer les ateliers de conception.

4. Conclusion

Les liens étroits entre recherche et enseignement ont permis de mettre en œuvre une séquence de formation qui intègre de nouvelles connaissances et méthodes mobilisables par les étudiants dans leur vie professionnelle future : au sein d'instituts techniques, de chambres d'agricultures, d'entreprises d'agrofournitures, de coopératives, de services de la fonction publique ou de structures chargées de la protection de l'environnement. Cette expérience pourra dans une certaine mesure aider à une évolution dans la construction et l'élaboration de préconisations dans le domaine du conseil agricole. En effet, la posture de conseil est capitale dans l'évolution des pratiques et peut parfois constituer un frein à l'innovation (Pasquier, 2017). Ce changement de posture dans le conseil est plébiscité par des professionnels de monde agricole qui multiplient les projets et initiatives telles que le projet casdar CHANGER. Il semble donc important de former correctement les ingénieurs en agronomie de demain à ces approches.

5. Références

- CASDAR Changer, 2014-2016, Echanger sur le métier de conseiller : pour accompagner plus efficacement les agriculteurs dans le changement en productions végétales ; ministère de l'agriculture et de l'alimentation, avec la contribution du compte d'affectation spéciale « Développement agricole et rural.
- Colas F., S. Cordeau, S. Granger, M.-H. Jeuffroy, O. Pointurier, W. Queyrel, A. Rodriguez, J. Villerd, N. Colbach, 2019., Co-development of a decision support system for integrated weed management: contribution from future users, soumis à Environmental Modelling and Software
- Mazur E (1997) 'Peer instruction : a user's manual.' (Prentice Hall: Upper Saddle River, N.J.) 246 p
- Pasquier C (2017) Identifier les verrous à l'adoption des systèmes de culture utilisant des alternatives au désherbage chimique. INRA UMR SAD-APT, CoSAC (ANR-14-CE18-0007) rapport tâche 3.1.
- Reau, R. ; Monnot, L.-A. ; Schaub, A. ; Munier-Jolain, N. ; Pambou, I. ; Bockstaller, C. ; Cariolle, M. ; Chabert, A. ; Dumans, P., 2012. Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs, Innovations Agronomiques, 20 : 5-33.
- Vereijken, PETER. 1997. "A Methodical Way of Prototyping Integrated and Ecological Arable Farming Systems (I/EAFS) in Interaction with Pilot Farms." In Developments in Crop Science, 25:293–308. Elsevier.

Étude de processus

Quels traits des cultures et des adventices expliquent la perte de rendement due à la compétition pour la lumière ?

Nathalie Colbach ¹, François Dugué ¹, Antoine Gardarin ², Florence Strbik ¹,
Nicolas Munier-Jolain ¹, Delphine Moreau ¹

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

⁽²⁾ UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

Correspondance : Nathalie.Colbach@inra.fr

Résumé

Cultures et adventices sont en compétition pour la lumière, et choisir des cultures compétitives est un levier majeur de gestion intégrée des adventices. L'objectif de cette étude était de : (1) mesurer les paramètres qui déterminent la compétition pour la lumière de 25 espèces adventices et 30 cultures ; (2) établir des relations fonctionnelles pour estimer ces paramètres difficiles à mesurer à partir de traits d'espèces faciles à mesurer ou accessibles dans des bases de données ; (3) intégrer les paramètres dans le modèle FLORSYS qui simule la dynamique de levée des adventices et la croissance des adventices et cultures dans un champ virtuel au fil des années; (4) identifier les traits des cultures et des adventices qui déterminent l'impact des adventices sur la production agricole et la biodiversité. Pour cela, nous avons simulé 272 systèmes de culture de 7 régions. Nous montrons que les traits qui rendent les cultures compétitives envers les adventices (réponse à l'ombrage, investissement dans la surface foliaire...) sont aussi ceux qui, généralement, réduisent le potentiel de rendement de la culture.

Mots-clés : Réponse à l'ombrage, compétition, simulation, relation fonctionnelle

1. Introduction

Cultures et adventices sont en compétition pour la lumière, et choisir des cultures compétitives est un levier majeur de gestion intégrée des adventices. L'objectif de cette étude était de (1) mesurer les paramètres qui déterminent la compétition pour la lumière pour une gamme d'espèces adventices et cultures contrastées ; (2) établir des relations pour estimer ces paramètres difficiles à mesurer à partir de traits d'espèces faciles à mesurer ou accessibles dans des bases de données ; (3) intégrer les paramètres dans le modèle FLORSYS qui simule la dynamique de levée des adventices et la croissance des adventices et cultures dans un champ virtuel au fil des années; (4) identifier les caractéristiques des adventices et des cultures qui déterminent l'impact des adventices sur la production agricole et la biodiversité¹³.

2. Croissance précoce, morphologie potentielle et réponse à l'ombrage

Les paramètres reliés à la phase de croissance précoce (premiers stades) ont été mesurés en pots et en serre dans des conditions optimales de lumière, eau et nutriments en serre, par analyse d'images journalières. Ensuite, les paramètres décrivant la morphologie potentielle ont été mesurés en parcelles jardinées sur des plantes individuelles poussant dans des conditions optimales de lumière, eau et nutriments et prélevées à 4-5 stades au cours du cycle. La réponse à l'ombrage a été mesurée en comparant la morphologie potentielle à la morphologie de plantes poussant sous des filets d'ombrage, dans ces mêmes parcelles. Les résultats montrent que, comparées aux adventices, les cultures présentent une surface foliaire à la levée plus grande, une plus petite surface foliaire spécifique (SLA) ; elles sont plus étroites pour une biomasse donnée, et leur surface foliaire est distribuée moins uniformément le long de la hauteur de la plante. Les adventices répondent plus à l'ombrage que les cultures, en augmentant leur SLA, leur ratio de biomasse foliaire sur biomasse totale ainsi que leur hauteur et largeur de plante par unité de biomasse.

¹³ Détails dans Colbach, Moreau, Dugué, Gardarin, Strbik, Munier-Jolain (2019) Eur J Agron

3. Des relations fonctionnelles pour prédire la réponse à l'ombrage

Des relations fonctionnelles ont pu être établies pour estimer tous les paramètres à partir de traits des semences (masse, teneur en lipides...), des plantes (croissance épigée vs hypogée....) et des traits ou caractéristiques plus générales (clade, température de base, légumineuse ou non...). Par exemple, le taux de croissance relatif post-levée (RGR) est plus élevé pour les monocotylédones que les dicotylédones ; il augmente avec la température de base, la masse des semences et la teneur en lipides des semences. En cas d'ombrage, les espèces estivales, légumineuses, héliophiles et les plantes en forme de rosette s'étioilent plus.

4. Caractéristiques des cultures compétitives et adventices nuisibles

Nous avons simulé avec FLORSYS (cf. annexe, p. 98) 272 systèmes de culture issus d'agriculteurs de sept régions avec la flore adventice typique de ces régions pour obtenir la biodiversité et le rendement en présence d'adventices, puis sans aucune adventice pour calculer le rendement potentiel et la perte de rendement (Colbach & Cordeau, 2019, p. 12 dans ces actes). Nous avons ensuite identifié les déterminants de la compétitivité des cultures envers les adventices (Tableau 1).

Les cultures qui ont une perte de rendement faible due à la compétition pour la lumière avec les adventices ont des feuilles larges et fines (SLA élevé) et des plantes plus larges par unité de biomasse (WM élevé) en l'absence d'ombrage, surtout en fin de cycle. Lorsqu'elles sont ombrées par des plantes voisines, elles sont capables d'augmenter encore plus leur surface foliaire par unité de biomasse de feuille (SLA) et elles produisent des plantes plus grandes par unité de biomasse (HM), surtout en début de cycle. Cependant, ces caractéristiques sont également celles qui réduisent le rendement potentiel des cultures en l'absence d'adventices (Tableau 1). Ce rendement potentiel est d'autant plus élevé que les plantes cultivées réagissent peu à l'ombrage, investissent leur biomasse dans des tiges plutôt que des feuilles (faible ratio de biomasse foliaire LBR) qui sont petites et/ou épaisses (faible SLA) et positionnées vers le haut des plantes (forte hauteur médiane des feuilles RLH). D'autre part, une levée précoce grâce à de faibles exigences hydrothermiques pour la germination et la levée augmente le rendement potentiel de la culture en l'absence d'adventices.

Finalement, nous avons identifié les déterminants de la nuisibilité des adventices pour la culture (par ex. fort taux de croissance post-levée, feuilles larges et fines, biomasse allouée aux tiges plutôt qu'aux feuilles, feuilles vers le haut des plantes, surtout en cas d'ombrage etc.).

Tableau 1. Paramètres de cultures déterminant le rendement potentiel et la compétitivité face aux adventices. Corrélations de Pearson entre paramètres des cultures d'une part, rendement potentiel et perte de rendement d'autre part simulés avec FLORSYS sur 272 systèmes de culture x 30 ans x 10 répétitions climatiques. Les cellules vides indiquent des corrélations non significatives. Les cases vertes indiquent une amélioration de la situation (augmentation de potentiel, diminution de perte), les rouges l'inverse.

Paramètre de culture	Rendement potentiel (T/ha)			Perte de rendement (T/T)		
Exigences environnementales						
Température de base (°C)		-0.43				
Potentiel hydrique de base (MPa)		-0.82				
Morphologie potentielle des plantes (en l'absence d'ombrage)	Post levée	Végé- tatif	≥ Flo- aison	Post levée	Végé- tatif	≥ Flo- raison
Surface foliaire spécifique SLA (cm²/g),	-0.44	-0.54	-0.8			-0.45
Largeur spécifique de plante WM (cm/g)		-0.82	-0.85		-0.44	-0.43
Ratio de biomasse foliaire LBR (g/g)			-0.77			
Hauteur médiane des feuilles RLH (m/m)			0.77			
Réponse à l'ombrage : capacité à augmenter ...						
Surface foliaire spécifique SLA	-0.78	-0.77		-0.37	-0.36	
Hauteur de plante spécifique HM	-0.82		-0.73	-0.36		
Hauteur médiane des feuilles RLH	-0.57					

5. Perspectives

Cette étude a démontré que généralement les caractéristiques qui rendent les cultures compétitives envers les adventices sont aussi celles qui réduisent le potentiel de rendement, probablement à cause du coût impliqué par cette compétitivité. Il s'agit maintenant d'identifier des combinaisons de traits de culture qui permettent de concilier potentiel de rendement et faible perte de rendement due aux adventices, dans différentes situations de production et différents types de systèmes de culture. Nous allons aussi déterminer les traits idéaux pour des couples d'espèces à semer en mélange.

Enfin une méthode pour estimer le statut azoté à l'échelle de la plante dans des couverts hétérogènes !

Laurène Perthame, Nathalie Colbach, Delphine Moreau

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

Correspondance : laurene.perthame@inra.fr

Résumé

Afin de réduire les impacts environnementaux de l'agriculture, les couverts hétérogènes plurispécifiques sont amenés à augmenter. Cette étude, basée sur des expérimentations en serre, vise à repenser l'indice de nutrition azotée (INN), utilisé pour diagnostiquer le statut azoté d'un couvert monospécifique homogène afin d'en piloter la fertilisation azotée. En effet, les formalismes classiquement utilisés pour calculer l'INN varient en fonction de l'environnement lumineux, alors que les plantes des couverts hétérogènes n'ont pas accès au rayonnement lumineux de la même façon. Les résultats ont permis d'identifier que le ratio quantité d'azote aérien / biomasse des feuilles (QNaer/MSF) est un bon indicateur du niveau de nutrition azotée de la plante. De plus, ce ratio est relativement indépendant du rayonnement. Ce nouvel indicateur permet de quantifier le statut azoté d'une plante en comparant la valeur observée QNaer/MSF à la valeur attendue en situation de nutrition azotée optimale.

Mots-clés : courbe critique, indice de nutrition azotée, surface foliaire, biomasse des feuilles, échelle plante

1. Introduction

Les associations d'espèces/variétés sont préconisées aujourd'hui afin de réduire les impacts environnementaux de l'agriculture. Parallèlement, une flore adventice résiduelle pourrait se développer avec la réduction de l'utilisation d'herbicides. Ainsi, les couverts hétérogènes sont amenés à remplacer les couverts monospécifiques homogènes aujourd'hui majoritaires. De ce fait, il est nécessaire de repenser certains outils de pilotage des couverts, tel que l'indice de nutrition azotée (INN) qui est utilisé pour diagnostiquer le statut azoté (carence en azote, nutrition azotée optimale ou surconsommation d'azote) d'un couvert homogène afin d'en piloter la fertilisation azotée. Le calcul de l'INN s'appuie sur la courbe critique de dilution de l'azote qui indique, à une biomasse donnée, la teneur en azote aérienne critique (i.e. la teneur en azote minimale pour maximiser la production de biomasse). A l'échelle de la plante, la courbe critique varie en fonction de l'environnement lumineux dans lequel la plante se trouve. Or, toutes les plantes d'un couvert hétérogène n'ont pas accès au rayonnement lumineux de la même façon, selon leur position dominante ou dominée. L'INN basé sur la courbe critique n'est donc pas adapté pour les plantes de couverts hétérogènes. Lemaire *et al.* (2005)¹⁴ ont montré une relation linéaire, à l'échelle de la plante de luzerne en situation de nutrition azotée optimale, entre la quantité d'azote dans les parties aériennes (QNaer) et la surface foliaire (SF). La relation obtenue était stable pour 2 niveaux contrastés de rayonnements. A l'échelle de la plante, le ratio QNaer/SF pourrait donc être indépendant de l'environnement lumineux et dépendre uniquement du statut azoté. Cette étude a pour but de vérifier, pour une gamme d'espèces, que ce ratio est un bon indicateur du statut azoté de la plante quel que soit son environnement lumineux.

2. Matériel et méthodes

Des expérimentations en serre ont permis de tester 6 espèces cultivées et adventices annuelles. Afin de reproduire les situations de plantes dominantes et dominées, et de plantes ayant différents accès à l'azote, deux niveaux contrastés de rayonnement (lumière naturelle ou filet d'ombrage) ont été combinés à 4 ou

¹⁴ Lemaire G., Avise J.C., Kim T.H., Ourry A. (2005). *Journal of Experimental Botany*, 56 (413), 935-943

5 niveaux de disponibilité en azote de la solution, allant de 0.4 à 14mM de nitrates. L'expérimentation a eu lieu sur 3 ans, en pots et en situation de plante isolée afin de mieux contrôler l'environnement de croissance. Quatre prélèvements ont été réalisés durant la période végétative. La surface foliaire, la biomasse des feuilles, des tiges et des racines ainsi que la teneur en azote des feuilles, des tiges et des racines ont été mesurées.

3. Résultats

Nous avons obtenu une relation linéaire entre la quantité d'azote dans les parties aériennes (QNaer) et la surface foliaire (SF), comme Lemaire *et al.* (2005), pour chaque traitement (1 espèce x 1 rayonnement x 1 solution azotée x 1 prélèvement). Par ailleurs, l'INN a été calculé en retraçant la courbe critique de dilution de l'azote pour chaque espèce x rayonnement. Le ratio QNaer/SF est un bon indicateur du niveau de nutrition azotée de la plante car il est bien corrélé à l'INN. Cependant, ce ratio diminue en passant de la lumière à l'ombre contrairement à Lemaire *et al.* (2005). De la même façon que pour QNaer et SF, nous avons obtenu une relation linéaire entre QNaer et la biomasse des feuilles (MSF). Le ratio QNaer/MSF est bien corrélé à l'INN (Figure 1). De plus, ce ratio est relativement indépendant du rayonnement. Les relations linéaires entre le ratio QNaer/MSF et l'INN sont les mêmes pour le vulpin et le blé d'une part (Figure 1 A) et le colza et la fétuque d'autre part (Figure 1 B). La luzerne se distingue nettement des autres espèces (Figure 1 A), il s'agit de la seule espèce légumineuse et pérenne des expérimentations. Pour une plante donnée, il est donc possible de comparer le ratio QNaer/MSF observé à la valeur attendue du ratio en situation de nutrition azotée optimale (INN=1). Cela permet de quantifier le statut azoté de la plante en couvert hétérogène.

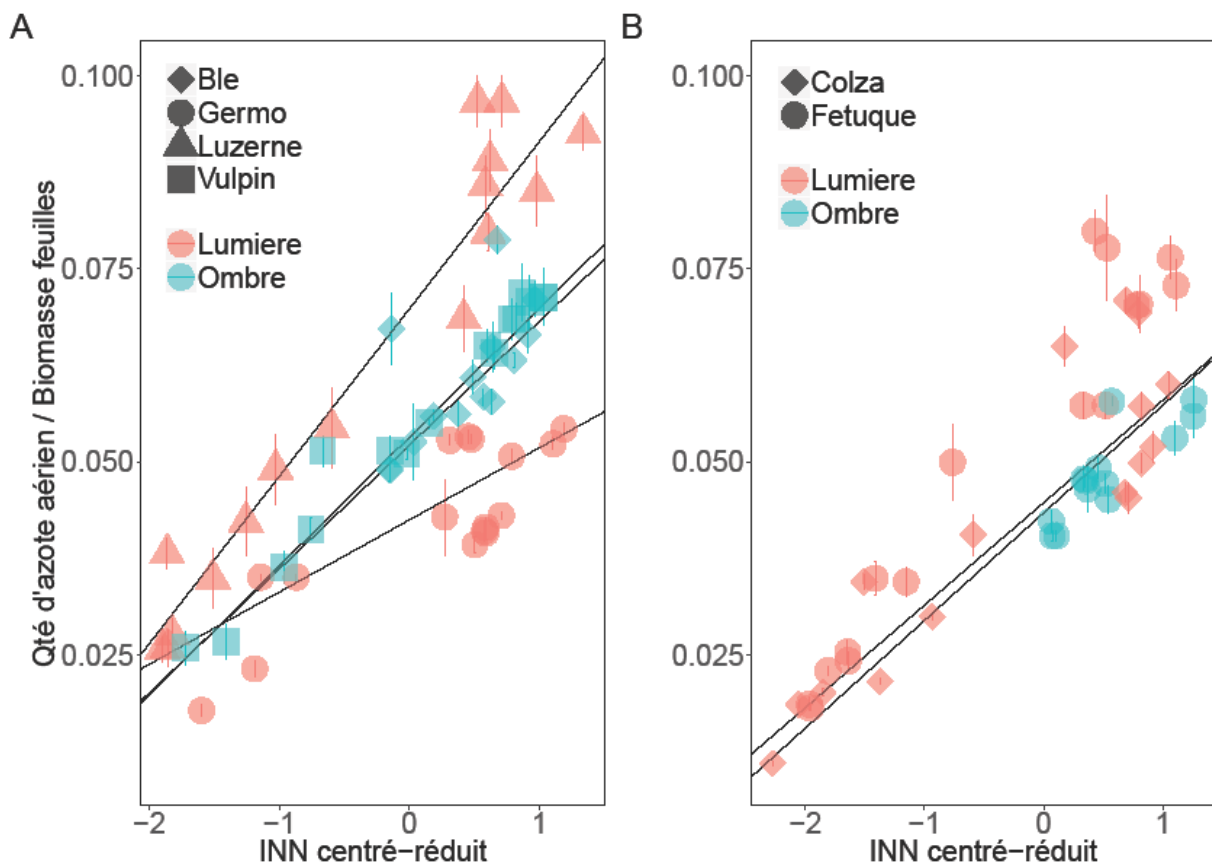


Figure 1. Régression linéaire par espèce entre le ratio quantité d'azote aérien / biomasse des feuilles (QNaer/MSF en g/g) et l'INN centré-réduit ($R^2 = 0.92$; $P < 0.001$). Pour faciliter la lecture, les régressions par espèce sont représentées sur deux graphiques (A : blé, géranium mou, luzerne, vulpin et B : colza, fétuque). Chaque symbole représente la moyenne pour un traitement (1 espèce x 1 rayonnement x 1 solution azotée x 1 prélèvement), les barres d'erreur sont les écart-types.

