

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

Nicolas Cavan, Bertrand Omon, Aurélie Tailleur, Sophie Dubois, Wilfried Queyrel, Bastien van Inghelandt, Nathalie Colbach, Frédérique Angevin

► **To cite this version:**

Nicolas Cavan, Bertrand Omon, Aurélie Tailleur, Sophie Dubois, Wilfried Queyrel, et al.. Comparaison de méthodes de conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices. Innovations Agronomiques, INRAE, 2020, CoSAC, un projet pour la Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement (climat, pratiques agricoles, biodiversité), 81, pp.189-200. 10.15454/gas3-1w19 . hal-02321831

HAL Id: hal-02321831

<https://hal-agrosup-dijon.archives-ouvertes.fr/hal-02321831>

Submitted on 15 Jun 2021

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

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



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

Cavan N.¹, Omon B.², Tailleur A.³, Dubois S.⁴, Queyrel W.⁵, Van Ingheland B.⁵, Colbach N.⁵, Angevin F.¹

¹ Eco-Innov, INRAE, F-78850 Thiverval-Grignon

² Chambre d'Agriculture de l'Eure, CS 80882, F-27008 Evreux

³ Arvalis – Institut du végétal – station de la Jaillièrre, F-44370 La Chapelle Saint Sauveur

⁴ Arvalis – Institut du végétal – station de Boigneville, F-91270 Boigneville

⁵ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon

Correspondance : nicolas.cavan@inrae.fr

Résumé

Trois démarches de conception de systèmes de culture ont été comparées sur leur contribution à la gestion durable des adventices : (i) conception par expertise d'acteurs multiples ; co-conception par des agriculteurs (ii) d'un système innovant lors d'ateliers ponctuel ou (iii) de systèmes innovants pour chaque agriculteur d'un groupe sur une démarche de long terme. Les systèmes définis ont été simulés avec le modèle de dynamique de la flore adventice FLORSYS. Une Analyse en Composantes Principales des résultats de six indicateurs décrivant la nuisibilité des adventices pour la production, la diversité des adventices et l'intensité d'usage d'herbicides a été réalisée. Tout d'abord, la nuisibilité des adventices et l'usage d'herbicides ne sont pas corrélés. Ensuite, les systèmes innovants conçus selon la méthode (i) conduisent à des changements plus importants et contrastés, à l'inverse de la co-conception par des agriculteurs, particulièrement avec des systèmes conçus pour chaque agriculteur. Enfin, l'évolution de la durabilité a été évaluée avec le modèle d'évaluation multicritère DEXiPM. La durabilité évolue plus fréquemment, de manière positive pour les méthodes de conception (i) et (ii). Néanmoins, les seuls systèmes innovants combinant réduction significative de la nuisibilité des adventices pour la production et augmentation de la durabilité sont issus du groupe (iii), avec des modifications profondes de la rotation (réduction du blé tendre, abandon de la betterave) envisagées après 10 ans de conception pas-à-pas. Ces résultats illustrent les différences et complémentarités de ces différentes méthodes.

Mots-clés : Conception, Système de culture, Adventices, Herbicides, Pratiques culturales, Durabilité

Abstract : Comparing methods for designing innovative cropping systems aiming at sustainable weed management

Three methods of innovative design for cropping systems were compared for their contribution to sustainable weed management: (i) *de novo* expert design by multiple stakeholders; co-design by farmers (ii) of one cropping system during workshops; (iii) of cropping systems for each farmer member of a DEPHY network group over several years. The weed simulation model FLORSYS was used to evaluate these systems with six indicators, describing weed harmfulness for crop production, weed contribution to biodiversity and herbicide use. A principal component analysis on this dataset illustrated that there is no correlation between herbicide use and weed harmfulness for crop production. *De novo* expert design led to bigger changes in practices and systems performances, compared to co-design with farmers, especially

when innovative systems are designed for each farmer of a group. The evolution of sustainability of these cropping systems was assessed with the multicriteria assessment model DEXiPM and again more changes, often positive, were found with the design methods (i) and (ii). However, only a few innovative cropping systems designed with method (iii) were able to reduce weed harmfulness for production while enhancing sustainability, thanks to major changes planned in crop sequences (winter wheat reduction and sugarbeet removal), after ten years of step-by-step design. These results illustrate differences and complementarities of these design methods.

