Innovations Agronomiques 81 (2020), 173-187

Combiner expertise, expérimentation et simulation pour une gestion durable des adventices : les plateformes prospectives Syppre

Toqué C.[1], Angevin F.[2], Aliaga C.[1], Cadoux S.[3], Cavan N.[2], De Cordoue A.-L.[1], Dubois S.[1], Tauvel P.[4], Jouy L.[1], Sauzet G.[3], Tailleur A.[1]

[1] ARVALIS Institut du végétal, F-91720 Boigneville

[2] Eco-Innov, INRAE, F-78850 Thiverval-Grignon

[3] Terres Inovia, F-78850 Thiverval-Grignon

[4] Institut Technique de la Betterave, F-75008 Paris

Correspondance : C.TOQUE@arvalis.fr

Résumé

L'action Syppre 'construire ensemble les systèmes de culture de demain' (ARVALIS, ITB, Terres Inovia) a pour objectif d'accompagner la mise au point de systèmes de grande culture innovants répondant à un objectif de triple performance : économique, environnementale et sociale. Pour le volet « expérimentation » de l'action, plusieurs évaluations *ex ante* des systèmes de culture ont été réalisées en amont du test terrain, mobilisant une gamme restreinte d'outils adaptés à chaque étape – SYSTERRE®, AMG et OdERA. Dans le cadre de l'ANR CoSAC, une nouvelle méthode d'évaluation a été mise au point – DEXiPM®-Syppre, permettant d'accompagner la mise au point des systèmes en cours d'essai. Des liens ont été créés entre DEXiPM®, modèle issu du projet européen Pure, l'outil SYSTERRE® et le modèle FLORSYS pour les indicateurs relatifs aux adventices. L'article montre l'intérêt de mobiliser l'évaluation *ex ante* en expérimentation pour une vision multicritère des systèmes de culture étudiés. Il illustre l'avantage de croiser plusieurs outils et modèles dont le choix dépend du degré de maturité des essais et des critères de durabilité à renforcer.

Mots-clés : Adventices, Système de culture innovant, Evaluation *ex ante*, Multicritère, Performance, Durabilité

Abstract : Combining expertise, experimentation and simulations for sustainable weed management: the SYPPRE platforms

The Syppre action (ARVALIS, ITB, Terres Inovia) aims to support the development of innovative cropping systems that meet a triple performance objective: economic, environmental and social. For the "experimentation" component of the action, several *ex ante* evaluations of cropping systems have been carried out, using tools adapted to each stage. Within the framework of the ANR CoSAC, a new evaluation method has been developed based on the DEXiPM® model, to support the development of the systems being tested. Links have been created between this model from the Pure project and the SYSTERRE® and FLORSYS tools for weed indicators. The article shows the interest of mobilizing *ex ante* evaluation in experimentation for a multi-criteria vision of the cropping systems studied. It highlights the interest of cross-referencing several tools and models whose choice depends on the degree of maturity of the trials and the sustainability criteria to be reinforced.

Keywords: Weeds, Innovative cropping system, Multicriteria, Performance, Sustainability

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 l'action Syppre en 2014. Syppre est structuré en trois volets techniques – Observatoires, Plateformes expérimentales, Réseaux d'agriculteurs - qui sont complémentaires dans la démarche d'accompagnement de l'évolution des systèmes, en privilégiant le retour d'expérience par les réseaux, l'établissement de connaissances par les plateformes, et la connaissance et le suivi des exploitations réelles par les observatoires. L'ensemble des volets a vocation à être mis en œuvre dans les cinq projets régionaux dans lesquelles Syppre est déployé : Picardie, Champagne, Berry, Lauragais, Béarn.

Les plateformes accueillent des expérimentations « système de culture » qui visent à mettre au point des systèmes de culture innovants répondant à la fois aux enjeux nationaux ciblés par Syppre, tout en répondant aux problématiques identifiées régionalement. Les résultats et les expériences acquises permettent à la fois d'améliorer les connaissances agronomiques systémiques mais aussi d'identifier des solutions multi-leviers prometteuses pour améliorer la performance des systèmes locaux, sources d'inspiration pour les producteurs et leurs conseillers. Le caractère opérationnel des solutions qui seront identifiées exige qu'elles soient suffisamment éprouvées, mais aussi qu'elles soient acceptables par les agriculteurs et par les filières.

La pertinence et l'intérêt des connaissances produites sur les plateformes dépendent de la bonne connaissance du contexte pédoclimatique de la région de production ciblée, de la capacité à capter les spécifiés de l'environnement socio-économique et de l'identification des critères de performance pour lesquels les systèmes de production sont à améliorer. Les méthodes de travail mises en œuvre dans le cadre de Syppre ont été réfléchies avec cette ambition. L'évaluation *ex ante* des performances des systèmes de culture est une des méthodes mobilisées, au lancement des essais lors de la conception des systèmes d'abord, puis au cours de l'expérimentation pour accompagner les ajustements des pratiques ou des systèmes en compléments des observations de terrain.

L'article propose de décrire le travail et les méthodes de conception et d'évaluation mobilisées, inspirées, entre autres, des travaux du RMT Systèmes de culture innovants et du GIS GC-HP2E, pour construire les systèmes innovants expérimentés actuellement sur les plateformes en intégrant l'objectif de réduction de la pression des adventices et de l'usage des solutions chimiques de lutte herbicides. La gestion durable des adventices est une question commune aux cinq régions dans lesquelles l'action Syppre est déployée.

Les résultats des ateliers de conception et l'analyse de la durabilité globale des systèmes implantés dans le Berry seront présentés et nous discuterons de l'intérêt de cette approche d'évaluation *ex ante* en deux temps dans une dynamique de conception-expérimentation.