7. Conclusion

Cette étude est la première à proposer une méthode pour déterminer le niveau de nutrition azotée à l'échelle de la plante, indépendamment de l'environnement lumineux. Cette méthode est donc adaptée pour les couverts hétérogènes. Par la suite, l'indicateur de nutrition azotée basé sur le ratio QNaer/MSF pourra être utilisé dans des modèles mécanistes individus-centrés comme FLORSYS (cf. annexe, p. 98), qui simule les effets des systèmes de culture en interaction avec le pédoclimat sur la dynamique des adventices. En revanche, cet indicateur n'est pas adapté pour les modèles de type structure-fonction, qui requièrent un niveau de précision supérieur. En mettant en place de nouvelles expérimentations pour estimer de façon plus précise le ratio QNaer/MSF pour des espèces de couverts, cet indicateur pourra servir à suivre l'état de nutrition azotée dans des couverts complexes afin de mieux les comprendre et mieux les piloter.

Coupler l'utilisation d'un modèle de simulation et d'une plateforme de phénotypage à haut débit pour caractériser la réponse des adventices à une limitation en eau

Delphine Moreau, Hugues Busset, Annick Matejcek, Nathalie Colbach

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

Correspondance : delphine.moreau@inra.fr

Résumé

Mieux comprendre les interactions entre compétition pour la lumière et pour l'eau est nécessaire pour concevoir des stratégies durables de gestion des adventices, dans un contexte de changement global. L'objectif de cette étude était de quantifier la réponse de trois espèces adventices à une limitation en eau et, pour cela, de tester une approche méthodologique innovante couplant l'utilisation d'une plateforme de phénotypage à haut débit et d'un modèle de simulation (FLORSYS). Cette étude a permis d'analyser la diversité des réponses des espèces adventices au stress hydrique et de hiérarchiser les processus en fonction de l'intensité de leur réponse à une limitation en eau. Elle a également montré l'intérêt de l'approche développée. Par la suite, celle-ci sera appliquée à l'analyse de la réponse en eau d'une large gamme d'espèces adventices. Les résultats obtenus permettront d'intégrer la compétition pour l'eau dans FLORSYS afin de pouvoir l'utiliser pour concevoir des stratégies de gestion robustes face à la contrainte hydrique.

Mots-clés : adventice, stress hydrique, compétition, morphologie aérienne

1. Introduction

Dans le contexte de réduction du recours aux herbicides, une alternative est l'utilisation de plantes cultivées compétitives, en particulier pour la lumière, qui est la principale ressource pour laquelle culture et adventices sont en compétition dans les systèmes de culture. Cependant, les épisodes de stress hydrique sont amenés à être de plus en plus fréquents dans le contexte de changement de climatique. Ainsi, un défi actuel est de mieux comprendre les interactions entre compétition pour la lumière et pour l'eau non seulement chez les cultures mais aussi chez les adventices. A ce jour, les études menées sont peu nombreuses et portent sur un petit nombre d'espèces adventices car il est difficile de mener des expérimentations avec un arrosage précis et individuel sur un grand nombre de plantes. En plus, ces études caractérisent le plus souvent les effets de limitations en eau sur la croissance globale des plantes, mais pas sur leur morphologie aérienne. Or, celle-ci joue un rôle déterminant dans la compétition pour la lumière. L'objectif de cette étude est double :

- Quantifier la réponse d'espèces adventices à une limitation en eau en analysant (1) quels traits de morphologie aérienne sont impactés et (2) si la réponse diffère entre espèces ;
- Tester une approche méthodologique innovante couplant l'utilisation (1) d'une plateforme de phénotypage à haut débit pour permettre un arrosage automatique et précis plante à plante, et (2) d'un modèle de simulation (FLORSYS) pour identifier les traits de morphologie aérienne à utiliser comme critères pour comparer les espèces sur leur réponse à une limitation en eau.

2. Matériel et méthodes

Dans une expérimentation en serre, trois espèces adventices - vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*), amarante hybride (*Amaranthus hybridus*) et abutilon de Théophraste (*Abutilon theophrasti*) - ont été cultivées en pots à 4-5 niveaux de disponibilités en eau, allant de 20 à 75% de la réserve utile. Trois fois par jour, les pots étaient automatiquement pesés et, selon les besoins, arrosés avec une solution nutritive complète (N-P-K) pour atteindre un poids cible fonction du traitement hydrique. Des prélèvements ont été effectués à deux dates : sept semaines après la germination (*A. myosuroides* et *A. theophrasti* au stade végétatif et *A. hybridus* à floraison) et neuf semaines après la

germination (uniquement *A. theophrasti* au stade floraison). A chaque date, des plantes ont été prélevées pour mesurer leur croissance globale, ainsi que quatre traits relatifs à la morphologie aérienne à l'échelle de la plante. Ces traits correspondent à des paramètres du modèle FLORSYS (cf. annexe, p. 98) qui jouent un rôle clef dans la compétition pour la lumière : (1) hauteur spécifique (hauteur/biomasse aérienne, cm/g), (2) surface foliaire spécifique (surface foliaire/biomasse foliaire, cm²/g), (3) ratio de biomasse racinaire dans la biomasse totale (biomasse racinaire/totale, g/g) et (4) ratio de biomasse foliaire dans la biomasse aérienne (biomasse foliaire/ aérienne, g/g).

3. Résultats

Les résultats montrent un effet fort de la disponibilité en eau du sol sur les variables de croissance globale (ex : biomasse aérienne, biomasse racinaire). Tous les traits de morphologie aérienne ont été affectés par la disponibilité en eau (Figure 1). Globalement, réduire la disponibilité en eau a conduit, par ordre d'importance, à : un étiolement des plantes (augmentation de la hauteur spécifique), un épaississement des feuilles ou des feuilles plus denses (diminution de la surface foliaire spécifique), une allocation privilégiée de la biomasse aux racines plutôt qu'à la partie aérienne (augmentation du ratio de biomasse racinaire) et aux feuilles plutôt qu'aux tiges et aux organes reproducteurs (augmentation du ratio de biomasse foliaire).

Au stade végétatif, la réponse à la disponibilité en eau de ces quatre traits n'était pas différente entre espèces. Au stade reproducteur, nous obtenons la même conclusion avec une exception pour la hauteur spécifique. En effet, l'étiolement était bien plus fort pour l'abutilon que pour l'amarante. A noter que nous n'avons pas observé d'effet de la disponibilité en eau sur la date de floraison.

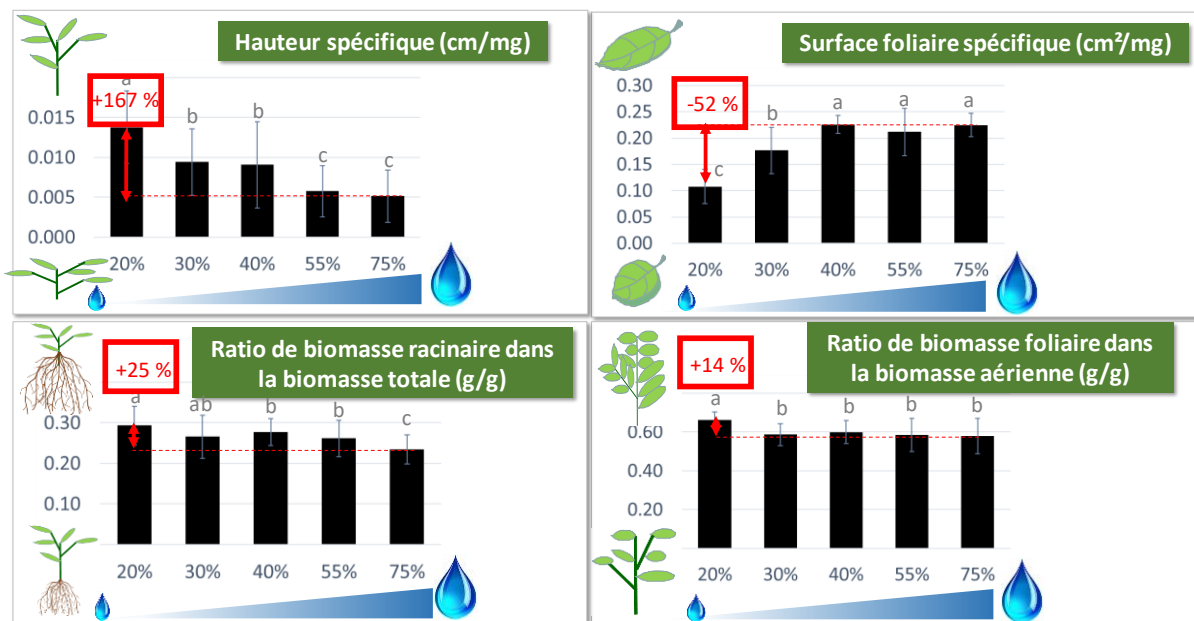


Figure 1. Effet de la disponibilité en eau du sol sur les variables de morphologie aérienne, toutes espèces et tous stades confondus. L'axe des abscisses correspond aux traitements hydriques exprimés en pourcentage de la réserve utile.

8. Conclusion

Cette étude a permis d'analyser la diversité des réponses des espèces adventices au stress hydrique et également de hiérarchiser les processus en fonction de l'intensité de leur réponse à une limitation en eau. Elle a mis en avant une méthodologie innovante couplant plateforme de phénotypage à haut débit et modèle de simulation. Il s'agira par la suite d'utiliser cette méthodologie pour examiner à plus grande échelle la diversité des espèces adventices annuelles dans leur réponse à une limitation en eau. Sur cette base, la compétition pour l'eau pourra être introduite dans le modèle FLORSYS afin de l'utiliser pour la conception de stratégies durables de gestion des adventices, notamment pour vérifier que les stratégies candidates sont robustes face au changement climatique.

Les semences de la plante parasite orobanche rameuse ont une dormance saisonnière qui varie au niveau intraspécifique et une faible mortalité au champ

Olivia Pointurier, Stéphanie Gibot-Leclerc, Valérie Le Corre, Carole Reibel,
Florence Strbik, Nathalie Colbach

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

Correspondance : olivia.pointurier@inra.fr

Résumé

L'orobanche rameuse (*Phelipanche ramosa*) est une plante parasite bioagresseur majeur du colza en France. Les connaissances sur la viabilité et la dormance de ses semences dans le sol sont cruciales pour contrôler l'orobanche mais restent à acquérir. La présente étude vise à quantifier ces processus grâce à une expérience d'enfouissement de semences au champ de deux ans. Deux populations génétiquement distinctes ont été étudiées, collectées sur colza d'hiver et chanvre respectivement. La mortalité des semences est très faible pour les deux populations (4-7% par an). Les semences montrent une dormance saisonnière dont le timing et l'amplitude varient en fonction de la population, avec une dormance faible au moment où leurs cultures hôtes favorites sont généralement semées. La signification biologique et les implications agronomiques des différences observées entre populations sont discutées.

Mots-clés : orobanche rameuse, plante parasite, dormance saisonnière, longévité des semences, germinations spontanées, *Phelipanche ramosa*

1. Introduction

Les orobanches sont des plantes parasites obligatoires, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent survivre sans plante hôte. Après avoir été stimulées par les exsudats racinaires d'un hôte potentiel, les semences d'orobanche germent et se fixent aux racines de cet hôte pour en détourner les ressources. L'orobanche rameuse (*Phelipanche ramosa* L.) est un bioagresseur de nombreuses cultures dans le monde, dont le colza en France.

Les connaissances sur la mortalité et la dormance des semences dans le sol sont fondamentales pour optimiser les méthodes de lutte contre l'orobanche (ex : réduire la fréquence des cultures hôtes en rotation pour contrecarrer la persistance des semences dans le sol). Les semences des espèces d'orobanche peuvent survivre 14 à 20 ans dans le sol et ont une dormance saisonnière, mais cela n'a jamais été quantifié précisément pour l'orobanche rameuse. L'existence de pathovars (populations génétiquement distinctes associées à des hôtes préférentiels) suggère que des variations intraspécifiques pourraient être observées. L'objectif de cette étude est donc de quantifier la mortalité et la dormance des semences de deux populations d'orobanche rameuse dans le sol.

2. Matériel et méthodes

Les semences d'orobanche ont été prélevées sur colza en Vendée (population O) et sur chanvre dans l'Aube (population H) en 2014. Des analyses génétiques ont été réalisées d'après Le Corre *et al.*¹⁵ pour vérifier que ces populations étaient génétiquement différentes. Les semences ont été placées dans des sachets de sable pour être enfouies au champ d'après un protocole adapté de Gardarin *et al.*¹⁶ Des sachets ont été excavés toutes les 6 semaines pendant 2 ans, puis ramenés au laboratoire pour extraire les

¹⁵ Le Corre V., Reibel C. & Gibot-Leclerc S. (2014). *International Journal of Molecular Sciences* 15: 994-1002.

¹⁶ Gardarin A., Dürr C., Mannino M. R., Busset H. & Colbach N. (2010). *Seed Science Research* 20: 243-256.

semences. Des tests de viabilité et de germination après addition d'un stimulant de germination synthétique ont alors été effectués selon un protocole adapté de Gibot-Leclerc *et al.*¹⁷ pour quantifier le nombre de semences viables et germées et la dynamique de germination à chaque excavation.

3. Résultats

Les analyses génétiques ont confirmé que les deux populations sont distinctes. La mortalité des semences dans le sol est de 4 et 7% par an pour les populations O et H respectivement. Les deux populations suivent une dynamique de germination similaire, commençant à germer quelques jours après addition du stimulant pour atteindre rapidement la proportion de germination maximale. Les semences de la population H germent plus tôt et plus vite que celles de la population O. Les semences de la population O entrent en dormance en automne-début hiver (peu après le semis du colza) et sortent de dormance au printemps-début été (Figure 1.A). Un tel cycle de dormance n'a pu être mis en évidence pour la population H. En effet, des germinations spontanées (avant ajout de stimulant de germination) de plus en plus nombreuses au cours du temps (jusqu'à 90%) ont été observées dans cette population, laissant peu de semences non germées à tester pour caractériser la dormance saisonnière (Figure 1.B, plus le nombre de germinations spontanées observé est important, plus le nombre de semences testées est faible, plus les intervalles de confiance augmentent). Deux pics de dormance semblent cependant être visibles chaque année, en hiver et en été.

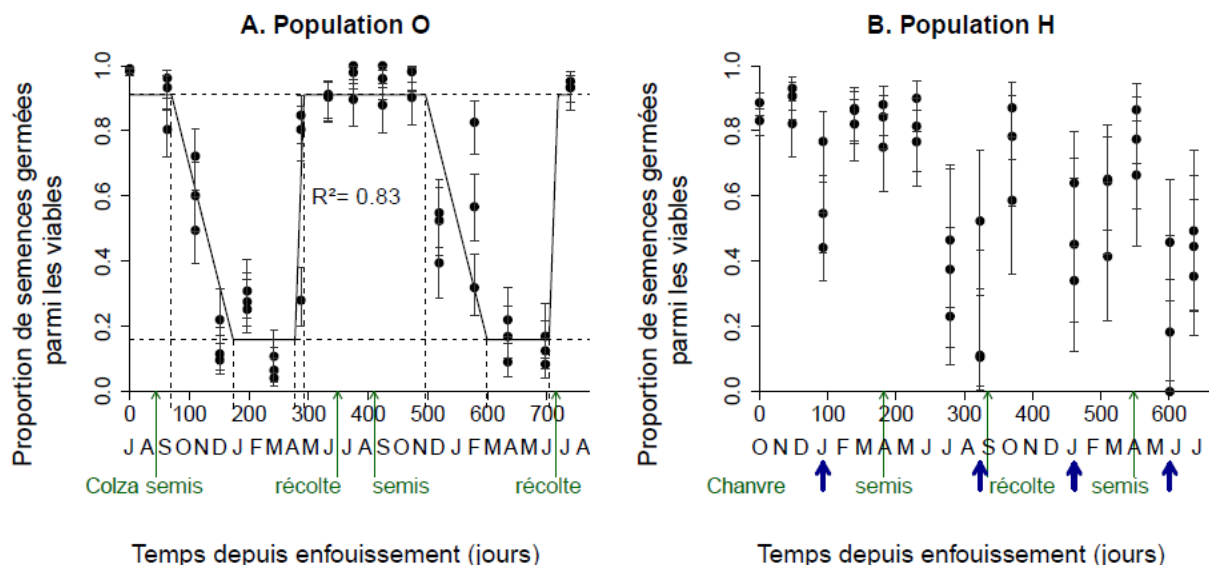


Figure 1. Proportion de semences viables germées des populations O et H de *P. ramosa* après enfouissement au champ pendant 2 ans. La droite brisée (A) représente le modèle ajusté aux données, les flèches bleues (B) les pics de dormance et les barres verticales les intervalles de confiance à 95%. Les dates de semis et de récolte usuelles du colza (A) et du chanvre (B), hôtes préférentiels des populations O et H respectivement, sont indiquées en abscisses.

4. Discussion

Les résultats suggèrent des adaptations particulières des populations à leurs hôtes favoris. La population O germe lorsque les cultures d'hiver sont semées. La population H semble plus opportuniste, capable théoriquement de parasiter des cultures d'hiver et d'été, et de se fixer dès qu'une plante hôte est disponible en germant spontanément et plus rapidement que la population O. L'intérêt des germinations spontanées est cependant discutable, puisqu'elles peuvent conduire à des germinations suicides (en

¹⁷ Gibot-Leclerc S., Corbineau F., Sallé G. & Côme D. (2004). *Plant Growth Regulation* 43: 63-71.

⁴ Molenat D., Boulet C. & Leflon M. (2013). Colloque : l'orobanche rameuse en France, Poitiers, France.

absence d'hôte). Des tests supplémentaires doivent être conduits pour confirmer que ces observations ne sont pas dues à un artefact (stimulation au champ, contamination au laboratoire).