Keywords: Innovative design, Cropping system, Weed, Herbicides, Cultural practices, Sustainability

1. Introduction

Parmi les organismes ciblés par les pesticides, les adventices sont les plus nuisibles pour les cultures, qu'elles concurrencent pour la lumière, l'eau et les minéraux (Oerke, 2006). Elles constituent également la part majoritaire de la biodiversité floristique dans les paysages agricoles et contribuent à la diversité faunistique (Marshall et al., 2003).

Si l'usage d'herbicides est la méthode curative la plus efficace pour gérer les adventices (Lutman et al., 2013), cette solution est rendue moins fiable par l'augmentation du nombre d'espèces adventices résistantes (Heap, 2014), la diminution du nombre de substances actives autorisées (Chauvel et al., 2012) et les effets documentés de leur usage sur l'environnement et la santé (e.g. Liebman et al., 2016). Réduire l'usage d'herbicides en maintenant ou diminuant la nuisibilité des adventices pour les productions agricoles nécessite de combiner plusieurs leviers, préventifs ou curatifs, qui sont individuellement moins efficaces que les herbicides. Par ailleurs, la prise de décision pour la gestion des adventices dans les systèmes de cultures annuelles se fait en tenant compte de trois échelles de temps : celle de la culture implantée, de la culture suivante et celle du stock semencier présent dans le sol (Macé et al., 2007).

L'objectif d'une gestion plus durable des adventices nécessite donc de réfléchir à de multiples modifications du système de culture pratiqué, avec deux principales méthodes de conception de systèmes de culture innovants : (i) la conception *de novo*, qui vise à se libérer de toutes les contraintes existantes en faisant de la conception sans *a priori* ; (ii) la conception pas-à-pas, plus progressive et vue comme plus conservatrice, mais avec une mise en œuvre plus simple que la première méthode (Meynard et al., 2012). L'implication des agriculteurs dans la conception peut également varier, depuis la fourniture de connaissances initiales et d'un retour final jusqu'à une conception selon leurs objectifs, réalisée par eux-mêmes (Lacombe et al., 2018).

Dans cette étude, nous comparons les contributions de plusieurs méthodes de conception de systèmes de culture innovants à une gestion plus durable des adventices et nous identifions les éléments techniques contribuant à cette gestion plus durable. Par ailleurs, l'adoption de nouvelles pratiques pour la gestion durable des adventices peut se traduire par des effets délétères pour d'autres composantes de la durabilité des systèmes de culture, ce qui a été identifié comme un des freins importants au développement de ces leviers (Bastiaans et al., 2008). L'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture proposés est donc nécessaire.

Trois démarches de conception ont été comparées ici : (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 lors d'ateliers demandés par ces agriculteurs ; (iii) co-conception d'un système innovant pour le système de chaque agriculteur présent dans un groupe DEPHY Ferme, sur une période de dix ans pour les plus anciens membres du groupe.

Même si les essais longue durée ont été mis en place et que les agriculteurs commencent à changer leurs pratiques selon les derniers systèmes innovants envisagés, il faudra plusieurs années avant d'en

constater les effets. Les systèmes de culture ont donc été évalués *ex ante* en utilisant le modèle de simulation de dynamique de la flore adventice FlorSys (Gardarin et al., 2012 ; Munier-Jolain et al., 2013 ; Colbach et al., 2014 ; Munier-Jolain et al., 2014 ; Mézière et al., 2015) pour la gestion durable des adventices et le modèle d'évaluation multicritère DEXiPM®, conçu pour l'évaluation de la durabilité de systèmes en grande culture dans un contexte de réduction de l'usage des pesticides (Pelzer et al., 2012).

2. Matériel et méthodes

2.1 Description des trois méthodes de conception de systèmes de culture innovants

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

(i) **Les systèmes innovants du projet Syppre¹** : 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 (Toqué et al., 2015). Dans la suite de l'étude, ces systèmes seront numérotés de 1 à 4, respectivement pour les plateformes situées dans le Berry, en Champagne, dans le Lauragais et en Picardie. Cinq systèmes innovants ont été définis pour la plateforme du Béarn (numérotés de 5 à 9).

(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 (Queyrel et al., in prep ; Van Inghelandt, 2018). Deux ateliers avec deux sous-groupes d'agriculteurs différents ont été animés et ont conduit à la définition d'un système de culture innovant plus une variante chacun (numérotés de 10 à 13 par la suite).

(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 et jusqu'à dix ans pour les plus anciens participants). 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 (Cavan et al., 2019). Les trajectoires d'évolution provenant de ce groupe seront numérotées de 14 à 30 par la suite.

Au total, les trois méthodes de conception ont abouti à 29 systèmes de culture innovants (plus les 19 systèmes de culture initiaux).