1. Matériel et méthodes

1.1 Les plateformes expérimentales pour faire émerger des solutions innovantes

De nouvelles plateformes expérimentales ont été mises en place par les instituts partenaires dans chacune des cinq situations de production où Syppre est décliné (www.syppre.fr). Elles ont pour vocation d'accueillir des expérimentations « système de culture » en mettant à l'épreuve du terrain deux modalités :

- Un système local dominant : système de culture majoritairement pratiqué sur la zone de production ; il est piloté selon les bonnes pratiques recommandées localement par les instituts techniques,

- Un (ou plusieurs dans le cas du Béarn) système innovant, qui répond aux enjeux nationaux visés par l'Action Syppre et aux enjeux définis régionalement.

Les plateformes sont implantées sur des parcelles de cinq à dix hectares. Les premiers travaux ont démarré en 2015. Les expérimentations sont programmées pour une durée d'au moins dix ans. Les premiers résultats valorisables ont été produits à l'issue de la campagne 2016-17, après deux années de préparation des parcelles – culture d'homogénéisation et culture des précédents.

Elles sont conduites dans un principe de rigueur expérimentale conjugué avec un dimensionnement et des conditions de travail proches de celles de l'agriculteur. Pour chaque plateforme, les systèmes de culture témoins et innovants sont dupliqués 2 ou 3 fois, et chaque terme de la rotation est cultivé chaque année. Chaque parcelle unitaire est une répétition climatique de la rotation pratiquée, permettant de s'affranchir de l'impact des conditions climatiques d'une année sur une culture sur les performances du système étudié (Lechenet et al., 2015).

Les plateformes sont un lieu de test pratique et de mise au point des innovations proposées, un lieu d'acquisition de références sur les résultats des innovations et sur leurs effets à moyen-long terme sur les composantes du milieu. Elles sont aussi un lieu d'échanges avec les agriculteurs et les partenaires régionaux.

La réussite du volet « Plateforme » de Syppre à contribuer au développement de nouveaux modes de production dépend i) du niveau de rupture dans lequel les systèmes innovants expérimentés sont projetés, ii) de l'ancrage aux problématiques technico-économiques locales ; iii) de l'implication des acteurs de la R&D locaux dès la conception de ces systèmes.

1.2 Conception des systèmes innovants Syppre en cinq étapes

La démarche de conception-évaluation de Debaeke et al. (2009) a été mise en œuvre en 2014 (Toqué et al., 2015). Elle a permis de construire *de novo* (Meynard et al., 2012 ; Cavan et al., ce numéro) de 5 à 9 prototypes de systèmes de culture répondant aux objectifs nationaux de triple performance visés dans Syppre (productivité, rentabilité, excellence environnementale) et aux enjeux locaux identifiés pour chaque milieu.

Sur chaque plateforme, des comités régionaux ont été mobilisés au cours d'ateliers de co-conception, rassemblant agriculteurs, acteurs de l'aval (ex : coopératives, négoces, industriels) et experts locaux (chercheurs, enseignants, conseillers). Les travaux se sont déroulés selon cinq étapes (Figure 1) :

1. Identification des problèmes locaux sur la base d'une étude prospective et définition du cadre local de conception (=les objectifs à atteindre pour les systèmes de culture),

2. Définition du système de culture le plus représentatif de la région, et de ses limites, sur la base des statistiques régionales et de l'expertise locale,

3. Identification des cultures candidates et des stratégies agronomiques appropriées, sur la base des connaissances générales et de l'expertise locale,

4. Conception de prototype de systèmes de culture innovants, en atelier,

5. Evaluation *ex ante* de chaque système.

Des allers-retours entre les étapes 4 et 5 ont été nécessaires pour ajuster les prototypes. A l'issue de l'étape 5, pour chaque région, le prototype le plus promoteur a été décrit plus finement, puis mis en place sur la plateforme.

Des évaluations *ex ante* ont été mises en œuvre après deux campagnes de test des systèmes au champ, pour affiner le diagnostic de durabilité – entre autres vis-à-vis de la gestion des adventices et identifier les inflexions à donner aux pratiques mises en œuvre.

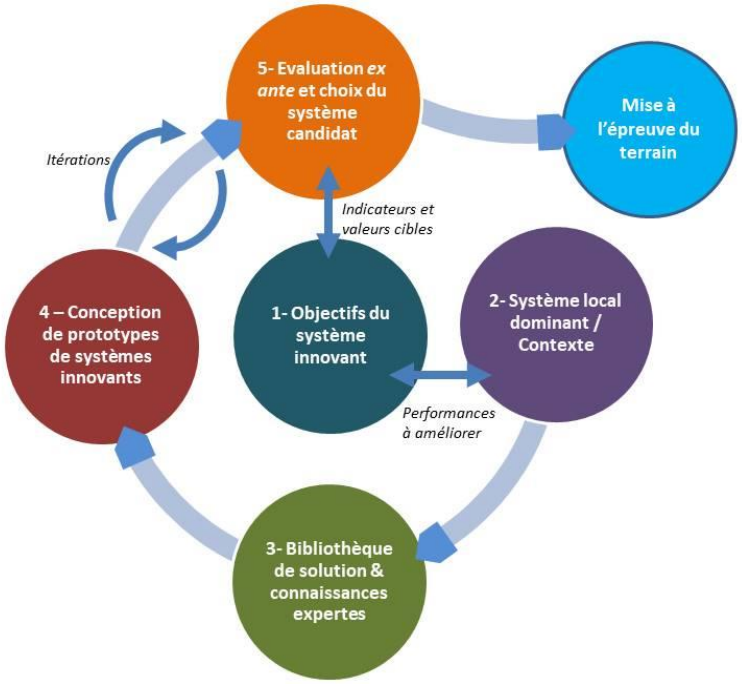


Figure 1 : Démarche de conception – évaluation *ex ante* de prototypes de systèmes de culture innovants. D'après Harvard *et al.* (2017).