La faible mortalité des semences impose de limiter la fréquence des cultures hôtes en rotation et rend inefficace le labour. En effet, les semences enfouies seront toujours viables, même plusieurs années plus tard, lorsque le labour suivant les remettra en surface proche des racines hôtes. Une stratégie sans travail du sol éviterait d'incorporer les nouvelles semences près des racines hôtes. Pour accélérer la décroissance du stock semencier, des plantes de couverture pièges (hôtes détruits avant la reproduction de l'orobanche, comme par exemple la moutarde blanche *Sinapis alba* L.⁴) ou faux-hôtes (stimulant la germination du parasite sans permettre de fixation viable, comme par exemple le lin *Linum usitatissimum* L.⁴) pourraient être implantées en interculture. Enfin, retarder la date de semis du colza limiterait les germinations d'orobanche en décalant la levée de la culture pendant la phase d'entrée en dormance des semences.

5. Remerciements

Ce travail a été financé par l'INRA, le programme de recherche Pesticides par l'intermédiaire de l'APR « Évaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des Pesticides » piloté par le ministère chargé du développement durable, avec l'appui financier de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), et AgroSup Dijon (ARS O129)

Évaluation de performance au champ

Effet de la stratégie de gestion de l'interculture sur la régulation des adventices

Pascale Métais ¹, Fanny Vuillemin ²

⁽¹⁾ Arvalis Institut du végétal, 63360 Saint Beauzire, France

⁽²⁾ Terres Inovia, 6 chemin de la côte vieille, 31 450 Baziège, France

Correspondance : p.metais@arvalis.fr ; f.vuillemin@terresinovia.fr

Résumé

L'interculture est une période stratégique pour la gestion des adventices, pendant laquelle divers leviers peuvent être mobilisés. Les résultats de 9 essais ont été compilés pour essayer d'identifier les leviers et stratégies les plus efficaces pour maîtriser les adventices. A l'interculture, le travail du sol superficiel en fin d'été sur sol humide ou juste avant une pluie permet de faire lever un maximum de vulpins et de ray-grass pendant l'interculture. A l'inverse, le géranium et les repousses de colza lèvent mieux en l'absence de faux-semis (même si un faux-semis fait tout de même lever beaucoup de géraniums alors qu'il empêche les repousses de colza de lever). Par contre, le déstockage d'adventices à l'interculture ne permet pas de limiter la densité d'adventices en culture.

Mots-clés : Interculture, faux-semis, couvert, repousses, graminées, géranium

1. Introduction

L'interculture est une période propice à la mise en œuvre de leviers de gestion du stock semencier, tels que le labour ou la réalisation de faux-semis. Cependant, le développement des couverts d'interculture, que ce soit pour des raisons agronomiques ou réglementaires, peut venir complexifier la mise en œuvre de ces leviers, et tout particulièrement du faux-semis. La présence du couvert peut aussi avoir un impact direct sur la flore adventice. Des références sont nécessaires pour mieux identifier quelle stratégie adopter à l'interculture pour une bonne gestion des adventices : faut-il privilégier le travail mécanique ou la couverture des sols ? Est-il possible de concilier les deux ?

Dans ce contexte, plusieurs essais ont été mis en place par Arvalis et Terres Inovia en 2015 et 2016 pour évaluer plusieurs stratégies et leviers de gestion des adventices durant l'interculture et leurs conséquences en culture

2. Matériel et méthode

Les essais ont concerné plusieurs intercultures différentes (tableau 1) : blé – blé (3 essais), colza – blé (4 essais), féverole - blé (1essai) et blé – tournesol (1 essai). La flore présente est principalement constituée de graminées (ray-grass ou vulpin) dans 7 essais sur 9 et de géranium dans un essai. Ces essais comparent plusieurs stratégies de gestion de l'interculture qui se distinguent par l'introduction ou non d'un couvert et le recours ou non aux déchaumages et faux-semis. La densité d'adventices par espèce a été observée à l'interculture à plusieurs reprises, puis dans la culture suivante (avant désherbage de post-levée), grâce à des comptages au cadre.

3. Résultats et discussion

3.1 Pendant l'interculture

A l'interculture, les résultats sont variables selon les essais, les espèces adventices présentes et les conditions météo. De façon générale, les opérations de déchaumage ou de pseudo labour n'ont pas beaucoup d'impact sur les levées d'adventices (pas de différences significatives entre les modalités avec ou sans déchaumage post-récolte).

Concernant les faux-semis, les résultats sont directement liés à la flore présente :

- En présence de colza et géranium, l'absence de tout travail du sol à cette période permet de maximiser les levées. Notons toutefois qu'un faux-semis fait tout de même lever beaucoup de géraniums alors qu'il réduit fortement les levées de repousses de colza (Figure 1).
- A l'inverse, les levées de vulpin et ray-grass sont plus nombreuses suite à la réalisation d'un travail du sol très superficiel positionné peu de temps avant les pluies et après la mi-août (Figure 2). On observe des résultats significatifs dans ce sens dans 4 essais, et 3 autres n'ont pas permis de mettre en évidence d'effet significatif faute d'infestation suffisante, de conditions météorologiques favorables aux levées ou de méthodologie adaptée.

Tableau 1. Date de travail du sol, outil utilisé et profondeur de travail dans les différents essais étudiés.

Code Essai	Flore dominante	Nature de l'interculture	Dates travaux du sol	Outils et profondeurs des travaux du sol
Arv 17 2015	Diversifiée, faible infestation	Colza – blé dur	Travail superficiel 23/08 et 24/10 travail profond: 20/08	Travail superficiel : déchaumeur à dent ou herse rotative 10cm Travail profond au DDI (20 cm)
Arv 17 2016	Vulpin	Colza – BTH	05/08/2015 09/09/2015 13/10/2015 09/09/2015	Travail superficiel: HR, 5cm Travail profond: DDI, 20 cm
Arv 27 2015	Vulpin	BTH – BTH	23/08/2014 05/10/2014 18/10/2014	Faux semis et destruction de couvert au DDI, 2 cm
Arv 27 2016	Ray-grass	BTH – BTH	12/08/2015 01/10/2015	DDI
TI 36 2015	Géranium	Colza – BTH	post-récolte : 11/07 fin août : 3/09 mi-sept : 23/09 fin sept : 5/10 semis du blé : 15/10	cover-crop à 4-5 cm cover-crop entre 5 et 10 cm SD
TI 82 2015	Ray-grass	Colza – BTH	Post-récolte : 22/07 fin août : 26/08 mi-sept : 21/09 fin sept : 1/10 préparation semis du blé : 14/10	broyeur puis DDI DDI, entre 3 et 6 cm cultivateur
TI 11 2015	Ray-grass	BTH - Tournesol	Fin août et début octobre	Vibroculteur à 3-5 cm de profondeur puis rouleau Cambridge.
Arv Cr14	Ray-grass	BTH -BTH	11/09/2014 (puis semis le 23/10)	Comparaison DDI seul (10cm) ou DDI (10cm) + HR (5cm)
Arv Cr15	Ray-grass	Féverole -BTH	15/09/2015 (puis semis le 15/10)	Comparaison cultivateur à dent seul (10cm) ou cultivateur à dent (10cm) + HR (5cm)

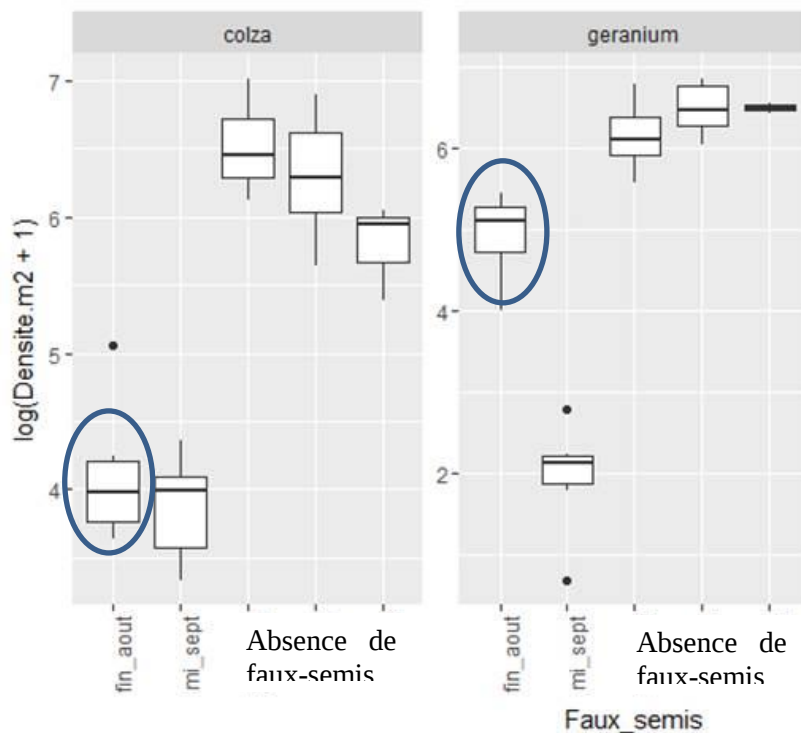


Figure 1. Levée de colza (à gauche) et géranium (à droite) à l'interculture en fonction de la date de réalisation du faux-semis durant cette même interculture (essai TI 36).

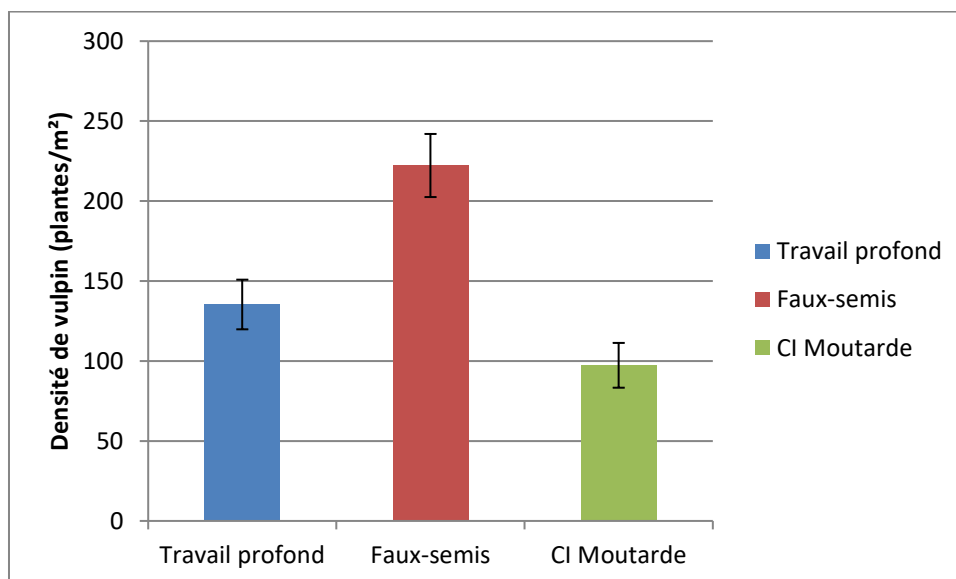


Figure 2. Densité de vulpin à l'interculture (comptage le 9 octobre) en fonction de la conduite de l'interculture. CI : culture intermédiaire (essai Arv 17 2016).

3.2 En culture

Les modalités de gestion de l'interculture n'ont pas d'effet significatif sur la densité d'adventices dans la culture suivante dans la grande majorité des essais. Un seul essai montre une densité d'adventices en culture significativement plus faible dans la modalité avec faux-semis efficace par rapport à l'absence de faux semis. On pourrait s'attendre à ce que plus il y a de levées en interculture, moins il y en a dans la culture suivante. Or ce n'est pas ce qu'on observe sur cet essai : la modalité sans faux semis avait destocké autant que la modalité avec faux-semis précoce. En effet, on ne voit pas dans cet essai (TI-82) de corrélation entre la densité d'adventices en culture et les quantités d'adventices levées à l'interculture, pas plus que dans les autres essais (Figure 3).

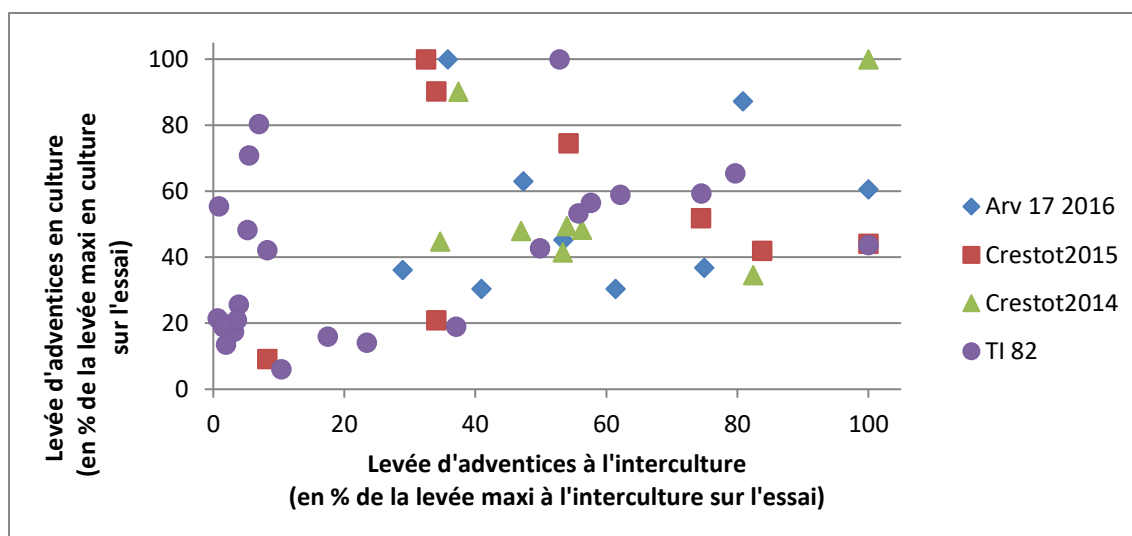


Figure 3. Relation entre la densité d'adventices levées à l'interculture et la densité d'adventices dans la culture suivante (avant désherbage de post-levée) dans différents essais

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'absence de relation entre levées en interculture puis dans la culture suivante :

- Le comptage des levées en interculture sous-estime considérablement l'efficacité du faux-semis puisqu'il manque les semences germées qui meurent avant de lever ou avant le comptage. En effet, les germinations non viables sont fréquentes en été où des périodes humides et sèches s'alternent.
- L'efficacité du faux-semis dépend énormément de l'état d'imbibition des semences, donc de l'humidité du sol.
- Le déstockage de semences réalisé pendant l'interculture (par mise en germination puis destruction) ne concerne qu'une toute petite proportion du stock semencier total. Les levées d'adventices lors du faux-semis sont de l'ordre de 24 à 1600 plantes/m², alors qu'à titre d'exemple, le nombre de graines tombées au sol le jour de la moisson a été estimé à 23 000 graines/m² dans un essai sur la récolte des menues pailles pour une infestation initiale de 26.6 plantes/m² (Métais *et al*, 2016).
- Le faux-semis permet de faire lever et détruire certaines graines, mais peut aussi interagir avec les phénomènes de dormance et avoir des conséquences difficilement prévisibles (levée dans la culture suivante ou augmentation de la persistance des semences, etc.)
- Enfin, les faux-semis et les observations n'ont pas été poursuivis les années suivantes, or des effets du faux-semis à plus long terme ont été observés dans d'autres études (Colbach et Vacher, 2014). De plus, les adventices qui lèvent en culture ne sont pas forcément les mêmes espèces que celles gérées à l'interculture précédente car elles n'ont pas les mêmes périodes préférentielles de levée.

D'autre part, la présence de couvert (culture intermédiaire semée ou repousses de colza) à l'interculture n'a pas eu de conséquences sur l'enherbement dans la culture suivante. Il faut toutefois noter que la levée du couvert est très dépendante des pluies d'étés en interculture courte. Dans ces essais, la levée et le développement des couverts ont généralement été décevants.

4. Conclusion

En conclusion, ces essais n'ont pas permis de mettre en évidence une stratégie unique à adopter à l'interculture, du fait de la diversité des contextes pédo-climatiques et floristiques, et de la variété de combinaisons possibles entre travail du sol et couvert à l'interculture. La principale tendance qui se dégage est que l'arrivée d'une pluie après un travail superficiel favorise grandement les levées

d'adventices à l'interculture. Des analyses complémentaires sont nécessaires pour tenter d'identifier les facteurs (pluviométrie, nombre de passage, délai entre la récolte et le premier travail du sol, délai entre le dernier travail du sol et l'implantation de la culture...) qui conditionnent le niveau de réussite de chaque technique. Afin d'aller plus loin, l'idéal serait d'avoir plusieurs essais longue durée par situation pédoclimatique et floristique, afin de caractériser les pratiques les plus intéressantes vis-à-vis de la gestion des adventices par situation.

5. Références

- Colbach, N., Vacher, C., 2014. Travail du sol et gestion de la flore adventice. In: Labreuche, J., Laurent, F., Roger-estrad, J. (Eds.), Faut-il travailler le sol? Acquis et innovations pour une agriculture durable. éditions Quae, Arvalis – Institut du végétal, pp. 113-125.
- Métais P., Bureau S., Gaudillat D., Geille A., 2016. Impact de la récupération des menues pailles sur le ray-grass (*lolium* sp) dans les céréales. In : AFPP (Eds), 23ème conférence du COLUMA, Dijon.

Gestion des adventices en semis-direct : l'effet du couvert varie selon les ressources du sol et le mode de destruction du couvert

Stéphane Cordeau ⁽¹⁾, Léa Grall ⁽¹⁾, Alexandre Lachmann ⁽¹⁾, Juliette Martin ⁽²⁾,
Annick Matejcek ⁽¹⁾, Hugues Busset ⁽¹⁾

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

⁽²⁾ INRA, UE115 Domaine Expérimental d'Epoisses, F-21000 Dijon, France

Correspondance : stephane.cordeau@inra.fr

Résumé

Un essai pluriannuel en semi-direct a testé l'effet des couverts sur la flore adventice et sur les cultures suivantes conduites sans fertilisation et sans désherbage. Une augmentation du nombre d'espèces cultivées dans un mélange ne permet pas de mieux concurrencer les adventices. Un apport d'azote au semis permet au couvert de produire plus de biomasse de couvert mais ne réduit pas le salissement dans le couvert. Comparé à l'action du gel ou au roulage des couverts sur le gel, la destruction chimique du couvert (glyphosate) a réduit l'infestation des adventices dans la culture suivante. Les couverts ne peuvent pas à eux seul assurer une régulation complète des adventices et cela s'observe sur la culture suivante. Ils doivent donc être épaulés par d'autres pratiques à l'échelle de la rotation permettant de limiter l'utilisation d'intrants.

Mots-clés : régulation biologique, compétition, interculture, glyphosate, diversité

1. Introduction

La régulation des adventices par les couverts repose principalement sur la compétition pour les ressources. On attend donc des couverts une forte capacité à préempter les ressources du milieu, d'où l'utilisation de *Brassicaceae* nitrophiles comme piège à nitrates ou de graminées à forte production de biomasse pour créer de l'ombrage. En revanche, la réduction de la biomasse adventice dans les couverts varie beaucoup selon les espèces adventices et de couvert, ainsi que du niveau de ressources.