2.2 Évaluation des performances des systèmes de culture pour la gestion des adventices avec le modèle FLORSYS

Ces systèmes de culture ont 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. Chaque système de culture a été simulé pendant 30 ans, avec dix répétitions climatiques. Six indicateurs tirés de ces simulations ont été utilisés : (1) l'équitabilité de la flore adventice (Indice de Piélou), (2) l'offre trophique pour les abeilles, bourdons, syrphes, papillons, carabes et oiseaux, (3) 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, (4) 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 (5) le risque de non-maîtrise à moyen terme (« dérive ») – cf. Cavan et al.

¹ <https://syppre.fr/>

(2019) 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 (SCInitial) et innovant (SCInnovant), caractérisées pour chaque indicateur I par la différence $d = ISCInnovant - ISCInitial$. A partir des 48 systèmes de culture simulés (dont 29 systèmes innovants), 30 évolutions de systèmes ont pu être identifiées (un des systèmes innovants ayant été conçu pour remplacer deux systèmes de culture actuellement pratiqués par un agriculteur).

Devant le nombre élevé d'indicateurs de performance et de descripteurs de systèmes de culture et relativement faible d'individus (30), 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 culturales entre les classes identifiées par la CAH.

2.3 Évaluation multicritère de l'évolution de la durabilité de ces systèmes de culture avec le modèle DEXiPM.

DEXiPM® est un modèle créé pour réaliser une évaluation multicritère de systèmes de culture, en particulier dans le cas d'une réduction de l'usage des pesticides (Pelzer et al., 2012). Ce modèle a été initialement développé pour évaluer les systèmes *ex ante*, en se basant sur la description des pratiques culturales.

Les pratiques culturales décrites permettent d'évaluer des critères (notes qualitatives, allant de 1 (Très faible) à 5 (Très élevé)). Ces critères sont ensuite agrégés selon plusieurs étapes et cette agrégation permet d'aboutir à une évaluation de la durabilité des systèmes pour les trois piliers de la durabilité : économique, social et environnemental.

Lorsque des indicateurs autres que la description des pratiques sont disponibles, il est possible d'intégrer ces résultats pour faire l'évaluation. Cela a notamment été le cas pour des indicateurs économiques (provenant de Systerre®² pour les systèmes du projet Syppre) et environnementaux (contribution des systèmes de culture à la qualité de l'air et de l'eau avec la méthode INDIGO - Bockstaller et Girardin, 2007) en remplacement de la simple description des pratiques culturales, lorsque cela était possible.

De la même façon que pour la performance des systèmes pour la gestion durable des adventices, c'est l'évolution de la durabilité entre le système initial et le système innovant qui est évaluée, grâce à la différence (d) entre la classe d'un critère pour le système innovant ($C_{SCInnovant}$) et celle du même critère pour le système initial ($C_{SCInitial}$) : $d = C_{SCInnovant} - C_{SCInitial}$.

Les analyses de l'évolution de la durabilité n'ont été réalisées que sur 28 trajectoires d'évolution (les deux variantes des systèmes innovants issus des ateliers de co-conception collective n'ont pas été évaluées).

² Systerre® est un système d'information permettant la collecte des pratiques agricoles et de caractéristiques des exploitations, permettant en cela le calcul d'indicateurs variés.

3. Résultats

3.1 Évolution des performances pour la gestion durable des adventices

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 ») sont fortement corrélées entre elles et corrélées à l'offre trophique pour les pollinisateurs, carabes et oiseaux. Les systèmes de culture innovants qui favorisent 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 (Piélou), d'autre part.