1.3 Le cadre d'évaluation de Syppre : enjeux nationaux et locaux à dix ans

Au plan national, l'Action Syppre doit contribuer à l'émergence de systèmes de culture dont les objectifs ont été définis à partir d'une vision prospective de l'agriculture partagée par les trois instituts, à une échéance de dix ans, vis-à-vis des enjeux de productivité, de rentabilité et d'excellence environnementale. Ces objectifs ont été traduits par un panel d'indicateurs et des niveaux à atteindre (Tableau 1).

Tableau 1 : Objectifs visés pour les systèmes de culture dans le cadre de l'Action Syppre pour répondre aux enjeux nationaux de l'agriculture. (* par rapport à la référence régionale 2012).

Enjeux	Indicateurs	Objectifs pour les systèmes innovants /situation initiale
Productivité	Production d'énergie brute exportée (MégaJoules/hectare)	Supérieure ou égale
	Efficience énergétique (MégaJoules/MégaJoule)	Supérieure ou égale
Economie	Marge-directe €/ha	Supérieure ou égale
	EBE/UTH familial	Supérieur ou égale
	Coefficient de variation de la marge directe/ha	Inférieur ou égale
Pratiques et Environnement	Indice de Fréquence de traitement - IFT produit Total	Tendre vers -50 %*
	Quantité d'azote minéral employé (kg d'azote/ha)	Inférieure ou égale à -20 %
	Consommation d'énergie primaire (Mégajoules/ha)	Inférieure ou égale à -20 %
	Emissions GES TeqCO2/Ha	Inférieure ou égale à -20 %
	Stock de matière organique (tonnes/ha)	Supérieur ou égale

Concernant la productivité physique : il s'agit d'améliorer la productivité du système dans son ensemble (produit brut en €, quantité et qualité produites, notamment en termes d'énergie et de protéines), avec l'ambition si possible d'améliorer les rendements des différentes cultures standards (produire plus pour alimenter les filières). Une dégradation de rendement d'une culture est acceptable uniquement si elle s'accompagne d'une amélioration de la durabilité globale du système.

En terme de performance économique, dans Syppre, on vise à améliorer les marges semi-directes à l'hectare et par UTH (Unité de Travail Humain). La performance économique implique que le produit récolté possède une qualité satisfaisant les exigences et les besoins du marché. Des indicateurs de qualité des produits (ex : teneurs en protéines, en sucre, en huile…) sont pris en compte. Les coûts de production des cultures standards, indicateur de compétitivité, doivent être maintenus, voire améliorés.

Enfin, les systèmes de culture sont étudiés pour améliorer leurs performances environnementales, en particulier en réduisant de 10 à 30 % les émissions de gaz à effet et de serre et en améliorant de 20 à 50% leur efficience énergétique. L'augmentation du stock de carbone est également un objectif à atteindre, avec des attentes adaptées aux situations de départ dans les sols.

En complément de cette vision nationale, les comités régionaux ont construit une vision commune des enjeux prioritaires locaux pour l'agriculteur sur le même pas de temps de dix ans. Leur réflexion s'est basée sur le partage d'un bilan des performances de systèmes de production locaux établi à partir de données statistiques et à dire d'expert.

Les problématiques à traiter en priorité dans chacun des projets régionaux Syppre sont rassemblées dans le Tableau 2. Trois thématiques ont été systématiquement abordées, car elles sont spécifiques de l'approche systémique pluriannuelle et elles ont un rôle majeur dans la multiperformance : la fertilité des sols, le bilan carbone et la gestion de la flore adventice.

Tableau 2 : Description des cinq projets Syppre lancés en 2014 (situations de production, des systèmes de référence et des problématiques).

Plateforme	Situation de production	Système de référence	Problématique traitée - résumé
Picardie	Climat océanique dégradé Limons profonds Régime pluvial	Systèmes conventionnels Betteraves/Légumes/Scop Labour	↗ Production – dont Biomasse ↘ Azote minéral (qualité de l'eau, GES) ↗ Fertilité sol (matière organique / battance, érosion ; tassements)
Champagne	Climat océanique dégradé Craie Régime pluvial	Systèmes conventionnels Betteraves/Scop	↗ Production – dont Biomasse ↗ Qualité des productions ↘ Azote minéral (GES) ↗ Fertilité sol (matière organique/ dépendance N, battance, érosion)
Berry	Climat semi-continental dégradé Argilo-calcaires superficiels Régime pluvial	Systèmes conventionnels Scop	↗ Robustesse économique (↘ Intrants) ↗ Fertilité sol (biodisponibilité des éléments minéraux) ↗ Maîtrise adventices
Lauragais	Climat océanique dégradé Argilo-calcaires de coteaux Régime pluvial	Systèmes conventionnels Tournesol/blé dur	↗ Production et Qualité des filières dominantes ↘ Erosion et ↗ Fertilité sol (matière organique) ↘ Intrants (qualité de l'eau, GES)
Béarn	Climat océanique dégradé Argiles humifères Régime pluvial	Systèmes conventionnels Monoculture de maïs	↗ Maîtrise adv. et ravageurs du sol avec ↘ Produits phytosanitaires ↗ Diversité espèces

1.4 Les outils pour évaluer ex ante *lors de la phase de conception des systèmes*

Une première évaluation des prototypes imaginés par les comités régionaux lors de la phase de conception a été réalisée avec SYSTERRE®, selon le panel d'indicateurs et les objectifs établis à l'échelle nationale (Tableau 1). Une boucle d'amélioration a été réalisée avant de sélectionner le prototype le plus prometteur à expérimenter dans chaque plateforme.

À l'aide de l'outil SYSTERRE® (Jouy et al., 2018 ; Weber et al., 2019), et à partir des hypothèses techniques établies en atelier, les performances de productivité, de rentabilité des prototypes ont été évaluées *ex ante*, ainsi que les indicateurs de pratiques et environnementaux.