En effet, dans la majorité des situations, le couvert est implanté en interculture d'été, donc en saison sèche, et sur un reliquat azoté post-récolte faible (si la fertilisation du précédent a été bien pilotée). Or, la majorité des adventices sont plus efficaces que les cultures ou les couverts dans des niveaux de ressources en eau et en nutriments faibles. Il est donc nécessaire d'étudier les capacités de compétition des espèces de couverts dans des niveaux de ressources réduits.

Enfin, les couverts sont très fréquemment composés de plusieurs espèces semées, car les agriculteurs sont à la recherche de couverts multiservices (d'où l'appellation CIMS : cultures intermédiaires multi-services). Ce n'est pas l'espèce mais le mélange d'espèce qui permet d'atteindre le multi-service. Et bien c'est souvent là que le bât blesse quand il s'agit de gestion des adventices. Certaines études montrent que le fait d'augmenter le nombre d'espèces du couvert n'est pas toujours un atout pour maximiser la biomasse du couvert et donc la concurrence (Bybee-Finley et al., 2017).

Il faut donc optimiser le pilotage des couverts (choix espèces, densité de semis, répartition de semis, irrigation potentielle, date de destruction, mode de destruction, etc...) pour maximiser leur installation et concurrencer les adventices, cette concurrence étant largement influencée par le niveau de ressources. L'objectif de cette étude était de quantifier l'effet de différents types de couverts sur les adventices sous différents niveaux de ressources en eau et en azote, en interculture durant la croissance du couvert puis dans les cultures de printemps et d'hiver suivante.

2. Matériels et méthodes

Sur la période 2016-2019, quatre modalités de couvert d'interculture (2 espèces dont une légumineuse, 2 espèces sans légumineuse, 8 espèces dont des légumineuses, 8 espèces sans légumineuse) mobilisant une grande diversité d'espèces (moutarde brune, avoine rude, phacélie, nyger, seigle forestier, millet des oiseaux, sorgho fourrager, navette, sarrasin, lin, vesce commune, crotalaire, trèfle d'Alexandrie, féverole de printemps) sont comparées à un témoin sol nu. Les couverts sont implantés sous 2 niveaux de ressources en eau et en azote, détruits selon 3 modalités (gel, roulage, glyphosate), l'ensemble des facteurs étant croisé et répétés 3 fois. L'essai comprend donc 180 micro-parcelles. L'orge de printemps (OP) puis le lin d'hiver (LH) semés dans la continuité des couverts (CC) sont conduits en semis-direct, sans fertilisation azotée et sans désherbage. Cette séquence CC/OP/LH est répliqué sur deux années successivement dans deux parcelles de la plateforme CA-SYS (www.inra.fr/plateforme-casys) du domaine d'Epoisses (INRA Dijon).



Figure 1. A. Vue par drone de l'Essai CIMS 2017 (Guillaume Poussou et Rodolphe Hugard © 2017) ; B. Roulage des couverts sur le gel (Stéphane Cordeau © 2016).

3. Résultats et Discussion

Les couverts produisant le plus de biomasse (Figure 2.A) ne comprennent pas de légumineuses, mais sont composés principalement de poacées, de brassicacées ou d'autres plantes appartenant à d'autres familles. Le pourcentage de la biomasse totale produite allouée aux adventices est minimal dans les couverts 2Leg-, 8Leg- et 8Leg+ (données non montrées). Une augmentation du nombre d'espèces dans un mélange ne permet pas de démontrer que les adventices sont mieux concurrencées, car les espèces diffèrent entre les mélanges.

Un apport d'azote au semis permet au couvert de produire plus de biomasse (Figure 2A) mais permet pas d'obtenir un salissement plus faible dans le couvert qu'une année sur les deux. Même si l'irrigation peut s'avérer utile certaines années pour l'installation du couvert, lors des deux années d'essais elle s'est avérée sans effet sur la biomasse du couvert et sur les adventices.

Comparé à l'action du gel ou au roulage des couverts sur le gel, la destruction chimique du couvert (glyphosate) a réduit l'infestation des adventices dans la culture suivante (Figure 2B). Les couverts ne peuvent pas à eux seul assurer une régulation complète des adventices. Notre essai permet de le mettre en évidence car la culture suivante n'a pas été désherbée.

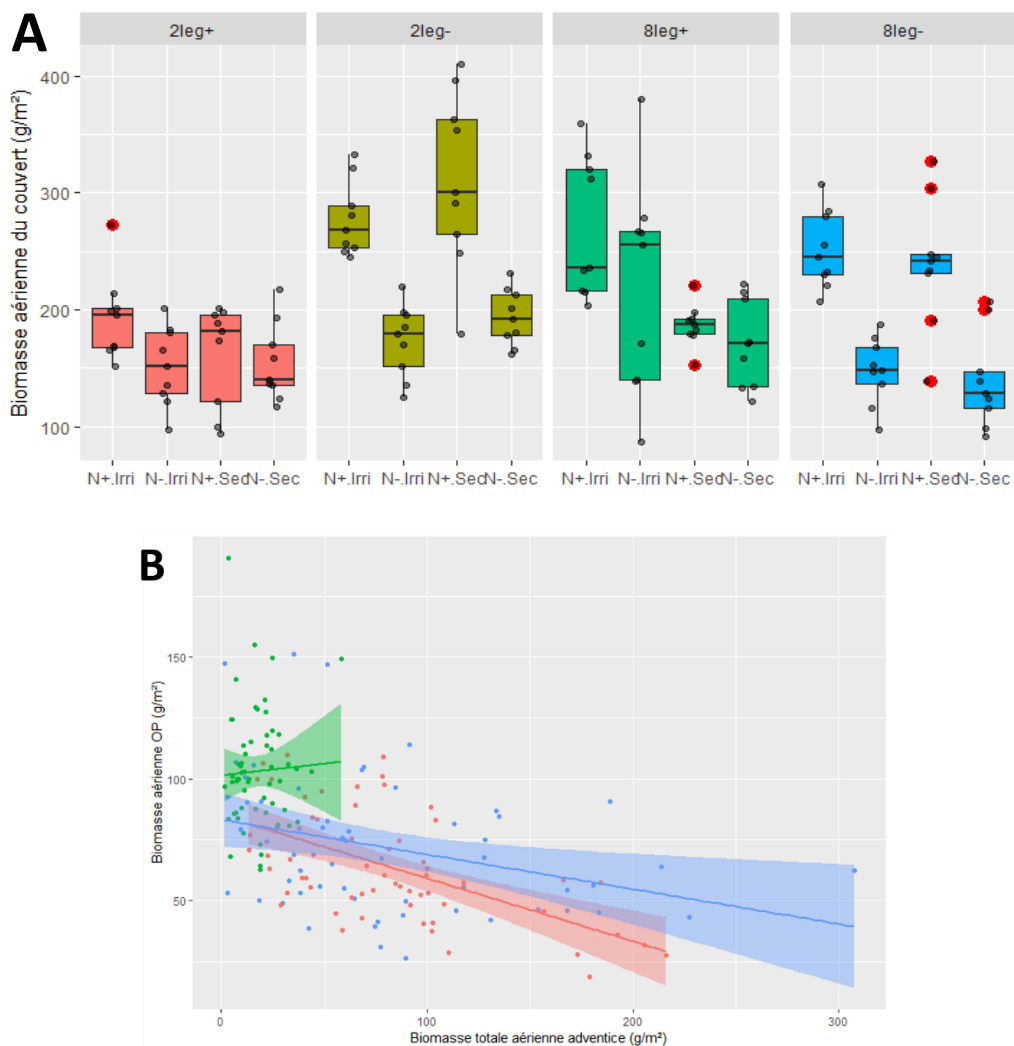


Figure 2. A. Biomasse aérienne du couvert (2Leg+ : 2 espèces dont une légumineuse, 2Leg- : 2 espèces sans légumineuse, 8Leg+ : 8 espèces dont des légumineuses, 8Leg- : 8 espèces sans légumineuse) en fonction des ressources du sol en eau (Irri : 40mm d'eau su semis des couverts, Sec : sans irrigation) et azote (N+ : 30 unités N au semis des couverts, N- : sans fertilisation des couverts). B. Relation entre la biomasse aérienne des adventices et de l'orge de printemps (OP) dans les trois modes de destructions de couverts (Stephane Cordeau © 2018)

4. Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble du personnel de l'Unité Expérimentale UE Domaine d'Epoisses pour la conduite de l'essai, dont Laurent Falchetto à l'origine des discussions. Ce travail est soutenu financièrement par la Région Bourgogne par le projet FABER Couv'Herbi, les projets Casdar VANCOUVER et RAID, et le projet ANR COSAC (ANR-14-CE18-0007).

5. Références

Bybee-Finley K.A., Mirsky S.B. and Ryan M.R. 2017. Crop Biomass Not Species Richness Drives Weed Suppression in Warm-Season Annual Grass–Legume Intercrops in the Northeast. *Weed Sci* 65, 669-680.

Estimation de la richesse des communautés adventices dans des parcelles conduites en semis direct sous couvert

Bruno Chauvel, Damien Derrouch, Emeline Felten, Eric Vieren & Fabrice Dessaint

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

Correspondance : bruno.chauvel@inra.fr

Résumé

L'estimation des changements de flore liés à la mise en place d'un nouveau type de système de culture pose des questions sur le type d'échantillonnage à réaliser. Si les relevés de type « parcours » sur une zone de la parcelle semblent les plus satisfaisants pour capter les changements de diversité spécifique, le choix du nombre et de la période de relevés pose encore question afin d'obtenir des jeux de données les plus satisfaisants possibles pour répondre aux objectifs fixés.

Mots-clés : Flore adventice, échantillonnage, semis direct sous couvert, estimation, comptage

1. Introduction

L'adoption par les agriculteurs de systèmes de culture innovants comme par exemple, le semis direct sous couvert, pose la question de l'estimation du risque malherbologique (Chauvel et al., 2018). En effet, dans ce système de culture, il est préconisé, parmi d'autres pratiques, une réduction maximale voir totale du travail du sol et une couverture du sol la plus complète possible avec des couverts végétaux morts (mulch) ou vivants. Or, l'abandon du travail du sol s'oppose aux préconisations classiques de gestion de la flore adventice comme le déchaumage, le faux semis et l'association de pratiques de gestion avec du désherbage mécanique.

L'évolution des communautés adventices apparaît alors comme un point-clé à étudier dans ces systèmes. Toutefois, ces pratiques étant nouvelles avec des états de milieu différenciés, l'échantillonnage de la communauté adventice (Dessaint, 2018) peut être à redéfinir. Le but de cette communication est de comparer sur une année culturale, différents protocoles de relevés et de déterminer celui qui permettrait une évaluation aussi précise que possible de la richesse de la flore présente sur la parcelle étudiée.

2. Matériel et méthodes

Trente-neuf parcelles conduites en céréales d'hiver situées dans le Nord de la Côte d'Or ont été suivies d'un point de vue malherbologique pendant l'année culturale 2017. Ces parcelles sont toutes gérées en semis direct sous couvert depuis au moins quatre années. Des relevés botaniques ont été réalisés sur une zone de 2000 m² selon deux protocoles et pour l'un d'eux sur deux périodes.

Au mois de mars, deux relevés de flores ont été réalisés au moment du désherbage de printemps. Deux protocoles ont été comparés : i) estimation de la flore par un échantillonnage de type « parcours » sur la zone (*Itinéraire 1* ; (Barralis, 1976) et ii) estimation par un comptage sur 10 quadrats de 0,25 m² sur la diagonale de la zone (*Quadrat 1*).

Au mois de juin, juste avant la récolte, seule l'estimation visuelle par le parcours a été réalisée (méthode 'Barralis ; *Itinéraire 2*) sur la même zone de 2000 m².

L'état 'malherbobogique' (densité de plantes et diversité spécifique) des parcelles est décrite à partir des estimations visuelles et de comptage sur quadrats. La richesse taxonomique est utilisée pour comparer les différentes méthodes. Tous les relevés ont été effectués par un même groupe d'observateurs.

3. Résultats

Suivant les protocoles utilisés et les parcelles échantillonnées, le nombre de taxons retrouvés varie de 1 à 35 (tableau 1) pour un total de 100 espèces.

Le taux observé de plantes annuelles est de 70 %, pour seulement 20% de géophytes et d'hémicryptophytes et une dizaine d'espèces appartenant à des familles d'arbres ou de buisson.

A la première date de relevé, le nombre moyen de taxons par parcelle trouvés lors du parcours (75) et du comptage par quadrat (60) est significativement différent (Test t apparié; $P < 0.001$; figure 1A). La richesse observée sur les parcelles est systématiquement supérieure avec *Itinéraire 1* (l'information n'est équivalente que sur quatre parcelles).

Pour ce qui est des densités observées (comptage réalisé avant le désherbage de printemps), les deux protocoles apportent une information similaire bien que des variations très fortes puissent aussi être observées entre les deux protocoles en particulier sur l'estimation des faibles densités (jusque la notation d'estimation visuelle '2' ; figure 1B).

Tableau 1. Richesse taxonomique estimée et densités observées sur les parcelles par les différents protocoles (protocole *Quadrat 1* réalisé avant effet du désherbage de printemps)

Nombre de parcelles	Protocole d'échantillonnage	Richesse totale	Richesse moyenne (écart type)	Densité moyenne - protocole <i>Quadrat 1</i> (écart type)
39	<i>Quadrat 1</i>	60	6,8 (4,06)	46,7 pl/m ² de 1 à 187 pl/m ² (34,5)
39	<i>Itinéraire 1</i>	75	10,8 (5,24)	-
39	<i>Itinéraire 2</i>	85	12,2 (6,26)	-

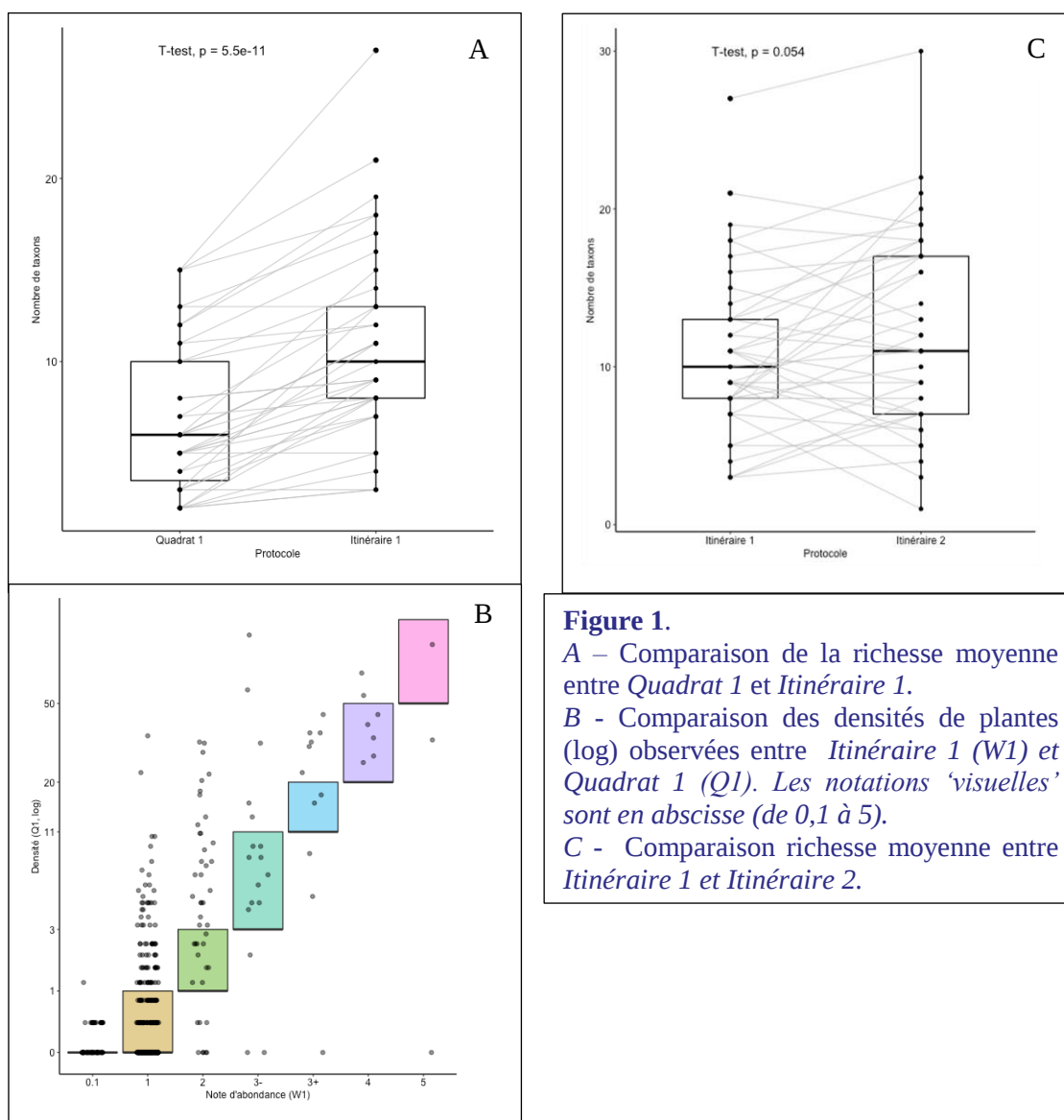


Figure 1.
A – Comparaison de la richesse moyenne entre *Quadrat 1* et *Itinéraire 1*.
B – Comparaison des densités de plantes (log) observées entre *Itinéraire 1* (W1) et *Quadrat 1* (Q1). Les notations 'visuelles' sont en abscisse (de 0,1 à 5).
C – Comparaison richesse moyenne entre *Itinéraire 1* et *Itinéraire 2*.

Pour les 2/3 des parcelles, le protocole *Itinéraire 2* permet d'observer au total et en moyenne un plus grand nombre d'espèces que pour le protocole *Itinéraire 1* (mais la différence n'est pas significative ; test t apparié ; $P=0,054$; figure 1C).

Les parcelles observées n'indiquent pas de situations d'infestation particulière : Sur les deux dates d'observation, (*Itinéraire 1* et *Itinéraire 2*) près de 70% des espèces sont observées à une densité inférieure à 1 plante / m². Les cas de fortes densités de plantes (> à 10 plantes/m²) pouvant indiquer une perte de contrôle infestations sont inférieurs à 10 % (les pourcentages ne sont pas différents entre les deux dates). Ce sont des espèces habituellement observées (10 au total) dans la zone d'étude quel que soit le type de travail du sol : vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds.), brome stérile (*Anisantha sterilis* (L.) Nevski), pensée des champs (*Viola arvensis* Murray) ou petite éthuse (*Aethusa cynapium* L.). Dans le cas des graminées, il s'agit de cas classiques dans la région de résistance aux herbicides de la famille des sulfonilurées et des aryloxyphénoxypropionates (fops)).