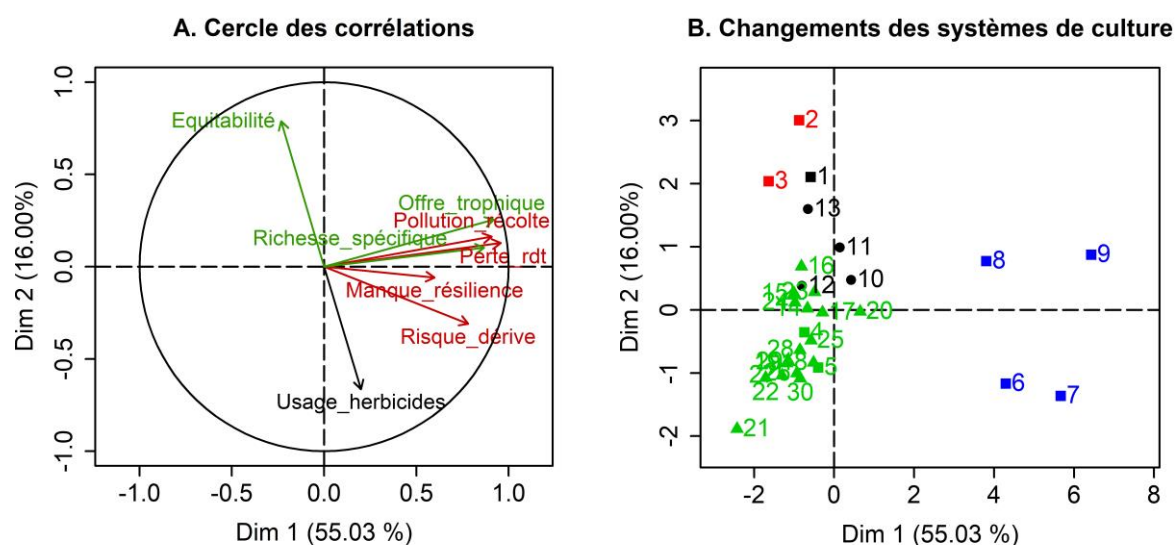


Figure 1 : Performance en termes de gestion d'adventices des systèmes de culture innovants comparée au système initial. Analyse en Composantes Principales des variations des valeurs d'indicateurs des systèmes de culture comparées au système initial dans chaque situation de production. **A.** Compromis 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 formes représentent les différentes méthodes de conception : les systèmes innovants du projet Syppre (carrés), ceux issus d'ateliers de co-conception collective (ronds) et ceux provenant du groupe DEPHY Ferme de l'Eure (triangles).

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 terme 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 30) 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** (noir) regroupe les systèmes co-conçus collectivement par des agriculteurs (ii), ainsi que le système innovant de la plateforme Syppre Berry (individu 1) ainsi qu'un système innovant du Béarn (individu 5). 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) et par 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 2** (rouge) regroupe les systèmes des plateformes Syppre du Lauragais et de Champagne (individus 2 et 3), caractérisés 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 face à des pics de pression adventice augmente.

La **classe 3** (vert) contient les systèmes du groupe DEPHY Ferme (iii), ainsi que le système innovant de la plateforme Syppre de Picardie. 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 causée par la nuisibilité des adventices.

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).

3.2 Évolution de la durabilité des systèmes de culture

Les trajectoires étudiées conduisent à des changements au niveau de la durabilité économique, sociale et environnementale des systèmes de culture. Ils sont présentés dans le Tableau 1. La durabilité des systèmes de culture reste stable pour 17 trajectoires d'évolution de systèmes de culture (Tableau 1). C'est principalement le cas pour les systèmes en monoculture de maïs du projet Syppre et 11 des 17 trajectoires proposées dans le groupe DEPHY Ferme de l'Eure.

Dans la **classe 1**, qui était caractérisée par une réduction de l'usage des herbicides plus importante que pour le reste des trajectoires, la durabilité ainsi que ses composantes économique et environnementale s'améliorent pour toutes les trajectoires envisagées. Cela s'explique par une amélioration de la marge nette et de la viabilité économique de l'exploitation, ainsi que par une meilleure qualité de l'environnement et contribution à la biodiversité.

La **classe 2** est caractérisée par des trajectoires incluant la plus forte diversification des cultures, avec une augmentation de la résilience des systèmes innovants face à la pression des adventices. Dans le cas de la Champagne (n°2), la diminution du nombre d'application d'herbicides permet de diminuer les risques pour la santé de l'agriculteur. Pour la trajectoire du Lauragais (n°3), la durabilité du point de vue de l'agriculteur diminue en raison de la forte complexification du système de culture. En revanche, la qualité de l'environnement et la contribution à la biodiversité augmentent.

La **classe 3** regroupe les trajectoires d'évolution des systèmes de culture des agriculteurs du groupe DEPHY Ferme, ainsi que deux trajectoires conçues dans le projet Syppre. De la même façon que l'évolution des performances pour la gestion des adventices était plus faible, les évolutions de la durabilité le sont également, avec 12 trajectoires sans changement de la durabilité. Plus en détails, les quatre trajectoires permettant d'améliorer cette durabilité grâce à des améliorations d'au moins deux composantes sur trois (économique et environnementale) reposent sur la réduction de la part de blé tendre dans la rotation (qui représente 50 % de l'assolement dans les systèmes initiaux) et l'abandon de la betterave pour les trajectoires 21 et 22.