Dans un second temps, l'usage du modèle AMG (Andriulo et al., 1999) a permis de compléter l'évaluation sur l'indicateur de stock de matière organique. Concernant la gestion des adventices, l'outil OdERA-Systèmes (Pernel et al., 2011) a permis de vérifier que les prototypes choisis pour la mise en œuvre sur le terrain amélioraient ou maintenaient à des niveaux acceptables la pression initiale en adventices observée sur les plateformes expérimentales, selon la classe de notation proposée par l'outil.

1.5 Des outils pour évaluer ex ante *pendant la phase d'expérimentation des systèmes*

Dans le cadre du projet CoSAC, une seconde évaluation *ex ante* de la durabilité des systèmes Syppre a été réalisée, 2 ans après la mise en place sur le terrain. L'objectif était d'améliorer la connaissance des systèmes et de disposer d'informations complémentaires aux résultats observés sur le terrain, pour accompagner les comités régionaux et les pilotes des essais dans le choix des ajustements *in itinere* des pratiques dans un processus de conception pas à pas des systèmes de culture.

Ces évaluations ont été effectuées grâce au modèle DEXiPM® issu du projet européen Pure (Pelzer et al., 2012), modèle multicritère qui divise la durabilité en trois piliers : économique, environnemental et social (Figure 3a), eux-mêmes décomposés en critères plus faciles à renseigner. Initialement conçu pour évaluer *ex ante* des systèmes innovants très en rupture, les données d'entrée sont des pratiques et des éléments de contexte (pédo-climatique mais aussi de prix). Les sorties permettent d'analyser les forces et les faiblesses des systèmes étudiés (Figure 3b).

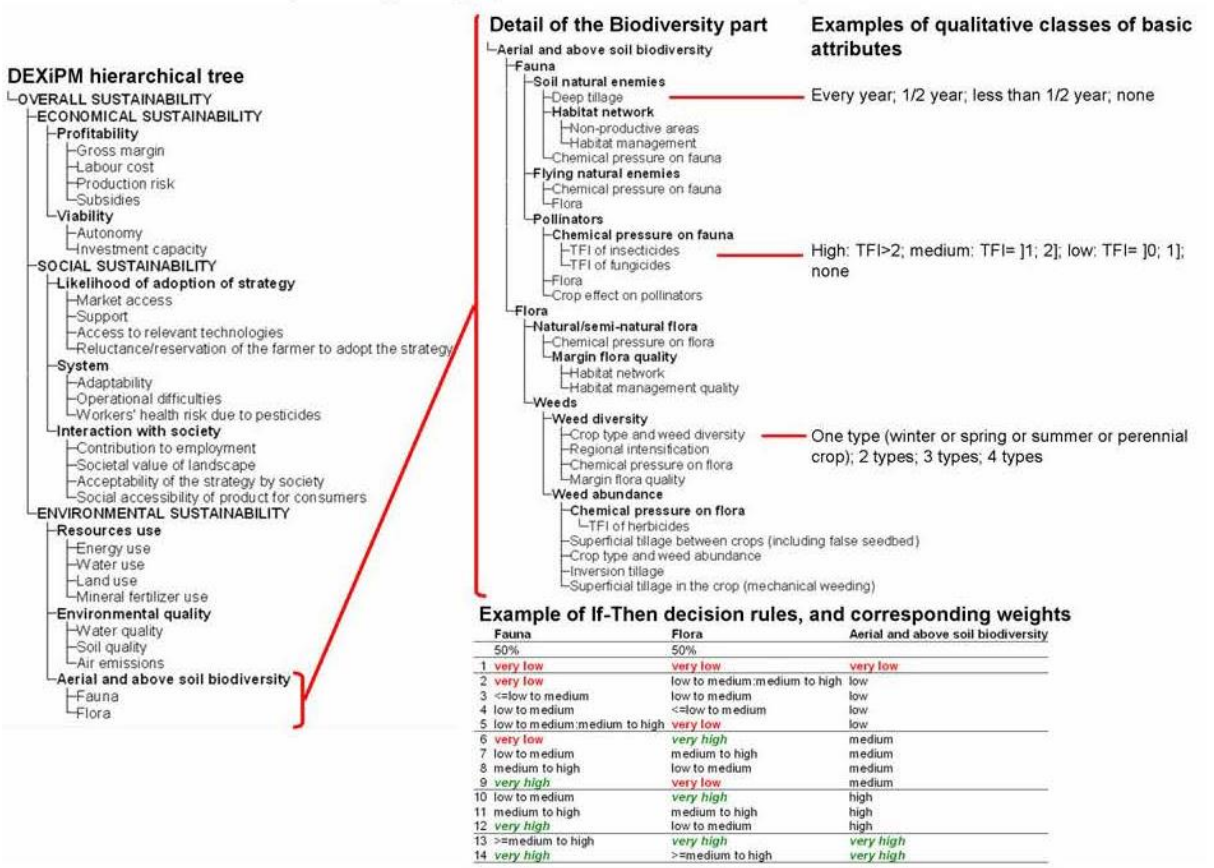


Figure 3a : Arbre hiérarchique de DEXiPM® pour l'évaluation multicritère de systèmes de culture. Détail de la partie biodiversité aérienne, exemple de règle d'agrégation de critères de valeurs qualitatives d'attributs d'entrée. Source : Messéan et al. (2010).