4. Discussion

Malgré des années de test, les méthodes autour de l'évaluation de la flore adventice dans les parcelles cultivées sont encore très discutées. L'adoption d'un protocole d'échantillonnage dépend essentiellement de la question posée mais il nécessite souvent la prise en compte de nombreuses contraintes techniques et/ou financières. Les nombreux compromis à réaliser (temps de travail, nombre de parcelles ; Chauvel et al., 1996)), les dispositifs étudiés (expérimentation long terme, réseaux d'agriculteurs) et variété des questions posées (diversité vs risque malherbologique) peuvent ainsi générer la mise en place de protocoles d'échantillonnage sous optimaux pour l'une ou l'autre des questions.

Dans le cas du semis direct sous couvert, l'objectif de caractériser les changements de flore (apparition ou disparition d'espèces) semble favoriser les protocoles de type « *itinéraire* » qui permettent de capter une plus grande diversité de taxons mais avec peut être des estimations biaisées pour les taxons à faible densité. L'utilisation de deux périodes de relevés pour le protocole de type « *itinéraire* » semble un bon compromis avec la possibilité lors du relevé du mois de juin d'obtenir une information supplémentaire sur les espèces en graines.

Une diversité « classique » d'espèces adventices a été observée par rapport à celle observée dans des parcelles travaillées et aucun changement notable dans la composition des espèces n'a été noté alors que sur les mêmes parcelles avaient été observés cinq années plus tôt des pourcentages plus importants d'espèces adventices vivaces (Trichard et al. 2013).

Dans l'étude réalisée en 2017, aucun suivi de la flore pendant la période d'interculture n'a été effectué. Néanmoins, pour répondre à la préoccupation des agriculteurs sur leurs problèmes de gestion, un relevé au cours cette période, semble néanmoins indispensable dans ces champs en non travail du sol où ne sont réalisées aucune des pratiques classiques de déchaumage.

5. Références

- Barralis, G. 1976. Méthode d'étude des groupements adventices des cultures annuelles ; application à la Côte d'Or. *Ve Colloque Int. Ecol. Biol. des mauvaises herbes*, Dijon, 59-68, 1976.
- Chauvel B., Colbach N., Munier Jolain N.M. 1998. How to estimate weed flora in a field? Comparison of sampling methods. *Z. Pflkrankh. PflSchutz. Sonderh.* XVI, 265-272.
- Chauvel B., Derrouch, D., Munier-Jolain N., Cordeau S. 2018. Gestion de la flore adventice en semis direct sous couvert, Chapitre 12, In : Gestion durable des communautés adventices. Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. (coord.), Ed. Quae, 92-94.
- Dessaint F. 2018. Comment compter, noter les adventices ? Encadré 4.4., Chapitre 4. In : Gestion durable des communautés adventices. Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N., Rodriguez A. (coord.), Ed. Quae, 207-220.
- Trichard A., Alignier A., Chauvel B., Petit S. 2013. Identification of weed community traits response to conservation agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 179, 179– 186.

Détection non supervisée des adventices : résultats et limites

G. Jones, M. Louargant, S. Villette, J.N. Paoli, T. Maillot & C. Gée

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

Correspondance : gawain.jones@agrosupdijon.fr

Résumé

Dans un cadre de diminution des produits phytosanitaires, l'agriculture de précision est une solution technique pour diminuer l'impact environnemental de l'agriculture sans transformer les systèmes de production actuels. La démocratisation des drones aériens pour l'agriculture permet leur utilisation afin de discriminer culture et adventices au sein de parcelles cultivées. Nous avons développé et testé des algorithmes non supervisés (ne nécessitant pas l'intervention d'un humain) combinant l'information spatiale et spectrale pour réaliser cette discrimination. Cette présentation sera l'occasion de revenir sur les résultats de ces algorithmes et de présenter également les limites rencontrées ainsi que des perspectives d'évolution.

Mots-clés : Discrimination culture/adventices, traitement d'images, information spatiale et spectrale, algorithme non supervisé.

1. Introduction

L'agriculture de précision repose sur la caractérisation et l'exploitation de l'hétérogénéité intra-parcellaire. Dans ce cadre, la gestion des adventices repose alors sur une détection de celles-ci, suivie d'une pulvérisation localisée. De nombreux travaux basés sur l'analyse d'image visent à offrir la meilleure détection possible. Ceux-ci sont bien souvent spécifiques à certaines cultures et adventices ou aux vecteur/capteur utilisés et ne sont pas transposables à d'autres systèmes. Nous avons initié des travaux visant à développer un algorithme générique, utilisable dans de multiples scénarios (différentes combinaisons culture/adventices et/ou vecteur/capteur), reposant sur une combinaison de l'information spatiale et spectrale pour discriminer culture et adventices.

Les algorithmes permettant de discriminer cultures et adventices se divisent en deux grandes familles, les algorithmes nécessitant une intervention humaine (dits supervisés) et ceux pouvant s'en passer (dits non-supervisés). Usuellement, les algorithmes basés sur l'information spectrale requièrent l'intervention d'un humain pour indiquer à quelle classe (culture/adventice) correspond chaque groupe de signatures spectrales. Cette supervision est rédhibitoire dès lors qu'un grand nombre d'images doivent être traitées. Nous présenterons ici l'algorithme non supervisé développé, ses résultats ainsi que ses limites.

2. Matériel et méthodes

Le capteur utilisé est le multiSPEC 4C (Airinov, Paris), un capteur développé pour une utilisation par drone qui permet l'acquisition d'images dans le visible et le proche infra-rouge : soit à 550 [40] nm, 660 [40] nm, 735 [10] nm et 790 [40] nm. Les besoins en résolution spatiale nous ont conduit à installer ce capteur sur une perche afin de se rapprocher de la culture ($h = 3$ m). Une vérité terrain manuelle distinguant culture et adventices a été réalisée sur 14 images (7 provenant d'une parcelle de betterave, 7 d'une parcelle de maïs).

L'algorithme développé réalise une première détection (non supervisée) des adventices à l'aide de l'information spatiale (les cultures sont en rangs) pour nourrir une base de données d'apprentissage constituée des caractéristiques multispectrales des plantes. C'est cette étape d'apprentissage normalement manuelle qui est ici automatisée et qui permet d'obtenir une méthode non-supervisée. Un algorithme utilisant cette base de données peut alors être mis en œuvre pour améliorer la discrimination culture/adventices. La Figure 1 présente de façon graphique le fonctionnement de cet algorithme.

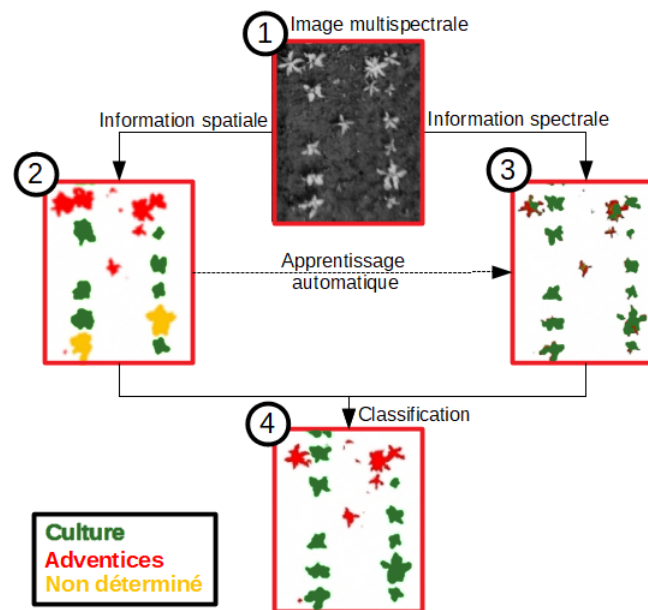


Figure 1. Démarche générale pour la détection non-supervisée des adventices à l'aide d'une combinaison de l'information spatiale et spectrale. L'image multispectrale (1) permet d'extraire les classes culture/adventices/non déterminées à l'aide d'une analyse spatiale (2). Les informations spectrales de ces classes permettent la création d'une base de données d'apprentissage (3). Les informations spatiales et spectrales sont ensuite combinées pour construire la classification culture/adventices définitive (4).

Tableau 1. Évaluation de l'algorithme non-supervisé combinant information spatiale et spectrale (à partir de la vérité terrain manuelle). Les taux de détections représentent un nombre de pixels de végétation correctement classés entre culture et adventices (le sol n'est pas considéré car très facile à soustraire des images). Les erreurs de classification concernent des pixels de la classe culture classifiés en adventices (et inversement).

Culture	Taux moyen de détection correcte des plantes (pixel/pixel)	
	Cultivées	Adventices
Betterave	0.92	0.81
Maïs	0.74	0.97
Moyenne	0.83	0.89

3. Résultats et limites

Les résultats de classification présentés dans le tableau 1 représentent une amélioration significative par rapport aux résultats obtenus sans la combinaison de l'information spatiale et spectrale. Cela représente en effet 10 à 14% d'adventices correctement détectées en plus (ces adventices étant détectées comme de la culture par l'algorithme utilisant uniquement l'information spatiale). Ils permettent surtout de montrer qu'il est possible d'automatiser des algorithmes supervisés en conservant des résultats probants.

Ce travail a également permis de pointer les limites des approches actuelles en termes de résolution spatiale, de stade de développement des plantes ainsi que du type d'algorithme utilisé. Les résolutions spatiales actuellement obtenues lors de survol par drone ne permettant pas d'acquérir une information spectrale d'une qualité suffisante. Il en est de même concernant le stade de développement des plantes qui est directement lié (de par la résolution spatiale) à la taille de la plante dans l'image.

4. Perspectives

Les méthodes développées dans la littérature sont toutes très sensibles à ces différents aspects et il n'y a pas d'approche visant à caractériser les algorithmes les plus performants en fonction d'une résolution spatiale et/ou d'un stade de développement. Nous comptons donc poursuivre ces travaux en explorant la relation entre qualité de classification/résolution spatiale/stade de développement et en appliquant les résultats obtenus à l'aide d'un robot de désherbage autonome. La poursuite de ces travaux est financée par le projet H2020 IWMPRaise (grant agreement no. 727321) et l'ANR Challenge ROSE (ANR-14-CE18-0007).

5. Références

- Louargant, M., G. Jones, R. Faroux, J.-N. Paoli, T. Maillot, C. Gée and S. Villette (2018). "Unsupervised Classification Algorithm for Early Weed Detection in Row-Crops by Combining Spatial and Spectral Information." *Remote Sensing* 10(5): 761.
- Louargant, M., S. Villette, G. Jones, N. Vigneau, J. N. Paoli and C. Gée (2017). "Weed detection by UAV: simulation of the impact of spectral mixing in multispectral images." *Precision Agriculture*: 1-20.
- Louargant, M. (2016). Proxidétection des adventices par imagerie aérienne : vers un service de gestion par drone, Université de Bourgogne.

Développement d'outils et de modèles

ECOHERBI : un outil numérique interactif pour réduire l'usage des herbicides

Alain Rodriguez ¹ & Fanny Vuillemin ²

(1) Acta, Station Inter-Instituts, 6 chemin côte vieille, F-31450 Baziège, France

(2) Terres Inovia, Station Inter-Instituts, 6 chemin côte vieille, F-31450 Baziège, France

Correspondance : alain.rodriguez@acta.asso.fr

Résumé

ECOHERBI est un guide interactif centré sur la gestion intégrée de la flore adventice en vue de réduire l'usage des herbicides en grandes cultures ; il est à ce jour au stade de prototype. Cette application web propose des successions culturales, des possibilités d'intégration des leviers alternatifs (couverts, faux-semis, labour, décalage de la date de semis...), et des itinéraires techniques de désherbage pour réduire graduellement voire supprimer les herbicides. Les informations et les conseils sont territorialisés ; 4 régions sont disponibles à ce jour : Midi-Pyrénées (Ouest Occitanie), Ile-de-France, Bourgogne et Aquitaine. Cet outil n'inclut pas les systèmes en non-travail du sol incluant les couverts d'interculture. Très simple d'accès, il a pour vocation d'être utilisé comme outil de formation ou d'animation à l'usage des techniciens, des agriculteurs, des enseignants et des étudiants de la formation agricole.

Mots-clés : herbicide, IFT, gestion intégrée, désherbage mécanique, outil numérique

1. Introduction

La réduction d'utilisation des herbicides est aujourd'hui un des objectifs prioritaires de la recherche et du développement agricole. Dès lors, deux voies majeures sont possibles pour atteindre ce but. La première, plutôt « High-Tech », s'appuie sur les innovations technologiques numériques et technologiques. Elle est parfaitement adaptée aux grands espaces de production agricole de masse où l'investissement financier sera amorti par d'importantes économies d'échelle ; le système de production devra s'ajuster aux nouvelles technologies pour les rendre plus efficaces. La deuxième voie, « Low-Tech », cherche à rendre le système plus autonome et plus résilient en valorisant au maximum les fonctions agroécologiques de l'agrosystème. Beaucoup plus adapté aux paysages morcelés multifonctionnels, ce chemin d'avenir est complémentaire du précédent et amène de la cohérence territoriale. Notre outil s'inscrit dans ce dernier schéma en tentant de concilier les contraintes territoriales, les enjeux économiques et humains aux objectifs de réduction des herbicides.

2. Un outil d'accompagnement collectif

Le guide ECOHERBI est un outil numérique qui a pour vocation de donner des informations et des voies d'innovation à ceux qui souhaitent faire évoluer leurs systèmes pour réduire les d'herbicides. Son but est d'aider les agriculteurs et les conseillers à élaborer une combinaison pluriannuelle de pratiques préventives de gestion intégrée et de définir des séquences de désherbage mécanique ou mixte (avec herbicides) si nécessaire.

L'utilisateur renseigne de façon rapide et sommaire (Figure 1) quelques informations concernant la région, le type de sol, la charge en cailloux, la rotation actuelle et les cultures possibles, les outils de désherbage mécanique disponibles ou en prévision d'achat, les leviers de réduction qu'il est prêt à mettre en œuvre (faux-semis, décalage de la date de semis, couvert d'interculture et labour). Le logiciel analyse deux à deux la pertinence, les difficultés ou les incompatibilités des séquences des cultures renseignées et fait des propositions de successions culturales de 3 à 6 ans. Les propositions de rotations (Figure 2) sont ordonnées selon une note moyenne calculée en fonction de 5 critères : faisabilité agronomique dans la région définie initialement, niveau d'intégration du désherbage mécanique dans les cultures choisies, facilité d'accès à une filière de commercialisation, alternance culture d'hiver/culture de printemps et diversité des cultures.

Le choix d'une rotation (figure 3) permet d'accéder à un nouvel écran indiquant les combinaisons de pratiques alternatives (couvert, faux-semis, labour, déstockage, décalage de la date de semis...) les plus pertinentes et les périodes les plus judicieuses ; des commentaires permettent d'alerter l'utilisateur sur les problèmes prévisibles pour chaque couple de culture. Enfin, pour chaque culture (figure 4), une série d'itinéraires de désherbage très précis sont présentés selon un gradient de réduction d'usage des herbicides : du désherbage mixte au tout mécanique. Pour chaque technique, l'utilisateur a accès à une fiche simplifiée d'informations basiques et une liste de liens internet plus complets. Cet outil propose toujours plusieurs stratégies pour satisfaire au mieux les contraintes de chacun ; le choix final revient toujours à l'utilisateur. Son but ultime est d'accompagner les agriculteurs en fournissant des informations pratiques (fiches techniques, bibliographie) et en orientant les choix de stratégies régionalisées.

Conditions pédo-climatiques et cultures

Conditions pédo-climatiques

Choisir la région et le type de sol. Midi-Pyrénées / Argilo-calcaire

La charge en cailloux de vos parcelles vous empêche-t-elle de faire du désherbage mécanique ? ☐ Oui ☒ Non

Cultures envisagées

Quelle est la base de votre rotation actuelle ? pour un système de culture

Culture 1 Blé dur d'hiver

Culture 2 Tournesol

Culture 3 - Choisir -

Culture 4 - Choisir -

Culture 5 - Choisir -

Culture 6 - Choisir -

Seriez-vous prêt à intégrer d'autres cultures ? ☒ Oui ☐ Non

Pour sélectionner plusieurs cultures, il faut maintenir appuyé la touche ctrl en même temps que l'on sélectionne avec la souris.

Si oui, lesquelles ?

Cultures à ajouter

- Choisir -

Blé tendre d'hiver

Colza

Féverole d'hiver

Lin d'hiver

Mais

Orge d'hiver

Pois d'hiver

Pois de printemps

Sorgho

Choisissez la tête de rotation

culture qui débutera la rotation proposée Blé dur d'hiver

Filtres. Vous voulez que dans les rotations proposées il y ait au moins

En laissant à 0, vous verrez l'ensemble des propositions de rotations

2 Blé d'hiver

1 Colza d'hiver

Figure 1. Données pédoclimatiques et choix agronomiques

18 successions différentes sont proposées.