Tableau 1 : Évolution de la durabilité pour les trajectoires des systèmes Syppre en monoculture de maïs (M), des autres trajectoires Syppre (S) des agriculteurs du réseau DEPHY Ferme (A) ou co-conçu dans le cadre d'ateliers avec des agriculteurs (A c). L'évolution de la durabilité est présentée avec ses composantes économique (Eco.), sociale et environnementale (Env.). Les trajectoires sont regroupées en fonction des classes déterminées par l'ACP sur l'évolution de la gestion des adventices (cf. partie 3.1), avec l'évolution de l'indicateur de pertes de rendement présentée en détail (les diminutions significatives en sont en vert, les augmentations significatives, en orange). La dernière colonne présente les principaux changements au sein de chaque dimension de la durabilité (MN : marge nette ; V : Viabilité économique ; F : Durabilité sociale du point de vue de l'agriculteur ; S : Interactions avec la société ; CP : Chaîne de production ; QE : Qualité de l'environnement ; B : Contribution à la biodiversité).

Gestion des adventices Classe (3.1)	Trajectoire	Méthode conception	Evolution des pertes rendement	Evolution de la durabilité				Principaux changements
				Globale	Eco.	Social	Env.	
1	1	S	1,4	1	1		2	MN + V ; QE
1	10	A c	1,8	1	1		1	V ; QE + B
1	11	A c	2,0					
1	12	A c	0,8	2	1		1	MN ; QE + B
1	13	A c	2,0					
2	2	S	-0,5			1		F + S
2	3	S	0,4	1		-1	2	F ; QE + B
3	4	S	0,7			1		F ; QE
3	5	S	2,5	-1		-1		F
3	14	A	0,3					
3	15	A	0,2		1			MN
3	16	A	0,1		1			MN
3	17	A	1,4					
3	18	A	-0,2					
3	19	A	-1,1					
3	20	A	1,5			-1		CP
3	21	A	-3,8	1	1	1	1	MN ; F + S ; QE + B
3	22	A	-1,7	1	1	1		MN ; F + S
3	23	A	0,3					
3	24	A	-0,2					
3	25	A	0,3			1		S
3	26	A	-2,1	-1			-1	QE
3	27	A	-1,2	-1			-1	QE + B
3	28	A	-0,1					
3	29	A	-0,5	2	1		1	MN + V ; QE
3	30	A	0,2	2	1		1	MN + V ; QE
4	6	M	7,6			-1	1	F ; B
4	7	M	8,5			-1	1	F ; B
4	8	M	7,3			-1	1	F ; B
4	9	M	9,2			-1	1	F ; B

Enfin, dans la **classe 4**, qui regroupe les trajectoires Syppre contenant des systèmes de culture en monoculture de maïs, la durabilité ne change pas, car l'amélioration de la contribution à la biodiversité des systèmes innovants est compensée par une augmentation de la complexité de ces systèmes de culture, qui passent d'un labour annuel à une gestion basée sur les couverts végétaux, avec un usage d'herbicides en fractionné.

4. Discussion

4.1 Apports d'une nouvelle méthode d'évaluation de systèmes de culture innovants

L'utilisation de FLORSYS a permis d'évaluer les effets sur la gestion des adventices de plusieurs leviers combinés, ce qui est nécessaire pour l'adoption de ce type de pratiques (Bastiaans et al., 2008). La durée de simulation (30 ans) et la définition d'un nouvel indicateur, la résilience du système de culture face à des pics de pression des adventices, ont rendu possible l'identification de systèmes innovants prometteurs qui ne l'auraient pas été avec une moyenne d'indicateurs de nuisibilité annuels. En outre, elles procurent une visibilité à plusieurs échelles de temps, impliquées dans le raisonnement de la gestion des adventices (Macé et al., 2007). L'évaluation de la durabilité de ces mêmes systèmes de culture avec DEXiPM® a été facilitée par l'utilisation d'indicateurs économiques déjà calculés par le système d'information Systerre®, dans lequel étaient décrits les systèmes de culture du projet Syppre. Cette démarche permet de rendre plus précise et sensible cette évaluation par DEXiPM® en déterminant directement certains critères agrégés de DEXiPM® à partir de ces indicateurs (Carpani et al., 2012).

Enfin, s'il existe des publications présentant des typologies de méthodes de conception et leurs caractéristiques, l'évaluation de systèmes innovants en utilisant les mêmes outils d'évaluation est peu fréquente et autorise d'autant mieux la comparaison de ces méthodes.