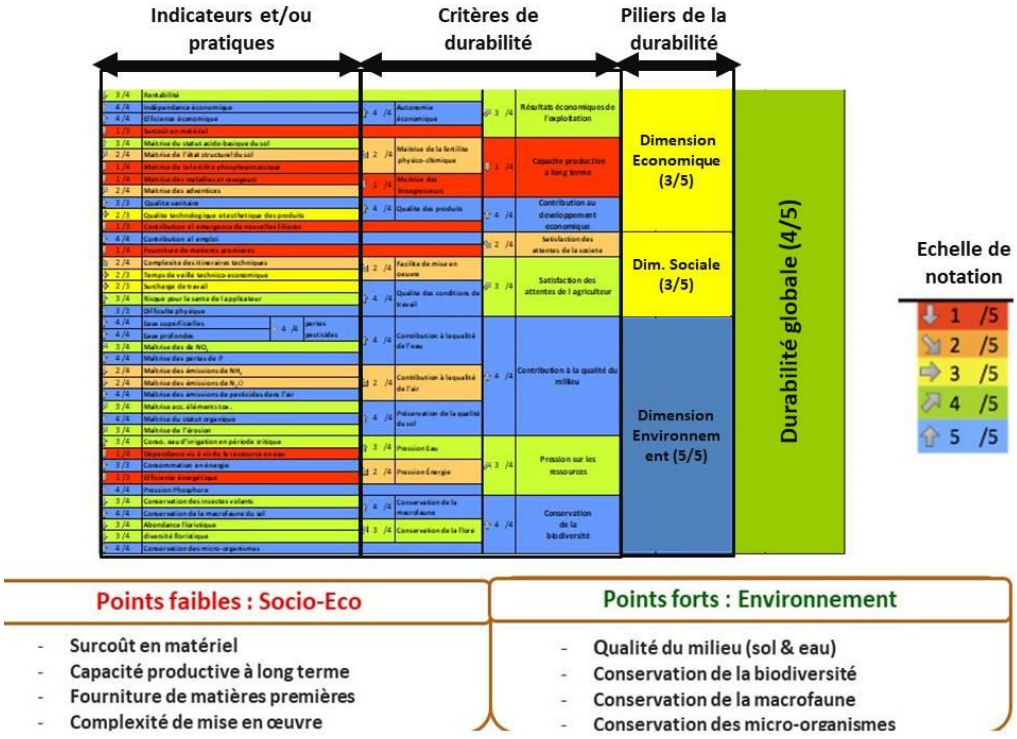


Figure 3b : Exemple de représentation de l'évaluation de la durabilité d'un système de culture avec DEXiPM® : graphique synoptique.

L'intérêt du modèle DEXiPM® est son cadre méthodologique modulable en fonction de la disponibilité des données d'entrée.

Dans le cas présent, l'arbre de décision a été adapté pour enrichir les évaluations réalisées avec SYSTERRE® par des indicateurs environnementaux et sociaux issus entre autres d'INDIGO® (Bockstaller et al., 1997 ; 2008) et de FloSys® (Colbach et al., 2017). Cette démarche, qui a abouti à la production du prototype DEXiPM®-Syppre est présentée en Figure 4. SYSTERRE® alimente le modèle en données d'entrée, s'agissant de l'outil où sont saisis les itinéraires techniques des systèmes Syppre.

Dans cette seconde étape d'évaluation *ex ante*, c'est l'évolution des performances de durabilité entre le système témoin et le système innovant qui est évalué, grâce à la différence entre la classe d'un critère pour le système innovant et celle du même critère pour le système témoin.

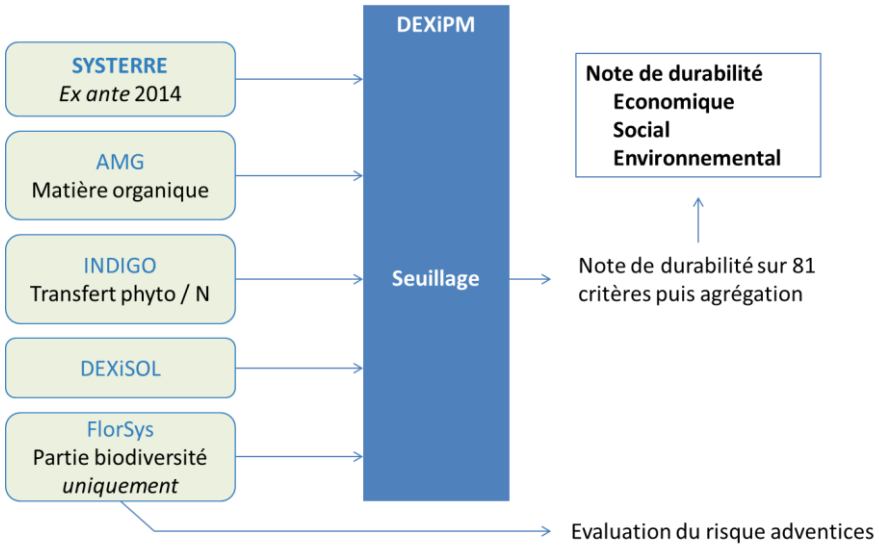


Figure 4 : Démarche utilisée pour conduire l'évaluation multicritère des systèmes Syppre, à partir de DEXiPM®. A gauche : outils utilisés pour alimenter le modèle.

Un rapport méthodologique trace les définitions des critères évalués dans DEXiPM®-Syppre, ainsi que la méthode de calcul des indicateurs et des valeurs seuils (Dubois et al., 2019).

Les systèmes de culture Syppre ont été évalués avec le modèle FLORSYS en vue d'améliorer l'évaluation de l'effet de moyen-long terme des systèmes Syppre sur la flore adventice. Les résultats ont ensuite été intégrés dans le modèle DEXiPM®-Syppre, pour les 5 indicateurs suivants : (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. (2019).

2. Résultats

2.1 Présentation de la situation de production de Syppre Berry

En sols argilo-calcaires du Berry le système local dominant au lancement de Syppre était une rotation triennale en colza/blé /orge d'hiver en non labour, marquée par une perte de productivité et de rentabilité, et des enherbements croissants en particulier en géranium et vulpin (Sauzet et al., 2016).

C'est dans ce contexte que les objectifs spécifiques ont été définis : « permettre aux agriculteurs de réduire l'usage des intrants sans impacter la marge, notamment en améliorant la gestion des adventices et la fertilité du sol, pour gagner en robustesse ».