(combinaisons faisables en fonction des cultures choisies)

Culture 1	Culture 2	Culture 3	Culture 4	Culture 5	Culture 6	faisabilité	désh. méca.	filère	HHPP	diversité
Blés d'hiver	Colza	Sorgho	Tournesol	Blés d'hiver	Pois de printemps	***	**	***	***	***
Blés d'hiver	Sorgho	Tournesol	Blés d'hiver	Colza	Pois de printemps	***	**	***	***	***
Blés d'hiver	Sorgho	Tournesol	Blés d'hiver	Pois de printemps	Colza	***	**	***	***	***
Blés d'hiver	Colza	Sorgho	Tournesol	Blés d'hiver	Tournesol	***	**	***	***	**
Blés d'hiver	Sorgho	Tournesol	Blés d'hiver	Colza		***	**	***	***	**
Blés d'hiver	Tournesol	Blés d'hiver	Tournesol	Pois de printemps	Colza	***	**	***	***	**
Blés d'hiver	Tournesol	Pois de printemps	Blés d'hiver	Colza		***	**	***	***	**
Blés d'hiver	Pois de printemps	Sorgho	Tournesol	Blés d'hiver	Colza	***	**	***	*	***
Blés d'hiver	Sorgho	Tournesol	Pois de printemps	Blés d'hiver	Colza	**	**	***	*	***
Blés d'hiver	Tournesol	Sorgho	Tournesol	Blés d'hiver	Colza	***	**	***	*	**
Blés d'hiver	Tournesol	Blés d'hiver	Colza			***	**	***	*	**
Blés d'hiver	Tournesol	Blés d'hiver	Tournesol	Blés d'hiver	Colza	***	**	***	*	**
Blés d'hiver	Tournesol	Blés d'hiver	Colza	Pois de printemps	Colza	***	**	***	*	**
Blés d'hiver	Pois de printemps	Colza	Blés d'hiver	Tournesol		***	**	***	*	**
Blés d'hiver	Colza	Pois de printemps	Blés d'hiver	Tournesol		***	**	***	*	**
Blés d'hiver	Tournesol	Blés d'hiver	Pois de printemps	Blés d'hiver	Colza	***	**	***	*	**
Blés d'hiver	Pois de printemps	Blés d'hiver	Tournesol	Blés d'hiver	Colza	***	**	***	*	**
Blés d'hiver	Pois de printemps	Blés d'hiver	Colza			***	**	***	*	**

Figure 2. Propositions de rotations évaluées selon 5 critères

Dans la condition : MP1 - Midi-Pyrénées (Argilo-calcaire)
Taille de la succession/rotation : 6

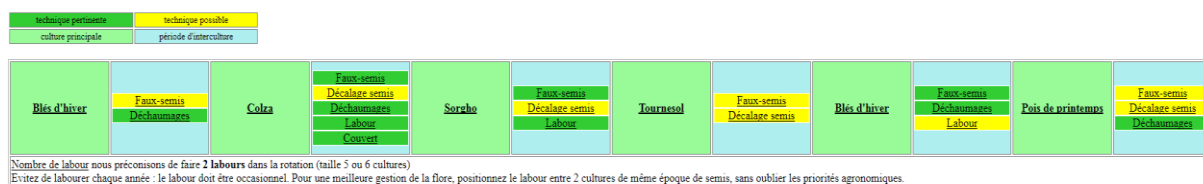


Figure 3. Rotation choisie et combinaison de pratiques préventives de désherbage

idITK	degré de réduction de l'IFT	pré-semis	post-semis/pré-levée	cotylédon	une paire de feuilles	2 paires de feuilles	5 à 8 feuilles	Limite Passage Tracteur ou Limite Passage Bineuse
T01	tout mécanique 1		Herse étrille Aveugle et ou Houe rotative Aveugle	Herse étrille et ou Houe rotative		Bineuse classique	Bineuse classique	Bineuse classique
T02	tout mécanique 2		Herse étrille				Bineuse classique	
T03	tout mécanique 3		Herse étrille			Herse étrille	Bineuse classique	Bineuse classique
T04	mixte 1		Herse étrille Aveugle et ou Houe rotative Aveugle			Herbicide (variété tolérante)		
T07	mixte 4		Herbicide			Herse étrille	Bineuse classique	Bineuse classique
T08	mixte 5		Herbicide			Bineuse classique	Bineuse classique	Bineuse classique
T10	mixte 9				Herse étrille	Herbicide (variété tolérante)		
T11	mixte 10					Herbicide (variété tolérante)	Bineuse classique	

Figure 4. Stratégies de désherbage selon un gradient décroissant d'utilisation des herbicides

3. Conclusion

Ce logiciel n'est pas un outil de prévision d'évolution de la flore sous l'effet des systèmes, contrairement à FLORSYS (cf. annexe, p. 98) ou DECIFLORSYS (Colas et al, p. 87). Il indique simplement les voies d'amélioration des pratiques et des systèmes sans évaluation *a priori* des effets sur la flore. Son but unique est d'aider les utilisateurs finaux (conseillers, formateurs, agriculteurs) à extraire, trier et valoriser au mieux les informations techniques essentielles à la mise en place de pratiques ordonnées et pertinentes.

Ce guide n'est pas un index de solutions uniques prêtes à l'emploi et utilisables dans n'importe quel territoire. Ce n'est pas non plus un substitut à la réflexion personnelle : les propositions devront toujours être soumises à son propre jugement. Il ne remplacera jamais le savoir et savoir-faire du conseiller agricole ou de l'agriculteur, mais il pourra formaliser leur connaissance empirique. Ce premier prototype intègre seulement quatre régions : Midi-Pyrénées (Occitanie ouest), Ile-de-France, Bourgogne et Aquitaine. Par manque de données techniques validées ou de moyens financiers et humains nous n'avons pas introduit les systèmes en non-travail du sol et la gestion des couverts (espèces, implantation, gestion, destruction). Les prochains développements de l'outil concerneront l'ajout de nouvelles régions de productions et la prise en compte de nouveaux systèmes de production (non labour, couverture du sol...). Enfin, l'entrée unique de cet outil est la réduction des herbicides mais il est envisageable de concevoir une nouvelle entrée en réponse à une problématique adventice particulière : graminées résistantes, espèces exotiques difficiles...

Un indicateur « offre trophique pour pollinisateurs par les adventices » pour le modèle FLORSYS

Christian Bockstaller ⁽¹⁾, Jean Villerd ^(2, 3) & Nathalie Colbach ⁽³⁾

⁽¹⁾ LAE, Université de Lorraine, INRA, 68000 Colmar, France

⁽²⁾ LAE, Université de Lorraine, INRA, 54500 Vandœuvre, France

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

Correspondance : Christian.Bockstaller@inra.fr

Résumé

Dans le cadre du projet COSAC, nous avons développé un indicateur évaluant l'offre trophique pour les pollinisateurs par les adventices. Il est basé sur deux composantes: i) la densité des adventices en fleurs prédite par le modèle FLORSYS, ii) un indicateur évaluant la valeur pollinisatrice de chaque espèce adventice, à partir des traits floraux, pour les abeilles, bourdons, syrphes, et papillons. L'indicateur d'offre trophique se calcule en deux étapes : i) agrégation pour chaque espèce de sa densité et de sa valeur pollinisatrice pour obtenir une offre trophique par espèce d'adventice, ii) agrégation de ces valeurs d'offre trophique et du nombre d'espèces du couvert pour obtenir l'indicateur final. Pour chaque étape, nous avons eu recours à des approches arithmétiques (somme, produit) ou à des arbres de décision flous en utilisant l'outil CONTRA. Enfin, nous avons testé les modes de construction à l'aide de simulations par le modèle FLORSYS sur 272 systèmes de culture.

Mots-clés : Indicateur, traits floraux, abeilles, papillons, agrégation

1. Introduction

Les adventices dans les écosystèmes agricoles, en bord de champ comme dans la parcelle, sont une source de nectar et de pollen pour les pollinisateurs. Ainsi Mézière et al. (2015) ont développé un indicateur d'offre trophique des adventices pour les abeilles domestiques. Cet indicateur résulte du produit de deux composantes : i) la densité des adventices en fleurs prédite par le modèle de simulation de la dynamique de la flore adventice FLORSYS (cf. annexe, p. 98), ii) un indicateur évaluant la valeur pollinisatrice pour les abeilles domestiques de chaque espèce adventice à partir de ses traits floraux (Ricou et al., 2014). Cependant, ce mode de calcul conduit à des compensations entre les deux variables de sorte qu'un couvert dense de graminées équivaut à un couvert peu dense de fleurs à haute valeur pollinisatrice, ce qui n'est pas pertinent. Ceci nous a conduits ici à tester deux autres méthodes d'agrégation des composantes de l'indicateur, et à étendre les indicateurs à d'autres organismes pollinisateurs (bourdons, syrphes, papillons). Pour cela, nous avons eu recours aux arbres de décisions utilisant la logique floue qui permettent de combiner les avantages des arbres de décision (règles linguistiques sous forme « si alors », combinaison possible d'informations quantitatives et qualitatives) et ainsi d'éviter les effets de seuils liés au saut de classe en logique booléenne. Nous avons utilisé la méthode CONTRA ¹⁸(Bockstaller et al., 2017) qui permet une construction transparente de tels arbres.

2. Matériel et Méthode

Le calcul de l'indicateur se fait en deux étapes. Pour chaque espèce adventice, la densité de plantes D_s (exprimée en $\log_{10}(\text{densité}+0,0001)$) et la valeur pollinisatrice P_s (exprimée sur une échelle entre 1=faible et 10=élevée) sont agrégées pour obtenir une offre trophique par espèce adventice. Dans un second temps, ces valeurs sont agrégées pour obtenir une valeur de l'offre de pollinisation pour l'ensemble de la flore adventice. Trois méthodes d'agrégation ont été testées :

- calcul du produit pour chaque espèce de D_s et P_s pour obtenir une offre trophique par espèce, et somme de ces notes pour l'ensemble des espèces de la flore (variante « Combinaison linéaire pondérée »),

¹⁸ CONTRA = CONstruction TRANsparente d'Arbre de décision : une méthode et un outil (calculateur Excel) pour construire des arbres de décision utilisant la logique floue.

- agrégation de Ds et Ps par arbre de décision flou avec la méthode CONTRA pour obtenir une offre trophique par espèce, et somme de ces notes pour l'ensemble des espèces de la flore (variante « CONTRA et somme »),
- agrégation de Ds et Ps par arbre de décision flou pour obtenir une offre trophique par espèce, puis agrégation de la moyenne de l'offre trophique de l'ensemble des espèces avec le nombre d'espèces par arbre de décision flou (variante « double CONTRA »).

Enfin, nous avons testé les modes de construction à l'aide de simulations par le modèle FLORSYS, réalisées pour 272 systèmes de culture provenant de 6 régions françaises et une région espagnole. Une analyse de l'effet des différentes techniques sur l'offre de pollinisation globale calculée avec le dernier mode d'agrégation (« double CONTRA ») a été réalisée par groupe de pollinisateurs.

3. Résultats

Du Tableau 1, il ressort que les variantes basées sur les sommes (« Combinaison linéaire pondérée » et « CONTRA et somme ») donnent un fort poids à la densité et autorisent des compensations pour des situations très différentes (p. ex. lignes grisées 4 et 8). L'agrégation reposant sur une double agrégation CONTRA permet d'avoir des résultats plus satisfaisants : les résultats restent faibles quand la valeur pollinisatrice est faible (=1) et les couverts avec plus de diversité d'espèces adventices sont légèrement avantagés comme cela est suggéré par la bibliographie (Potts et al, 2003).

En revanche, pour les simulations de systèmes culture, la variante double CONTRA aboutit au modèle avec le pouvoir explicatif le plus faible (Tableau 2). Ceci peut s'expliquer par le fait que les systèmes de culture ont produit des flores assez semblables en termes d'offre pour les pollinisateurs mais avec des densités différentes, ce qui favorise un mode d'agrégation où la densité joue un rôle prépondérant.

Tableau 1. Exemples de calcul d'une offre de pollinisation globale à partir de l'offre de pollinisation (hypothèse : couvert avec espèces à même offre) et le nombre d'espèces, ceci par somme des offres par espèces ou par somme pondérée.

Densité adventice plante/m2	Valeur pollinisatrice (entre 0 et 10)	Offre pour les pollinisateurs par espèce adv.	Nombre espèces d'adventice	Offre globale pour les pollinisateurs		
				Combinaison linéaire pondérée	CONTRA et somme	Double CONTRA
1	1	0,3	1	0	0,3	0
1	1	0,3	10	0	3	0
10	1	0,7	1	1	0,7	0,1
10	1	0,7	10	10	7	0,1
100	1	1	1	2	1	0,1
1	10	3,3	1	0	3,3	
1	10	3,3	10	0	33	2,5
10	10	6,7	1	10	6,7	4,5
10	10	6,7	10	100	67	7,5
100	10	10	10	200	100	10

Tableau 2. R² partiel du modèle statistique (système de culture x région x année x répétition) explicatif de l'offre pour les pollinisateurs

	Combinaison linéaire pondérée	CONTRA et somme	Double CONTRA
Abeilles	0,47	0,42	0,36
Bourdons	0,43	0,37	0,33
Syrphes	0,48	0,45	0,36
Papillons	0,44	0,40	0,35

L'offre trophique est principalement réduite par le travail du sol, plus que par les herbicides (Tableau 3). Ceci est cohérent avec l'effet primordial de l'effet du travail du sol sur la flore adventice (Colbach et Cordeau, 2018). Cependant, cet effet peut être partiellement compensé par des dates de travail du sol bien placées. Ainsi, reculer la date du premier travail du sol ou avancer la date du dernier travail du sol augmente l'offre trophique. Pour les abeilles, le choix des cultures semble aussi jouer un rôle important. Une analyse plus poussée des simulations sera nécessaire pour comprendre ces effets.

Tableau 3. Techniques-clés déterminant l'offre trophique pour pollinisateurs basées sur la flore adventice. Paramètres de régression de modèles linéaires avec les indicateurs d'offre trophique moyennés sur la rotation (N=272). Les cellules sont colorées en rouge (diminution de l'offre trophique) ou vert (augmentation de l'offre) ; les cellules vides indiquent l'absence de corrélations significatives

Techniques culturales (moyenne sur la rotation)	Offre trophique pour			
	Abeilles	Bourdons	Syrphes	Papillons
Rotation				
Alterner des années avec et sans cultures de couverture (% ans)	-0.1260	.	.	.
Alterner des cultures d'hiver et de printemps (% ans)	0.1314	.	.	.
Présence de cultures de printemps	.	0.0723	.	.
Date de semis des cultures d'hiver (jours juliens)	0.0004	.	.	0.0013
Date de semis des cultures de printemps (jours juliens)	-0.0013	-0.0010	.	.
Date de récolte des cultures d'hiver (jours juliens)	.	0.0007	0.0012	.
Travail du sol				
Parcelle travaillée vs en semis direct	-0.5136	-0.4202	-0.5625	-0.3645
Date du premier travail (jours depuis récolte)	0.0010	0.0006	0.0009	0.0009
Date du dernier travail (jours jusqu'au semis)	0.0033	0.0018	0.0032	0.0038
Date du labour (jours depuis récolte)	.	0.0002	.	.
Date du labour (jours jusqu'au semis)	.	.	.	-0.0007
Fréquence de labour (an/an)	.	.	.	0.1114
Fréquence de labour oct-mars (an/an)	0.1886	0.0726	0.1444	0.2102
Broyage (opérations/an)	0.1679	0.0562	.	.
Profondeur de travail (cm)	.	.	.	-0.0164
Date du roulage (jours depuis récolte)	.	.	0.0006	.
Herbicides				
Glyphosate en culture OGM (oui ou non))	.	.	.	-0.1381
Herbicides foliaires (produits/an)	.	-0.0209	-0.0220	.
Herbicides systémiques (produits/an)	-0.0227	.	-0.0228	-0.0468

9. Conclusion

Au vu des résultats sur les cas théoriques et les simulations, la méthode basée sur une double agrégation par arbre de décision floue (« double CONTRA ») sera retenue. Le couplage des indicateurs avec FLORSYS permet d'identifier les techniques culturales qui favorisent l'offre trophique pour pollinisateurs due aux adventices. Il s'agit maintenant d'identifier les systèmes de culture qui concilient production et biodiversité.

4. Références bibliographiques

- Bockstaller, C., Beauchet, S., Manneville, V., Amiaud, B., Botreau, R., 2017. Environ. Model. Softw. 97, 130–144.
- Colbach, N., Cordeau, S., 2018. Eur. J. Agron. 94, 67–78
- Mézière, D., Colbach, N., Dessaint, F., Granger, S., 2015. Eur. J. Agron. 68, 22–37
- Potts, S.G., Vulliamy, B., Dafni, A., Ne'eman, G., Willmer, P., 2003. Ecology 84, 2628–2642.
- Ricou, C., Schneller, C., Amiaud, B., Plantureux, S., Bockstaller, C., 2014. Ecol. Indic. 45, 320–321.

Comment conseillers et agriculteurs contribuent au développement d'un modèle d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventice ?

Floriane Colas⁽¹⁾, Wilfried Queyrel⁽¹⁾, Bastien Van Inghelandt⁽¹⁾, Jean Villerd^{(1) (2)} & Nathalie Colbach⁽¹⁾

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

⁽²⁾ LAE, INRA, Univ. Lorraine, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France

Correspondance : Floriane.Colas@inra.fr

Résumé

Afin de réduire l'utilisation d'herbicides, nous avons besoin d'outils pour aider à concevoir des stratégies de gestion des adventices économes en herbicides. Dans ce but, nous avons développé un outil d'aide à la conception de systèmes de culture réconciliant protection des cultures et des écosystèmes. La démarche fait intervenir en parallèle le développement de la structure de ce nouvel outil d'aide à la décision (OAD) en interaction avec les futurs utilisateurs (conseillers et agriculteurs) et une simplification du contenu biophysique du modèle FLORSYS pour l'évaluation des impacts des adventices. L'OAD résultant, DECIFLORSYS, est composé : (1) du classement listant les techniques culturales les plus influentes, (2) d'arbres de décision proposant des combinaisons de pratiques culturales pour atteindre un objectif donné en termes d'impact de la flore adventice (ex. concilier faible perte de rendement et faible usage d'herbicide) et (3) d'un prédicteur rapide permettant de tester en direct sur ordinateur de nouveaux systèmes de culture.

Mots-clés : outil d'aide à la décision, enquêtes, atelier de co-conception, outil synthétique, outil détaillé, adventices

1. Introduction

Reconcevoir des stratégies de gestion de la flore adventice est essentiel afin de suivre les réglementations françaises et européennes d'utilisation des herbicides. Cette reconception est d'autant plus complexe que la gestion des adventices doit se réfléchir sur le long terme et doit tenir compte des services dus aux adventices dans l'agroécosystème comme les ressources alimentaires pour les pollinisateurs et les carabes. C'est pourquoi nous avons besoin d'outils pour aider les acteurs, agriculteurs et conseillers agricoles, dans la conception de systèmes de culture. Il est nécessaire d'avoir à la fois un outil qui représente la complexité des interactions entre le système de culture et les adventices et un outil qui soit utile et utilisé. C'est pourquoi notre objectif était de co-développer, avec des conseillers agricoles et des agriculteurs, un outil d'aide à la décision (OAD) pour la gestion agroécologique des adventices à l'échelle du système de culture.

2. Matériel et Méthodes

La démarche adoptée ici fait intervenir les futurs utilisateurs dès les premières étapes du développement, tout en utilisant au mieux un modèle complexe existant, en le simplifiant mathématiquement (étape **a.** dans la Figure 1). En premier lieu, nous avons défini les besoins pour un OAD pour la gestion stratégique des adventices, via un questionnaire en ligne. Nous avons en parallèle utilisé des méthodes issues de la fouille de données pour simplifier un modèle de recherche existant afin de synthétiser les connaissances sur les processus biophysiques à introduire dans l'OAD (**b.** Figure 1). Ce modèle, FLORSYS, simule la dynamique pluriannuelle de la flore adventice plurispécifique et la croissance des cultures dans les

systèmes de culture (cf. annexe, p. 98). En sortie FlorSys produit des indicateurs d'impact de la flore adventice évaluant les services ex. la contribution des adventices à la réduction de la lixiviation de l'azote ou à l'alimentation des abeilles et les disservices ex. les pertes de rendement ou les difficultés lors de la récolte dues aux adventices. Les agriculteurs et conseillers agricoles ont aussi été mobilisés à d'autres étapes de la conception, en leur faisant tester différents prototypes d'OAD dans des ateliers de co-conception de systèmes de culture. Notamment le format de sortie ou le format d'entrée étaient présentés pour avoir leurs retours et améliorations à apporter (c. Figure 1). La mise en œuvre de l'OAD a été testée lors d'un atelier de co-conception de système de culture (voir Queyrel et al 2019, p. 39 dans ce colloque).