4.2 Cohérences des résultats avec les données et études existantes

Les évaluations de systèmes réalisées *ex ante* grâce à des modèles mécanistes sont dépendantes de la qualité des modèles de ces derniers. FLORSYS a été évalué à partir de comparaisons entre données simulées et données mesurées au champ (Colbach et al., 2016 ; Pointurier et al., 2020). La version actuelle de FLORSYS prédit de manière satisfaisante la banque de graines d'adventices, les densités des adventices ainsi que les biomasses et rendements des cultures, à des échelles quotidiennes et pluriannuelles. Pour cela, les espèces adventices dominantes sur le terrain doivent faire partie des 30 espèces actuellement paramétrées dans le modèle. Si ce n'est pas le cas, FLORSYS surestime la densité et la biomasse des espèces simulées. Une correction est également nécessaire pour pallier certains processus manquants (dépendance de la photopériode dans la floraison). Les scénarios mal prédits (dynamique des mauvaises herbes dans les champs non travaillés depuis plusieurs années, situations avec stress azoté ou hydrique post-levée) ont été identifiés et sont en cours d'amélioration (Moreau et al., submitted).

Il est aussi possible de comparer les résultats obtenus par simulation à ceux issus d'études expérimentales pour s'assurer de leur cohérence. Enfin, les systèmes innovants du projet Syppre sont en cours d'évaluation dans des essais longue durée, dont les résultats viendront dans les années à venir (Toqué et al., 2015) et aideront à poursuivre ce processus d'amélioration de la qualité du modèle.

L'absence de corrélation entre la nuisibilité des adventices pour la production et l'intensité d'usage des herbicides peut paraître surprenante au premier abord, mais est un résultat assez fréquemment obtenu dans d'autres études basées sur des mesures au champ (Gabriel et al., 2005 ; Petit et al., 2016 ; Quinio et al., 2017) ou des simulations sur des jeux de données plus importants (Colbach et Cordeau, 2018). Cela indique que les agriculteurs adaptent leurs pratiques lorsqu'ils diminuent leur usage d'herbicides. En revanche, la nuisibilité des adventices et leur contribution à la biodiversité sont fortement corrélées, indiquant qu'il est complexe d'atteindre simultanément ces deux objectifs. Des études sur d'autres jeux de données ont montré qu'il était complexe de concevoir des systèmes de culture innovants permettant d'atteindre simultanément un faible usage d'herbicides, une faible nuisibilité des adventices pour la production et une forte contribution de ces dernières à la biodiversité ; il est plus simple d'atteindre deux objectifs sur trois (Colbach et al., 2017 ; Mézière et al., 2015a).

Les plus fortes réductions de la nuisibilité des adventices sont constatées pour des trajectoires caractérisées par la réduction de la part de blé tendre dans la rotation et l'abandon de la betterave. Une analyse sur le réseau DEPHY complet avait identifié les rotations contenant du blé un an sur deux et de la betterave à sucre en moyenne un an sur six comme faisant partie des systèmes pour lesquels la réduction de l'usage d'herbicides serait difficile à atteindre sans perte de rendement ou de profitabilité (Lechenet et al., 2017). A l'autre extrémité, les trajectoires restant en monoculture de maïs, avec abandon du labour et une gestion basée sur le recours à des couverts provoquent une forte augmentation de la nuisibilité des adventices pour la production. Les adventices sont identifiées comme un des freins majeurs à la mise en place du non-travail du sol en agriculture biologique (Peigné et al., 2007). De plus, d'après une méta-analyse de Van den Putte et al. (2010), le rendement du maïs grain diminue significativement lors de la mise en place du non-travail du sol. L'effet est d'autant plus important dans des rotations peu diversifiées, plus favorables à la présence de ravageurs.

L'amélioration de la durabilité environnementale et la diminution de la durabilité sociale, notamment du point de vue de l'agriculteur, sont des résultats cohérents avec une comparaison, réalisée avec DEXiPM®, de systèmes conventionnels et de systèmes innovants en protection intégrée, faisant partie d'un réseau d'essais longue durée européen (Vasileiadis et al., 2017). Un maintien de la durabilité économique est constaté, au mieux, dans cette étude, alors que celle-ci s'améliore dans les systèmes les plus en rupture (conception par expertise et co-conception lors d'ateliers) de notre échantillon. Cela peut être dû à un niveau de rupture supérieur dans notre cas comme à des hypothèses de rendement trop optimistes.