Des représentants d'Axéréal (coopérative), des Établissements Villemont (négoce), de la Chambre d'Agriculture de l'Indre, d'ARVALIS et Terres Inovia, ainsi que des agriculteurs ont constitué le comité régional (14 personnes au total) qui a conçu le système innovant expérimenté. Ce comité suit l'essai, contribue à l'analyse des résultats campagne après campagne, est force de proposition sur les évolutions à mettre en œuvre dans le pilotage des systèmes.

2.2 Le système innovant co-conçu et mis en expérimentation

Le prototype retenu pour l'expérimentation Syppre Berry est une rotation de 9 ans en non labour (Figure 5). Ce système s'appuie notamment sur les leviers agro-écologiques et technologiques :

- L'allongement et la diversification des cultures de la rotation,
- L'introduction de légumineuses en culture principale, en culture associée et en interculture pour apporter de l'azote au système,
- La couverture quasiment permanente en lien avec une simplification du travail du sol,
- L'introduction de cultures de printemps à faible exigence en intrants (soja, sorgho, tournesol),
- L'introduction de séquences culturales permettant de produire trois cultures en deux ans,
- L'introduction d'une culture à forte valeur ajoutée (lentille),
- L'enchaînement de deux cultures de printemps pour réduire la pression des adventices d'hiver,
- L'introduction du maïs pour réduire le salissement, avec une implantation par strip-till pour préserver la qualité du sol,
- La mise en œuvre d'outils de pilotage des interventions pour chaque culture de la rotation,
- La mise en œuvre des bonnes pratiques pour maximiser l'efficience des interventions.

La réduction du travail du sol, voire le non travail, ainsi que la réussite des couverts en interculture ont été considérés comme des leviers importants pour atteindre les objectifs.

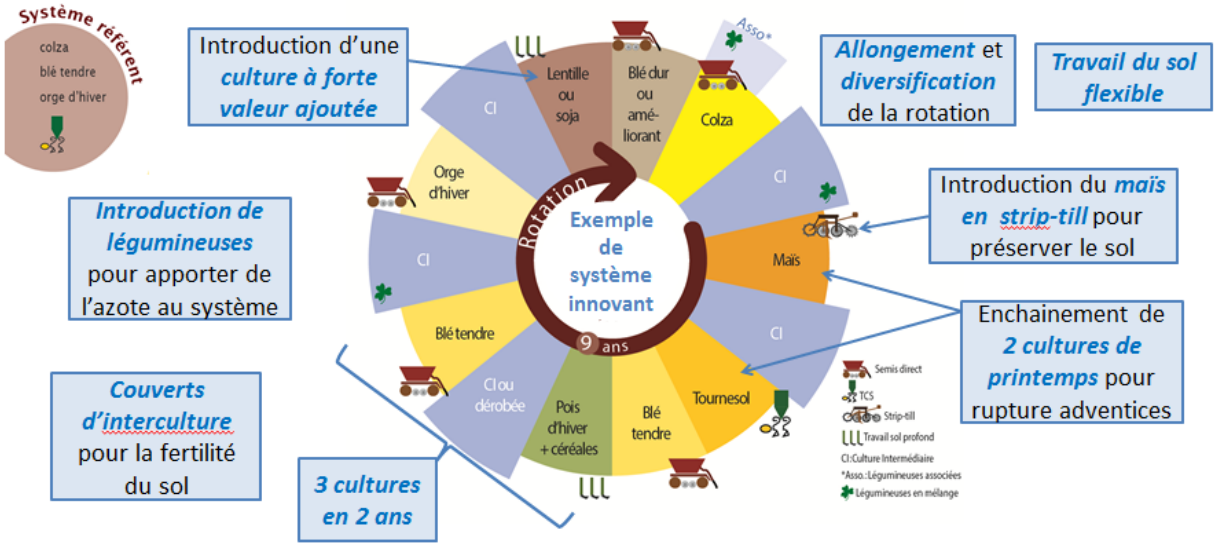


Figure 5 : Systèmes de cultures étudiés dans Syppre Berry : Le système témoin (système local dominant observé en 2016, avec optimisation des pratiques – en marron en haut à gauche) et le système innovant issu de la démarche de co-conception (rotation de 9 ans en non labour – rosace au cœur de la figure).

La plateforme expérimentale du projet Syppre dans le Berry s'étend sur 9 ha sur une parcelle argilo-calcaire de Villedieu-sur-Indre (18), caractéristique en termes de type de sol et de flore. Le dispositif compte 12 modalités, avec 3 répétitions pour chaque terme de la rotation, pour chacun des deux systèmes, soit 36 parcelles. Les systèmes ont été implantés en 2015-2016, sur un précédent de blé tendre. Les premiers résultats valorisables sont ceux de la campagne 2016-17.

2.3 L'évaluation ex ante *lors de la conception* de novo *du système innovant*

Le système innovant a été retenu car le plus prometteur : il permettait a priori d'atteindre les objectifs d'amélioration de l'indicateur de rentabilité, de réduction des émissions de GES et de consommation d'énergie primaire, et de réduction de la dépendance aux engrais minéraux azotés (Tableau 3).

Tableau 3 : Résultats de l'évaluation *ex ante* des systèmes témoin et du prototype de système innovant conçus pour Syppre Berry, en pourcentage d'atteinte des valeurs ciblées en objectif.

Indicateurs	Référence	Valeur cible	SdC témoin	SdC innovant
≥ Produit brut (€/ha)	1190	1190	100%	94%
≥ Production Energie Brute totale estimée (MJ/ha)	195480	195480	100%	86%
≥ Marge semi-nette €/Ha	523.7	524	100%	107%
- 20% Emissions GES Totales (kgéqCO2/ha)	2133	1706	80%	117%
- 20% Conso.n Energie Primaire Totale (MJ/ha)	11598	9278	80%	108%
- 50% IFT Total	2.9	0.85	50%	80%
- 50% IFT Herbicide	2	1.6	29%	45%
- 20% N Total (kg/ha)	157	125	80%	124%
> Stock de MO	6.0	3.6	100%	93%

Par ailleurs, l'évaluation menée avec OdERA a montré qu'il était prometteur vis-à-vis des adventices – avec une réduction du risque d'enherbement pour la flore gérée dans l'outil _ notamment pour le Géranium disséqué et le vulpin, principales adventices sur la plateforme régionale, ainsi que le Brome mou, le ray-grass et le gaillet. La note de risque a été améliorée de 52 à 29, soit d'un risque fort pour le système témoin à un risque modéré à faible d'enherbement pour le système innovant.