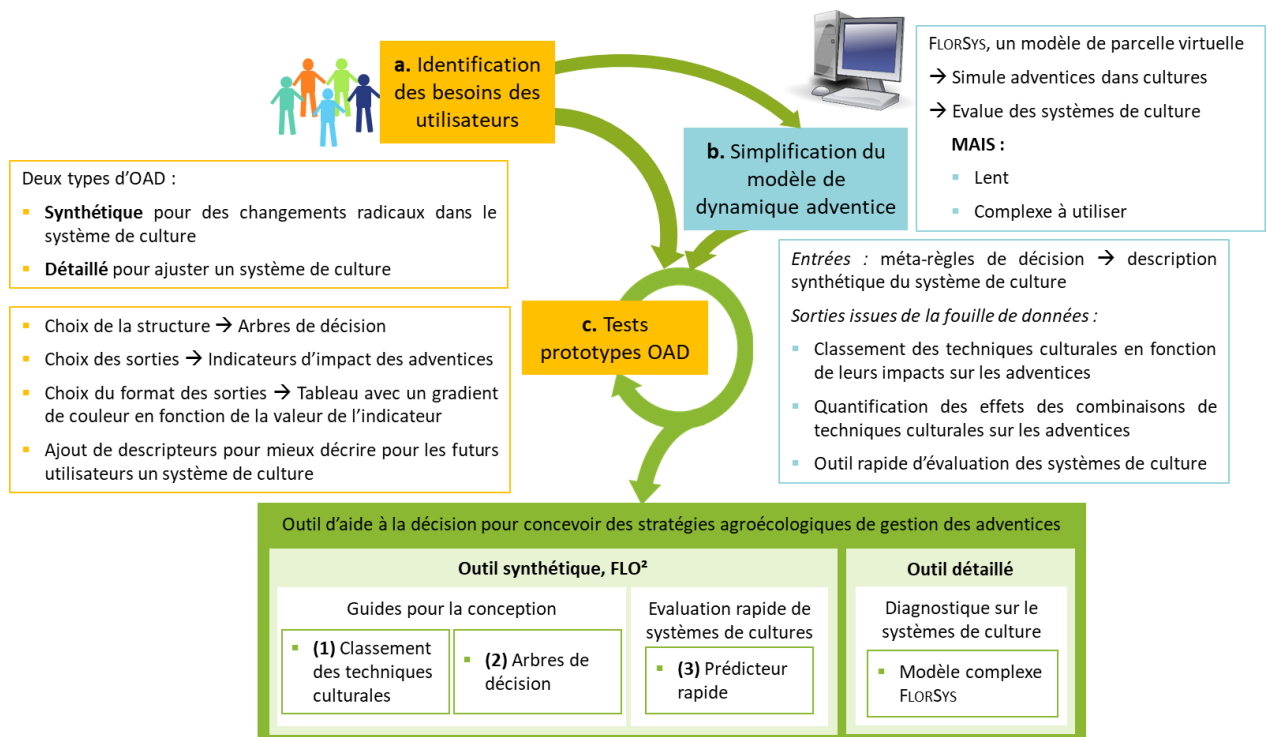


Figure 1. Méthodologie et résultats majeurs de la co-conception avec les futurs utilisateurs (conseillers agricoles et agriculteurs) d'un outil d'aide à la décision pour la gestion agroécologique de la flore adventice.

3. Résultats

Le questionnement des utilisateurs a permis d'identifier le besoin d'un outil permettant d'évaluer à la fois les services et les disservices des adventices et permettant une sous-sélection, dépendante des objectifs des utilisateurs, des indicateurs évaluant ces services et les disservices des adventices. Les utilisateurs ont également exprimé le besoin de deux outils : un outil détaillé, correspondant à FLORSYS, pour faire du diagnostic sur les systèmes de cultures testés et finement ajuster des techniques culturales, et un nouvel outil d'aide à la décision rapide et synthétique pour concevoir des métarègles de décision.

Ce nouvel outil, DECIFLORSYS, se compose de trois parties. Tout d'abord, **(1)** une grille de conseil classant les techniques culturales en fonction de leur effet sur la flore adventice et des conséquences pour la production agricole et la biodiversité afin de guider l'utilisateur dans le choix des techniques à modifier en vue d'améliorer ou concevoir un système de culture. Ensuite, **(2)** une série d'arbres de décision montrant comment combiner les techniques culturales, pour chaque situation de production et en fonction de la combinaison des critères d'évaluation de la flore adventice retenue par l'utilisateur. Finalement, **(3)** un calculateur (issu de la forêt aléatoire) prédit en quelques secondes les valeurs des indicateurs d'impact de la flore adventice à partir des métarègles de décision et descripteurs synthétiques des systèmes de culture. Les parties (2) et (3) de l'outil étant les éléments à adapter en fonction des objectifs des utilisateurs et donc d'évaluer les deux aspects des impacts des adventices.

Les ateliers de co-conception de système de culture ont montré l'intérêt du calculateur de DECIFLORSYS pour :

- estimer les pertes de rendement dues aux adventices du système de référence et des prototypes de système de culture créés lors de l'atelier ;
- évaluer les systèmes sur le long terme en termes de gestion de la flore adventice ;
- prendre en compte la contribution des adventives à la biodiversité (ressources pour les carabes et pour les abeilles).

4. Conclusion

L'utilisation de DECIFLORSYS dans le cadre d'ateliers de co-conception de système de culture avec des agriculteurs a démontré l'utilité de l'outil. Des améliorations sont à l'étude afin de faciliter l'analyse par les agriculteurs des résultats de DECIFLORSYS. Parmi les solutions envisagées figurent une représentation simplifiée des arbres de décision et une interface graphique permettant une entrée simplifiée des systèmes de culture à tester dans DECIFLORSYS.

Dans quels systèmes de culture les adventices résiduelles peuvent-elles réduire la lixiviation du nitrate et l'érosion des sols ?

Delphine Moreau, Olivia Pointurier, Bernard Nicolardot, Jean Villerd* & Nathalie Colbach

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

*LAE, INRA, Université de Lorraine, 54500 Vandoeuvre, France

Correspondance : delphine.moreau@inra.fr

Résumé

Si les adventices sont un bioagresseur majeur des cultures, elles peuvent également fournir des services bénéfiques pour les agroécosystèmes. Cette étude, basée sur l'utilisation d'un modèle de simulation, vise à identifier les déterminants de deux bénéfices environnementaux dus aux adventices. Les résultats montrent que la contribution de la flore adventice résiduelle pour réduire la lixiviation du nitrate et l'érosion des sols sont davantage influencés par les techniques culturales, que par les caractéristiques biologiques des espèces adventices. Le travail du sol et la rotation des cultures sont les techniques culturales les plus influentes. Cette étude identifie quelques combinaisons de techniques culturales qui permettent de favoriser ces bénéfices, tout en limitant les impacts néfastes des adventices sur la production agricole. Elles associent principalement des opérations peu fréquentes de travail du sol, de nature très superficielle, avec une faible proportion de culture d'hiver dans la rotation.

Mots-clés : flore adventice résiduelle, lixiviation du nitrate, érosion des sols, bénéfice, interculture.

1. Introduction

La protection intégrée des cultures tolère une flore adventice résiduelle si elle n'est pas nuisible pour la production agricole. Les adventices sont souvent uniquement considérées comme un bioagresseur, causant des pertes de rendement et pollution des récoltes, et étant un vecteur potentiel de maladies. Cependant, elles peuvent aussi fournir des services bénéfiques pour les agroécosystèmes, favorisant la biodiversité et fournissant des ressources pour d'autres organismes bénéfiques à la production agricole (pollinisateurs, carabes...). Les bénéfices environnementaux de la flore adventice pour la protection contre la lixiviation du nitrate et l'érosion des sols, particulièrement pendant l'interculture, ont été jusqu'à maintenant peu évalués. Cette étude vise à (1) développer des indicateurs pour rendre compte du potentiel rôle bénéfique de la flore adventice résiduelle pour protéger de la lixiviation du nitrate et de l'érosion des sols à l'échelle de la parcelle agricole, et (2) calculer ces indicateurs à partir des sorties d'un modèle de simulation de la dynamique de la flore adventice (FLORSYS). Ce travail s'inscrit dans la finalité de déterminer quels systèmes de culture favorisent ces bénéfices environnementaux de la flore adventice, tout en limitant les impacts négatifs sur la production agricole.

2. Matériel et méthodes

Une flore adventice est considérée comme efficace pour réduire la lixiviation du nitrate si elle a une forte croissance et/ou elle contient des espèces adventices avec une forte capacité à prélever l'azote minéral. Pour protéger contre l'érosion des sols, une flore adventice est efficace si la couverture du sol par les adventices est forte, alors que la couverture par les cultures de rente est faible. Les deux indicateurs sont calculés sur les périodes de faible couverture du sol par la culture où les risques environnementaux sont les plus forts. Ils sont sans unité et des valeurs élevées indiquent un fort potentiel de protection environnementale.

Ces deux nouveaux indicateurs ont été couplés au modèle FLORSYS qui simule les effets des systèmes de culture, en interaction avec le pédoclimat, sur la démographie des adventices et le rendement des cultures (cf. annexe, p. 98). Ce modèle ainsi complété a été utilisé pour simuler 259 systèmes de culture issus d'exploitations agricoles de 6 régions françaises et une région espagnole, avec la flore adventice typique de ces régions. Les corrélations entre indicateurs de bénéfice et de nuisibilité liés à la flore adventice ont été analysées. Des arbres de régression ont permis d'analyser les relations entre les indicateurs de protection contre la lixiviation et de l'érosion, d'une part, et des techniques agricoles, d'autre part. La finalité était de comparer les systèmes de culture en termes de capacité de la flore adventice résiduelle à réduire la lixiviation et l'érosion, tout en limitant les impacts néfastes sur la production agricole.

3. Résultats

Les systèmes de culture favorisant une forte protection contre la lixiviation du nitrate sont généralement ceux favorisant une forte protection contre l'érosion des sols (Figure 1) : ces deux bénéfices liés aux adventices sont donc compatibles. Cependant, les systèmes de culture favorisant ces bénéfices sont généralement ceux présentant une forte perte de rendement de la culture due aux adventices. Ces bénéfices environnementaux dus aux adventices sont davantage influencés par les techniques culturales que par les caractéristiques biologiques des espèces adventices. En particulier, le travail du sol et la rotation des cultures sont les catégories de techniques culturales qui influent le plus la lixiviation et l'érosion, alors que les herbicides ont un effet moindre. La plupart des systèmes de culture issus de notre base de données favorisent davantage une faible perte de rendement de la culture due aux adventices, plutôt qu'une forte protection contre la lixiviation et l'érosion. Ce résultat est en accord avec le défi majeur pour les agriculteurs de minimiser la nuisibilité liée aux adventices, comme les pertes de rendement, alors que la protection environnementale est une préoccupation mineure (enquête récente issue de 980 acteurs de la profession agricole en France; S. Cordeau and M. Schwartz, dans Schwartz, 2018). De manière intéressante, quelques systèmes de culture permettent néanmoins de concilier une relativement faible perte de rendement due aux adventices et une relativement forte protection environnementale. Ils combinent principalement des opérations peu fréquentes de travail du sol superficiel ($\leq 3.4/\text{an}$), une faible proportion de culture d'hiver dans la rotation ($\leq 21\%$) et une très faible profondeur de travail du sol ($< 2.5 \text{ cm}$).

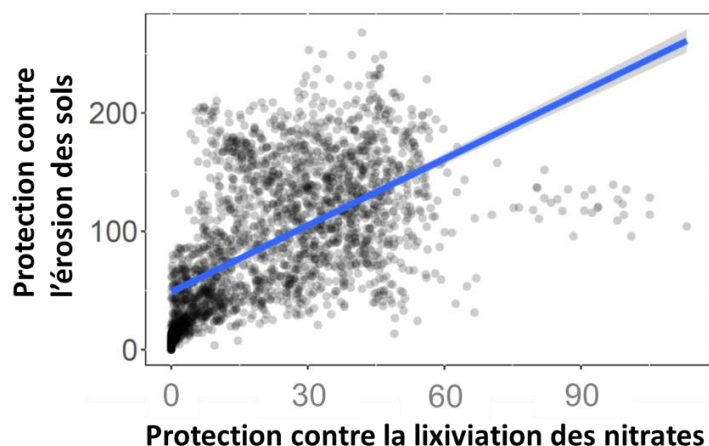


Figure 1. Corrélation entre les indicateurs de protection contre la lixiviation du nitrate et contre l'érosion des sols ($r = 0.59$; $P < 0.001$). Les deux indicateurs sont sans unité et des valeurs élevées indiquent un fort potentiel de protection environnementale. Chaque symbole représente une situation (un système de culture $\times$ une répétition climatique).

4. Conclusion

Cette étude est parmi les premières à analyser les déterminants des bénéfices environnementaux qui peuvent être fournis par la flore adventice résiduelle, en termes de protection contre la lixiviation du nitrate et l'érosion des sols. Elle montre que ces bénéfices peuvent être favorisés de manière concomitante dans les agroécosystèmes. Même s'ils sont souvent associés à une nuisibilité accrue des adventices en termes de pertes de rendement, certaines combinaisons de techniques culturales permettent de concilier ces impacts souvent antagonistes des adventices. La prochaine étape consistera à évaluer nos indicateurs en confrontant les résultats à des observations de terrain. La faisabilité technico-économique des systèmes de culture offrant un bon compromis sera aussi à évaluer.

5. Référence

Schwartz M. 2018. Etude de la perception des agriculteurs, conseillers agricoles, chercheurs et techniciens des adventices des grandes cultures Mémoire de Fin d'Etude Agrosup Dijon. Dijon, INRA. 99 pp.

Quelle efficacité d'une gestion à une échelle paysagère large des abondances locales d'adventices? Une approche de modélisation à l'échelle du paysage.

Benoît Ricci ¹, Sandrine Petit ¹, Charlotte Allanic ¹, Marie Langot ¹,
Nicolas Parisey ² & Sylvain Poggi ²

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

⁽²⁾ INRA, UMR 1349 IGEPP, F-35653 Le Rheu, France

Correspondance : benoit.ricci@inra.fr

Résumé

Compte tenu de la dispersion des graines à des échelles plus larges que la parcelle, prendre en compte l'échelle du paysage est un levier d'action potentiel pour une gestion durable de la flore adventice. À l'aide d'un modèle de dynamique spatiale des adventices, nous avons traité la question : est-il possible de réduire les abondances locales d'adventices dans les cultures annuelles en introduisant dans les paysages des prairies permanentes, habitats défavorables aux adventices annuelles. Dans les paysages avec beaucoup de prairies permanentes, les densités de graines dans les cultures annuelles étaient plus faibles que dans des paysages avec peu de prairies permanentes. Cependant, ces effets spatiaux étaient beaucoup plus faibles que les effets associés au système de culture local.

Mots-clés : paysages virtuels, dynamique de populations, cultures annuelles, rotation, labour, herbicides

1. Introduction

La réduction de l'usage d'herbicides est une clé de la diminution des impacts environnementaux des systèmes de cultures, mais nécessite de mobiliser plusieurs leviers, en synergie, pour la gestion durable des espèces adventices. Compte tenu de la dispersion des graines de ces espèces à une échelle plus large que la parcelle, la prise en compte de l'échelle du paysage est un de ces leviers d'action potentiel. De nombreuses études ont identifié les effets des caractéristiques du paysage sur la composition et la richesse des communautés adventices des parcelles ; mais les effets du paysage sur les abondances sont peu documentés. Nous proposons d'étudier par modélisation la possibilité de réduire les abondances locales d'adventices annuelles dans les cultures en introduisant dans les paysages agricoles des habitats très peu favorables à ces espèces, mais néanmoins productifs, à savoir des prairies permanentes. Pour cela, nous avons développé un modèle spatialement explicite de dynamique des populations d'adventices permettant de simuler l'effet de la proportion et de l'agrégation des prairies permanentes sur les abondances de ces espèces dans les cultures annuelles.

2. Méthodes

Le modèle développé¹⁹ intègre trois leviers de gestion locale dont l'effet est déjà démontré : période de semis, fréquence de labour et intensité d'usage d'herbicides. Le modèle décrit la dynamique de quatre types fonctionnels d'espèces adventices ayant des réponses différentes à ces leviers : espèces à germination automnale et avec des graines de petite taille (< 5 mg), espèces à germination automnale et avec des graines de grande taille, espèces à germination printanière et avec des graines de petite taille et espèces à germination printanière et avec des graines de grande taille. La dynamique des adventices est

¹⁹ Ricci, B., Petit, S., Allanic, C., Langot, M., Parisey, N., Poggi, S., 2018. How effective is large landscape-scale planning for reducing local weed infestations? A landscape-scale modelling approach. *Ecol. Modell.* 384, 221–232. doi:10.1016/j.ecolmodel.2018.06.029

décrite par quatre paramètres de démographie (taux de germination, taux mortalité des graines, production de semence taux de mortalité des plantes) dont les valeurs dépendent du type fonctionnel et de la gestion de la parcelle. Chaque année, une partie des semences produites dans une parcelle est dispersée, selon une distribution 2Dt correspondant à une distance moyenne de dispersion de 1,5 m.

En simulation, les leviers de gestion locale sont combinés sous forme de trois systèmes de cultures réalistes: un système avec labour fréquent, fort usage d'herbicide, et moins de 25% de cultures de printemps dans la rotation ; un système sans labour, avec très fort usage d'herbicide et 30% de cultures de printemps ; un système sans herbicides, labour un an sur deux et 50% de cultures de printemps. Dans le paysage, pour une simulation donnée, chaque parcelle est cultivée soit avec un de ces trois systèmes de cultures, soit en prairie permanente. La dynamique des espèces a été simulée sur une durée de 50 ans dans des paysages de 16 km² (Figure 1).

Nous avons exploré l'effet de (i) la proportion de prairie permanente dans le paysage en la faisant varier de 3 à 50% et de (ii) l'agrégation des prairies permanentes dans le paysage sur les abondances d'adventices dans les parcelles de cultures.

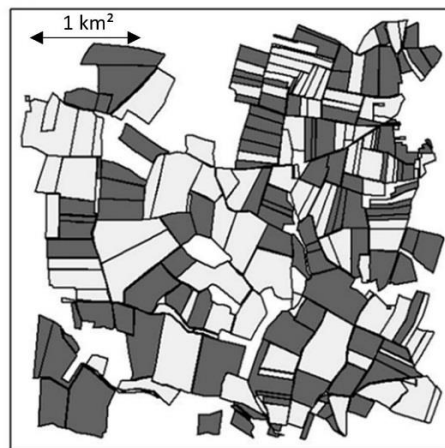


Figure 1. Exemple de paysage de simulation avec 50% de prairies permanentes (parcelles en gris foncé).

3. Résultats

L'augmentation de la proportion de prairie permanente a réduit significativement les densités totales de graines dans les cultures (Figure 2). Cependant, cette variation était beaucoup plus faible que celle liée aux différents systèmes de cultures et n'avait pas d'effet sur les densités de plantes adventices. A l'inverse, la réduction de la proportion de prairie permanente (c'est-à-dire l'augmentation de la proportion de cultures annuelles) augmentait très significativement à la fois les densités de graines et celles de plantes adventices dans les prairies permanentes, tout en restant à des niveaux faibles. L'agrégation des prairies permanentes dans le paysage n'a pas eu d'effet significatif ni sur les densités de graines ni sur celles de plantes dans les parcelles de cultures annuelles.