L'obtention de résultats plus contrastés, pour la gestion des adventices et la durabilité pour les systèmes obtenus par conception *de novo* à *direx d'experts* est cohérente avec la présentation de la méthode de conception pas-à-pas, considérée comme plus conservatrice, faite par Meynard et al. (2012). Les améliorations importantes de la durabilité et de la gestion des adventices constatées sur les trajectoires de certains agriculteurs impliqués dans la conception pas-à-pas depuis dix ans sont, quant à elles, cohérentes avec celles observées dans une étude des trajectoires d'évolution de pratiques d'agriculteurs, indiquant qu'une durée de 15 ans a été nécessaire pour atteindre la reconception pour la majorité des agriculteurs enquêtés (Chantre et al., 2015).

4.3 Conseils pour la gestion durable des adventices et la conception de systèmes de culture innovants

Une forte diversification de la succession de cultures peut conduire à une diminution de la nuisibilité des adventices à moyen ou long terme (augmentation de la résilience du système de culture). Cependant, ce levier important ne semble pas suffisant à lui seul s'il y a une forte réduction de l'usage d'herbicides associée à celle du recours à d'autres leviers existants (comme le labour et le travail du sol, de façon plus générale).

La conception *de novo* permet *a priori* d'obtenir des systèmes qui sont plus en rupture, mais, dans notre cas, le manque d'association des agriculteurs au processus de conception risque de diminuer l'acceptabilité des systèmes proposés (Lacombe et al., 2018). La complexité du système de culture, qui augmente fortement sur certains de ces systèmes en est une des principales causes identifiées dans cette étude, avec la création de pics de travail trop importants et/ou trop fréquents pour l'agriculteur. La question de l'organisation du travail a été également identifiée comme un frein à l'adoption de nouvelles pratiques (Delecourt et al., 2019). Associer plus tôt les agriculteurs -et de manière plus systématique- à ces démarches de conception, ainsi que la création de références sur le temps et l'organisation du travail dans les systèmes innovants, apparaissent ainsi comme des priorités.

A l'inverse, la conception pas-à-pas, assez conservatrice, peut conduire à des changements importants dans la durée. L'apport de connaissances nouvelles, via une démarche d'évaluation des systèmes co-

conçus lors d'animations régulières, peut faciliter ce processus. Enfin, l'évaluation *in silico*, même si elle repose sur la qualité des modèles utilisés permet d'étudier plus de pistes d'évolution de systèmes de culture ou des pistes plus en rupture. Lorsque des agriculteurs sollicitent des chercheurs afin de mener une démarche de co-conception, comme c'est le cas pour le deuxième groupe ici, il semble important de maintenir un lien dans la durée et de réaliser plusieurs cycles de conception – évaluation.

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.

Les systèmes conçus *de novo* par expertise multi-acteurs conduisent à des changements de pratiques et des évolutions de la performance de gestion des adventices plus marqués que ceux des systèmes issus de la co-conception par des agriculteurs. En revanche, la durabilité du point de vue de l'agriculteur, des systèmes conçus diminue plus fréquemment avec cette première méthode de conception. Par ailleurs, les systèmes innovants conduisant simultanément à une réduction de la nuisibilité des adventices et une augmentation de la durabilité sont ceux conçus par des agriculteurs, dans une approche pas-à-pas qui envisagent, après dix ans de réflexion sur la réduction de l'usage de pesticides, de profonds changements dans leur rotation.

La diversification des cultures semble être ainsi un levier important, mais pas suffisant, pour atteindre une gestion des adventices plus durable en limitant les trade-offs potentiels. Dans certains cas, la nuisibilité moyenne annuelle des adventices n'est pas significativement réduite par cette diversification, mais elle contribue à l'augmentation de la résilience du système de culture face à des pics de pression adventice.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec le soutien financier de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) dans le cadre du Programme national 2014 « Sécurité alimentaire et défi démographique », axe « productions durables », projet " ANR-15-CE18-0007, COSAC ". Les auteurs remercient les participants des groupes de conception.

Références bibliographiques

- Bastiaans L., Paolini R., Baumann D.T., 2008. Focus on ecological weed management: what is hindering adoption? *Weed Res.* 48, 481–491.
- Bockstaller C., Girardin P., 2007. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO (Guide). Nancy.
- Carpani M., Bergez J.-E., Monod H., 2012. Sensitivity analysis of a hierarchical qualitative model for sustainability assessment of cropping systems. *Environ. Model. Softw.* 27–28, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.10.002>
- Chantre E., Cerf M., Le Bail M., 2015. Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms. *Int. J. Agric. Sustain.* 13, 69–86. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.945316>
- Chauvel B., Guillemin J.-P., Gasquez J., Gauvrit C., 2012. History of chemical weeding from 1944 to 2011 in France: Changes and evolution of herbicide molecules. *Crop Prot.* 42, 320–326. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.07.011>
- 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. *Environ. Model. Softw.* 86, 184–203. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.020>