A priori, le système innovant permettait une réduction de l'usage des herbicides, bien que n'atteignant pas la valeur cible à -50% de la référence régionale. Les objectifs vis-à-vis de la productivité du système n'étaient pas complétement satisfaits.

Ces deux points sont à observer de façon prioritaire lors de la mise en œuvre terrain.

2.4 L'évaluation ex ante *pour guider l'adapation pas-à-pas du système expérimenté*

La deuxième évaluation conduite avec l'outil DEXiPM® a permis d'approfondir l'analyse de la durabilité du système innovant en comparaison du système témoin. Seuls les indicateurs pour lesquels l'information a été jugée pertinente ont été retenus dans le Tableau 4. Les résultats ont été discutés

avec l'équipe régionale en charge de l'essai, porteuse des premières tendances de résultats observés après 2 campagnes de mise en essai.

La mise en œuvre des leviers agronomiques dans le système innovant du Berry améliore la note globale de la durabilité par rapport au système témoin, grâce à l'amélioration de la durabilité environnementale et au maintien d'une durabilité économique et sociale équivalente au système témoin et jugées favorablement.

Tableau 4 : Sélection d'indicateurs obtenus avec DEXiPM® pour les systèmes témoin et innovant de la plateforme Syppre du Berry, avec leurs points forts (en vert) et leurs limites (en rouge).

	Syppre Berry : système témoin	**Syppre Berry : système innovant**
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	Moyenne	Élevée
	• Risque de contamination par une mycotoxine • Risque sanitaire dû au recours aux pesticides • Complexité du système de culture	• Risque de contamination par une mycotoxine • Diversité des familles cultivées
Durabilité environnementale	Faible à Moyenne	Élevée à très élevée
	• Effet de pratiques limitant le tassement • Lixiviation de nitrate et de pesticides • Perturbation chimique • Intensité de la fertilisation • Émissions atmosphériques d'ammoniac • Émissions de pesticides	• Utilisation d'énergie • Intensité de l'occupation des sols • Effet de pratiques limitant le tassement • Lixiviation de nitrate et de pesticides • Intensité de la fertilisation • Émissions atmosphériques (gaz à effet de serre, ammoniac et pesticide)

La durabilité économique évaluée *ex ante* est très élevée dans les systèmes témoin et innovant, confirmant l'estimation de la rentabilité établie à l'issue des ateliers de conception avec SYSTERRE®. La réduction de la dépendance aux pesticides du système innovant entraine une diminution des coûts de production ; cet allégement des charges permet de contrebalancer la perte de produit brut. Cependant, cette estimation a été source de discussion avec l'équipe locale qui n'observe pas cette tendance mais plutôt une dégradation de la marge semi-directe.

Les bonnes performances économiques estimées sont conditionnées à trois facteurs :

- Les hypothèses de prix de vente utilisées – on a utilisé les moyennes régionales observées,
- La stratégie d'équipement pour mettre en œuvre les systèmes de culture très optimisés pour les deux systèmes (« capacité d'investissement » dans le Tableau 4),
- Les rendements - ces derniers ont été estimés au-dessus des premières tendances observées.

Dans ce type de milieu, un enjeu central réside dans la réussite de l'implantation des cultures quelles qu'elles soient pour assurer un minimum de productivité et gagner en rentabilité. Le défi reste à relever pour les prochaines campagnes de l'essai.

Pour le volet durabilité sociale, l'augmentation de la complexité du système de culture innovant 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.

Les premières simulations réalisées avec FLORSYS, ont permis de comparer les systèmes témoin et innovant en termes de risque adventice, selon 2 trajectoires d'évolution du climat : scénario 1 (+1.8 °C en 2100) et scénario 2 plus défavorable (+3.7 °C en 2100). Les premiers résultats (d'après Cavan et al., 2019 – rapport interne) montrent que la nuisibilité augmente dans les deux scénarios, que ce soit pour le système témoin et le système innovant. Par contre, les risques de dérive de la pression adventices diminuent, probablement du fait d'une pression très forte au démarrage des simulations. Les critères de ressource trophique et de diversité de la flore sont améliorés dans les deux scénarios, pour le système innovant.

Ces premiers résultats devront être confortés, et partagés ensuite avec les équipes régionales pour en tirer les informations utiles au pilotage du système innovant.

3. Discussion et conclusion

La démarche méthodologique de conception de systèmes innovants qui combine expertise, expérimentation et simulations présentée dans cet article a été mise en œuvre dans les cinq situations de production où l'Action Syppre est déployée.

Imaginée pour mettre au point des expérimentations systèmes de culture génératrices de connaissances agronomiques nouvelles et de solutions innovantes utilisables et adaptées aux besoins des acteurs locaux, elle est originale en deux points :

- Elle associe l'expertise des acteurs locaux de la R&D et des agriculteurs, le retour d'expérience des pilotes opérationnels des expérimentations et des outils et modèles d'évaluation *ex an*te de performance de systèmes,
- Elle mobilise ces ressources lors de la phase de conception *de novo* des systèmes puis pour guider les évolutions lors de la mise au point pas-à-pas des systèmes en expérimentation.

Le périmètre des acteurs et le choix des outils et modèle ont été adaptés aux besoins, à chaque étape.