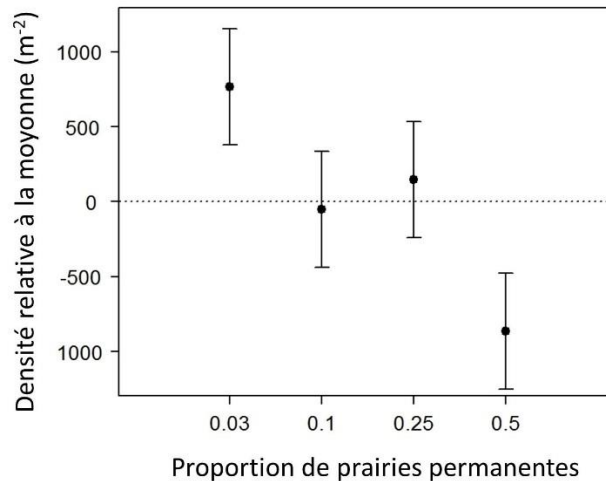


Figure 2. Densité de graines relative à la moyenne de l'ensemble des simulations (coefficient de régression partiel centré) en fonction de la proportion de prairie permanente.

4. Discussion

Avec le modèle de dynamique d'adventice utilisé, l'introduction dans les paysage agricole d'un type d'habitat fortement défavorable pour les adventices annuelles a permis de réduire les stocks de semences de ces espèces dans les cultures annuelles, mais sans réduction significative des densités de plantes. Ainsi, les effets spatiaux ont bien un effet sur la dynamique, mais, le rôle des effets locaux est largement prépondérant par rapport aux effets spatiaux, ce qui est cohérent avec certaines études existantes dans la littérature. Ceci résulte de la faible distance de dispersion des adventices par rapport à l'échelle paysagère à laquelle l'organisation spatiale des cultures et des habitats semi-naturels se raisonne. De plus, la longue persistance des graines dans le stock lisse les variations interannuelles et gomme les effets spatiaux (influence de la dynamique des adventices d'une parcelle sur celle des parcelles voisines) lorsqu'ils ne s'expriment que certaines années. En supprimant la persistance du stock dans le modèle, les effets spatiaux tendent à augmenter et affectent cette fois aussi les densités de plantes. En conclusion, l'organisation spatiale des systèmes de culture et des habitats semi-naturels semble être un levier d'action faible sur la dynamique des adventices comparativement aux effets de modification des systèmes de culture. Cette étude n'a pas pris en compte les éventuels effets indirects qui pourraient intervenir liés notamment à l'impact des habitats semi-naturels sur la prédation des graines adventices par les insectes granivores.

Les résistances aux herbicides « non liées à la cible » : une menace pour le désherbage d'automne des céréales ?

Valérie Le Corre & Christophe Délye

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

Correspondance : christophe.delye@inra.fr

Résumé

La résistance aux herbicides peut évoluer via deux mécanismes: d'une part une résistance « liée à la cible », causée par une mutation et spécifique d'une famille herbicide, et, d'autre part, une résistance « non liée à la cible », moins spécifique, permettant par exemple une détoxification de diverses molécules. Des simulations montrent que l'évolution de résistance non-cible en réponse aux applications d'herbicides est très probable mais peut rester longtemps inaperçue car lente. En céréales d'hiver, le désherbage chimique des graminées est rendu problématique par l'évolution de résistance à la fois cible et non-cible aux herbicides de sortie d'hiver, ce qui impose un recours accru aux applications d'automne. Se pose alors la question du risque d'extension de la résistance non-cible à ceux-ci. Pour deux des herbicides concernés (prosulfocarbe et flufénacet), des tests sur semences ont été développés pour le Vulpin et l'Ivraie. Les résultats montrent que le risque de résistance biologique à ces substances est avéré dans les populations où des résistances non liées à la cible aux herbicides de sortie d'hiver sont présentes.

Mots-clés : Résistance, herbicides « racinaires », modélisation, test biologique, céréales.

1. Introduction

Le désherbage des graminées dans les céréales d'hiver a longtemps essentiellement reposé sur l'emploi d'herbicides foliaires en sortie d'hiver, d'abord à base d'inhibiteurs de l'ACCCase (clodinafop, pinoxaden...), puis d'inhibiteurs de l'ALS (iodosulfuron + mésosulfuron, pyroxsulame...). Chez le vulpin et l'ivraie, la résistance à ces deux familles herbicides est installée dans toutes les zones de cultures de céréales d'hiver. Cette résistance semble être à la base une résistance non liée à la cible (détoxification), avec la possibilité de co-occurrence de résistance liée à la cible (mutations dans les gènes de l'ACCCase et/ou de l'ALS). Pour pallier le manque croissant d'efficacité des herbicides foliaires, l'emploi d'herbicides à application racinaire en automne (inhibiteurs de l'élongation des acides gras) se développe (Arvalis, 2018). Or la littérature scientifique indique que la présence de résistances non liées à la cible aux inhibiteurs de l'ACCCase ou de l'ALS est un facteur favorisant l'évolution de résistances aux herbicides racinaires (Busi et al., 2012). Pour cette étude, nous avons développé un outil de simulation de la dynamique de la résistance lorsque des facteurs de résistance non-cible sont présents initialement. Des tests biologiques de sensibilité ont d'autre part été réalisés pour rechercher la présence de tels facteurs dans les populations de vulpin et d'ivraie.

2. Méthodes

- Un modèle de génétique des populations a été construit. Chaque plante est simulée sous la forme d'un génotype constitué d'un gène cible pouvant muter vers une forme résistante (probabilité : 10^{-4} par génération, soit la valeur maximale présente dans la littérature) et de 5 gènes contribuant de façon additive à une résistance non liée à la cible.
- Des essais de développement de tests biologiques *in vitro* de sensibilité à deux des principales substances utilisées en application d'automne (prosulfocarbe et flufénacet) ont été effectués pour le Vulpin et l'Ivraie. Ils se basent sur le principe de tests déjà publiés (Letouzé & Gasquez, 1999). Des populations où la résistance non liée à la cible à des inhibiteurs de l'ACCCase et de l'ALS est présente en fréquences élevées ont été comparées à des populations de référence.

3. Résultats & discussion

Les simulations montrent que l'évolution de résistance de cible n'est jamais certaine, car elle nécessite l'apparition de mutation. Au contraire, dès lors que des facteurs de résistance non liée à la cible sont présents initialement, même en faible fréquence (1%), celle-ci évolue dans la grande majorité des cas, mais en moyenne deux fois plus lentement : le nombre d'années d'application pour obtenir 50% de plantes résistantes étant de 6 en présence de mutation de cible contre 13 lorsque seule la non cible évolue. Les résultats des tests biologiques effectués *in vitro* en l'absence de sol ne sont pas directement extrapolables au champ. Ces tests montrent néanmoins la présence dans plusieurs des populations testées de plantes survivant à des doses contrôlant toutes les plantes des populations de référence (Fig. 1).



Figure 1. Tests de sensibilité au flufenacet effectué sur 3 populations d'Ivraie (3 lignes du haut) et 1 population sensible de référence (ligne du bas). À partir de la gauche, 1^{ère} colonne : témoin non traité, colonnes 2 à 4 : CMI (concentration minimale en herbicide tuant les plantes sensibles), colonnes 5 à 6 ou 5 à 7 : 2 x CMI. Les plantes développant une feuille à la CMI et/ou à 2 fois la CMI sont nettement moins sensibles que les plantes de référence.

Chez le Vulpin, mais surtout chez l'Ivraie, on observe une résistance biologique aux herbicides racinaires testés dans les populations pour lesquelles une résistance aux inhibiteurs de l'ACCase et de l'ALS est présente. La traduction en pratique, au champ, de cette résistance biologique est difficile à prédire. Mais il semble que les populations où une résistance aux herbicides de sortie d'hiver a été sélectionnée contiennent des plantes moins sensibles que la normale aux herbicides racinaires.

4. Conclusion

La présence au champ de résistance aux herbicides racinaires employés en applications d'automne est, sinon avérée, du moins certainement en cours de développement dans des populations de Vulpin et d'Ivraie où les inhibiteurs de l'ACCase et de l'ALS ne permettent plus le contrôle de ces espèces. Le recours à l'agronomie devient donc indispensable pour gérer ces situations. Il l'est tout autant dans les parcelles où la situation semble moins dégradée, du fait de l'évolution lente et donc « silencieuse » de la résistance non liée à la cible.

5. Références

- Arvalis (2018) <https://www.arvalis-infos.fr/ble-tendre-bien-demarrer-la-campagne-2018/2019-@/view-19261-arvarticle.html>
- Busi R, Gaines T, Walsh MJ & Powles SB (2012) Understanding the potential for resistance evolution to the new herbicide pyroxasulfone: field selection at high doses versus recurrent selection at low doses. *Weed Research* 52, 489–499.
- Letouzé A & Gasquez J (1999) A rapid reliable test for screening aryloxyphenoxypropionic acid resistance within *Alopecurus myosuroides* and *Lolium* spp. *Populations*. *Weed Research* 1999 39, 37-48

Annexe:

Une courte présentation de FLORSYS

Nathalie Colbach

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

Correspondance : Nathalie.Colbach@inra.fr

1. Structure du modèle

FLORSYS (Colbach et al, 2014, 2018) est un modèle de recherche simulant une parcelle cultivée virtuelle à un pas de temps journalier sur plusieurs années, permettant d'évaluer les performances de systèmes agricoles en termes de contrôle de la flore adventice, de maintien de la production agricole et de préservation de la biodiversité fonctionnelle, et ce pour l'ensemble des systèmes agricoles et des régions françaises de grandes cultures (Figure 1). FLORSYS est actuellement paramétré pour 26 espèces adventices fréquentes et avec des caractéristiques biologiques variées.

L'utilisateur fournit en entrée la liste détaillée des opérations culturales appliquées (cultures, variétés, dates, outils, densités, doses, réglages, etc.) au cours des différentes années, les caractéristiques pédoclimatiques de la parcelle (texture du sol, latitude, flore potentielle régionale). Il est aussi nécessaire de renseigner des fichiers météo (température, rayonnement, précipitation, évapotranspiration) journaliers sur plusieurs années.

Ce modèle est la synthèse de nombreux travaux sur le fonctionnement des adventices. Il permet de représenter, quantifier et combiner les effets de l'ensemble des techniques culturales sur les états du milieu et des plantes adventices et cultivées présentes dans cette parcelle virtuelle. Le cœur de FLORSYS modélise le développement et la croissance des espèces annuelles adventices et des espèces cultivées, avec une représentation en 3D du couvert « culture-adventice ». Les entrées du modèle jouent sur les stades de développement (semences viables, dormantes et germées, etc.) et sur les processus (photosynthèse, respiration, croissance, phénologie, étiolement) du cycle de vie des adventices et des cultures, avec un pas de temps journalier. À maturité, les semences produites par les adventices sont ajoutées au stock semencier et un rendement est estimé pour la culture.

L'effet de chaque technique culturale est décomposé en effets individuels qui interagissent avec les états du milieu et des semences et plantes. Par exemple, le travail du sol enfouit et remonte des semences et, dans le même temps, favorise la levée des dormances et stimule des germinations ; il détruit aussi les plantules. Cette approche permet non seulement de prédire des effets moyens (exemple : le retard de semis réduit la levée adventice) mais aussi leur variabilité (exemple : le retard de semis n'est efficace que dans 57-64% des années suivant les régions) et peut même identifier les conditions de succès (exemple : retarder après le 31 octobre lors d'automne humides).

L'ensemble des variables du cycle de vie (semences et plantes de différents stades et états) est disponible en sortie pour les adventices et les cultures, à l'échelle journalière et en 3D. Pour faciliter l'évaluation des systèmes de culture, ces nombreuses variables sont traduites en indicateurs de leurs impacts sur la production agricole et la biodiversité (Figure 1). Ces indicateurs ont été développés avec des agriculteurs, des agronomes et des écologues (Mézière et al, 2015).

2. Domaine de validité

L'évaluation du modèle avec des données de terrain a identifié quelques lacunes dans des conditions particulières qui peuvent être insuffisamment caractérisées (surestimation de la survie des semences dans des parcelles gérées en semis direct, floraison trop précoce dans le Sud de la France). Toutefois, les évaluations montrent que les prédictions de FLORSYS sont généralement satisfaisantes (Colbach et al., 2016).

3. 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
- Colbach N., Bertrand M., Busset H., Colas F., Dugué F., Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N. M., Noilhan C., Strbik F., Gardarin A. (2016) Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. *Environmental Modelling & Software* 86, 184-203
- Colbach N., Favrelière E., Munier-Jolain N., Pernel J. (2018) Quels outils pour piloter la gestion durable de la flore adventice ? in B. Chauvel, H. Darmency, N. Munier-Jolain and A. Rodriguez, editors. *Gestion durable de la flore adventice des cultures*. Éditions Quae, 159-174
- 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

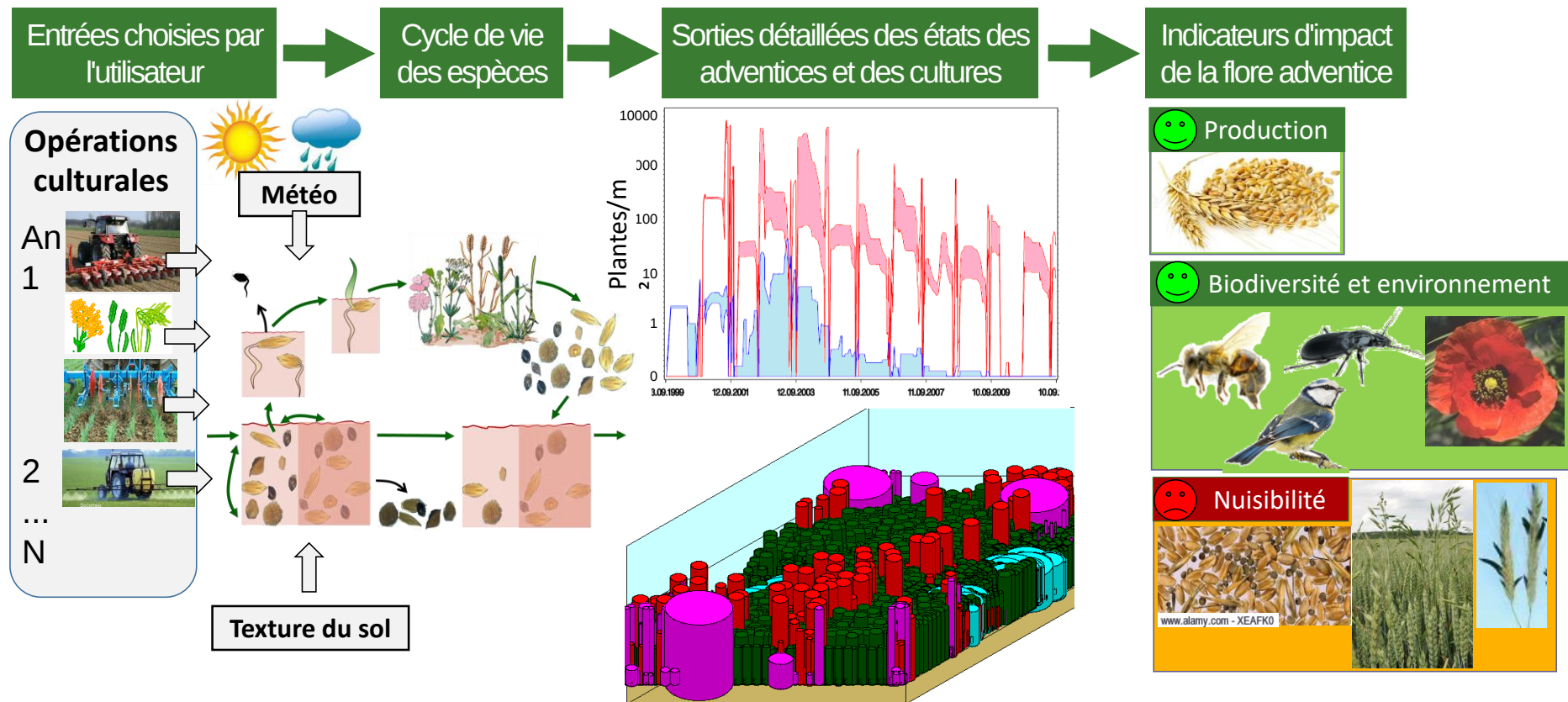


Figure 1. Le modèle FLORSYS est une parcelle virtuelle où l'on peut tester de nombreux et divers systèmes de culture à long terme et avec différentes flores adventices, conditions météo et types de sol (Colbach et al., 2014, 2018). Les entrées renseignées par l'utilisateur influent sur le cycle de vie des adventices et plantes cultivées dont la croissance et dynamique sont simulées en 3D et avec un pas de temps journalier. Cette approche mécanistique produit des sorties très détaillées qui permettent de comprendre l'effet et la performance de chaque technique et système de culture. Pour faciliter la comparaison des systèmes de culture, ces sorties détaillées sont synthétisées sous forme d'indicateurs de l'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement physique (Nathalie Colbach © 2018)

Liste des auteurs

Allanic	93	Louargant.....	77
Angevin	9, 42, 46	Lüthi.....	27
Basset	24	Maillot	32, 77
Bockstaller.....	9, 84	Martin	71
Busset	60, 71	Matejicek	60, 71
Cadoux	36	Métais	9, 66
Caneill	50	Mion.....	32
Castel.....	42	Moreau.....	9, 54, 57, 60, 90
Cavan.....	36, 42, 46	Munier-Jolain.....	54
Cerf.....	16, 20	Nicolardot	90
Chauvel.....	74	Omon	20, 42, 46
Colas.....	39, 87	Pagès.....	9
Colbach9, 12, 32, 39, 42, 46, 54, 57, 60, 62, 84, 87, 90, 98		Paoli	77
Cordeau	12, 71	Parisey	93
De Cordoue	36	Perthame	57
Délye	96	Petit.....	93
Demierre.....	27	Poggi.....	93
Derrouch.....	74	Pointurier	62, 90
Dessaint.....	74	Prost	16
Dubois	36, 46	Queyrel	39, 46, 50, 87
Dugué	54	Reibel.....	62
Felten.....	74	Ricci.....	93
Gardarin.....	54	Rodriguez.....	9, 81
Gée	77	Sauzet.....	36
Gibot-Leclerc.....	62	Steinger.....	27
Grall.....	71	Strbik	54, 62
Granger.....	50	Tailleur.....	36, 46
Guyot.....	39	Toqué	36
Harzic	24	Van Inghelandt	39, 46, 87
Herzog	27	Vieren	74
Jeangros.....	27	Villerd.....	84, 87, 90
Jones	77	Villette	77
Jouy	36	Vioix	32
Lachmann	71	Vogelgsang	27
Langot.....	93	Vuillemin	9, 66, 81
Le Corre.....	62, 96	Wirth.....	27