- 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. *Eur. J. Agron.* 87, 59–73. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.04.005>
- Colbach N., Collard A., Guyot S.H.M., Mézière D., Munier-Jolain N.M., 2014. Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *Eur. J. Agron.* 53, 74–89. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.019>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.008>
- Delecourt E., Joannon A., Meynard J.-M., 2019. Work-related information needed by farmers for changing to sustainable cropping practices. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 28. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0571-5>
- Gardarin A., Dürr C., Colbach N., 2012. Modelling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. *Ecol. Model.* 240, 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004>
- Heap I., 2014. Global perspective of herbicide-resistant weeds. *Pest Manag. Sci.* 70, 1306–1315. <https://doi.org/10.1002/ps.3696>
- Lacombe C., Couix N., Hazard L., 2018. Designing agroecological farming systems with farmers: A review. *Agric. Syst.* 165, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.014>
- Lechenet M., Dessaint F., Py G., Makowski D., Munier-Jolain N.M., 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nat. Plants* 3, 17008. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8>
- Liebman M., Baraibar B., Buckley Y., Childs D., Christensen S., Cousens R., Eizenberg H., Heijting S., Loddo D., Merotto A., Renton M., Riemens M., 2016. Ecologically sustainable weed management: How do we get from proof-of-concept to adoption? *Ecol. Appl.* 26, 1352–1369. <https://doi.org/10.1002/15-0995>
- Lutman P.J.W., Moss S.R., Cook S., Welham S.J., 2013. A review of the effects of crop agronomy on the management of *Alopecurus myosuroides*. *Weed Res.* 53, 299–313. <https://doi.org/10.1111/wre.12024>
- Macé K., Morlon P., Munier-Jolain N., Quéré L., 2007. Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. *Agric. Syst.* 93, 115–142. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.04.007>
- Marshall E.J.P., Brown V.K., Boatman N.D., Lutman P.J.W., Squire G.R., Ward L.K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields*. *Weed Res.* 43, 77–89. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x>
- Meynard J.-M., Dedieu B., Bos B., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices, in: *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. pp. 405–429.
- Mézière D., Colbach N., Dessaint F., Granger S., 2015a. Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators. *Eur. J. Agron.* 68, 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.04.004>
- Mézière D., Petit S., Granger S., Biju-Duval L., Colbach N., 2015b. Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecol. Indic.* 48, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.028>
- Moreau D., Pointurier O., Perthame L., Beaudoin N., Villerd J., Colbach N., submitted. Integrating plant-plant competition for nitrogen into a 3D individual-based model simulating the effects of cropping systems on weed dynamics. *Field Crops Research*.
- Munier-Jolain N.M., Collard A., Busset H., Guyot S.H.M., Colbach N., 2014. Investigating and modelling the morphological plasticity of weeds. *Field Crops Res.* 155, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.018>

Munier-Jolain N.M., Guyot S.H.M., Colbach N., 2013. A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies: Model structure and evaluation. *Ecol. Model.* 250, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.023>

Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* 144, 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>

Peigné J., Ball B.C., Roger-Estrade J., David C., 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use Manag.* 23, 129–144. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00082.x>

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. *Ecol. Indic.* 18, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.019>

Pointurier O., Moreau D., Pagès L., Caneill J., Colbach N., 2020. Individual-based 3D modelling of root systems in heterogeneous plant canopies at the multiannual scale. Case study with a weed dynamics model. *Ecol. Modelling.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109376>

Toqué C., Cadoux S., Pierson P., Duval R., de Cordoue A.L., Flénet 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. In: 5th International Symposium for farming systems design, Montpellier, France. <http://www.fagro.edu.uy/fsd/agro2015/documents/proceedings.pdf>

Van den Putte A., Govers G., Diels J., Gillijns K., Demuzere M., 2010. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *Eur. J. Agron.* 33, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.05.008>

Vasileiadis V.P., Dachbrodt-Saaydeh S., Kudsk P., Colnenne-David C., Leprince F., Holb I.J., Kierzek R., Furlan L., Loddo D., Melander B., Jørgensen L.N., Newton A.C., Toque C., van Dijk W., Lefebvre M., Benezit M., Sattin M., 2017. Sustainability of European winter wheat- and maize-based cropping systems: Economic, environmental and social ex-post assessment of conventional and IPM-based systems. *Crop Prot.* 97, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.002>

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



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

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