Lors de la première étape de co-conception des systèmes innovants, la méthode d'évaluation *ex an*te est restée simple pour ne pas freiner la dynamique des ateliers de conception. Elle s'est appuyée sur un nombre limité à 8 indicateurs principaux facilement calculables avec l'outil SYSTERRE®. L'intérêt était d'avoir une procédure qui facilite la description des prototypes dans l'outil ou la création de nouvelles versions au fur et à mesure des propositions du groupe. Les résultats des évaluations ont été des supports utiles pour faire émerger de nouvelles idées lors des ateliers de conception. Cette méthode a permis par ailleurs de discriminer rapidement les prototypes et de choisir le système prometteur.

Une fois ce dernier identifié, les itinéraires techniques prévisionnels et les règles de décision associées ont été décrites avec quelques experts du comité régional. L'évaluation de cette version enrichie du système a été renouvelée avec SYSTERRE® et en faisant appel à d'autres outils pour vérifier son intérêt sur les aspects complémentaires tel que le stockage de carbone et l'évolution de la pression en

adventices. Dans le cas du Berry, l'utilisation d'OdERA a confirmé la capacité potentielle à maintenir voire améliorer la pression en vulpin et géranium dans le système de culture innovant.

Les résultats de cette seconde étape, qui précède la mise en œuvre sur le terrain, aident aussi le comité de suivi à identifier les facteurs de réussite des systèmes, et les responsables d'essais, les points à observer avec attention lors du suivi des cultures. Dans le Berry, l'enrichissement du stock de carbone dans le sol dépend, entre autres, de la réussite du maïs, et les bonnes performances économiques de la capacité à réduire réellement l'usage des intrants et à maintenir les rendements des espèces historiques.

Enfin, une troisième étape d'évaluation a été conduite alors que les essais étaient en place depuis deux campagnes. La dynamique de travail est différente de celle des ateliers de conception et est favorable à une étude approfondie des systèmes de culture. Une version DEXiPM® adaptée aux critères de performance visés dans Syppre, enrichie en indicateurs environnementaux et des indicateurs issus de FLORSYS pour la gestion des adventices a été produite dans ce contexte, dans le cadre du projet ANR CoSAC.

Les évaluations issues de DEXiPM®-Syppre sont dépendantes du contexte, ce qui n'autorise pas de comparaison entre sites. La méthode présente cependant plusieurs avantages :

- Les travaux peuvent s'appuyer sur les premiers résultats issus du terrain et le retour d'expérience des pilotes de l'essai sur les pratiques mises en œuvre essentiellement,
- Les résultats fournissent une vision globale de la durabilité des systèmes sur les trois piliers – économiques, sociaux, environnementaux et permettent d'anticiper certaines difficultés à dépasser à moyen terme pour son acceptabilité,
- De nouvelles connaissances sont produites *in silico* sur l'impact des systèmes testés, sur certains points particuliers. Dans l'exemple de Syppre, les simulations avec FLORSYS ont permis d'enrichir l'évaluation des systèmes sur cinq indicateurs de gestion des adventices et de projeter ces systèmes dans des contextes climatiques variés.

Ces approches sont utiles pour réajuster les systèmes expérimentés, à un pas de temps qu'il reste à définir, ou pour adapter les mesures annuelles de terrain.

Les informations produites sont aussi autant de ressources à partager avec les comités techniques régionaux, et au-delà, avec les agriculteurs et les conseillers engagés dans l'évolution de leurs modes de production. Elles permettent de visualiser les compromis entre différents critères de durabilité, et d'inspirer de nouvelles pratiques.

Pour conclure, la méthode de co-conception-expérimentation-modélisation est générique (avec une adaptation à l'objet étudié des outils et modèles) et reproductible.

Elle est à nouveau mise en œuvre, au sein de Syppre depuis l'automne 2018, pour la recherche d'alternatives à l'usage du glyphosate. Les plateformes expérimentales doivent contribuer à l'objectif « zéro glyphosate » pour les systèmes innovants et témoins en cours d'expérimentation, sans mettre en péril l'état sanitaire des parcelles, et en limitant l'impact sur les performances techniques, économiques et environnementales des systèmes de culture. Les équipes locales en charge des essais sont en première ligne et prévoient de mobiliser les comités régionaux et les réseaux d'agriculteurs partenaires de Syppre. Le recours au modèle DEXiPM®-Syppre et à FLORSYS est envisageable pour évaluer *ex ante* les solutions qui seront imaginées localement.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec le soutien scientifique et financier du GIS GC-HP2E et 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 comités régionaux, les équipes régionales des instituts techniques ainsi que Pascaline Pierson et Philippe Gate (Arvalis) pour leurs contributions lors de la conception du projet et des plateformes.

Références bibliographiques

Andriulo A., Mary B., Guérif J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. Agronomie 19, 365-377

Bockstaller C., Girardin P., van Der Werf H.G.M., 1997. Use of agro-ecological indicators for theevaluation of farming systems. European Journal of Agronomy 7, 261-270.

Bockstaller C., Guichard L., Makowski D., Aveline A., Girardin P., Plantureux S., 2008. Agrienvironmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. Agron. Sustain. Dev. 281, 139-149.

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.

Cavan N., Omon B., Colbach N., Angevin F., 2019. Utilisation du modèle FLORSYS comme outil d'aide à la conception de systèmes de culture innovants performants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure. Agronomie, environnement et sociétés 9, 131-143.

Cavan N., Dubois S., Tailleur A., Angevin F., 2019. Plateformes Syppre : Performances pour la gestion durable des adventices face au changement climatique. Rapport interne.

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

Craheix D., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Omon B., Reau R., Dore 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 p. http://ifsa.boku.ac.at/cms/index.php?id=ifsa2012

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.

Dubois S., Tailleur A., Cavan N., 2019. rapport methodologique : utilisation du modele d'evaluation multicritere DEXIPM®-Syppre calcul des indicateurs et seuillage. Arvalis Insitut du végétal – INRAE. Non publié. Sur demande.

Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estorgues V., Labeyrie B., Lafond D., Meynard J.M., Petit M.S., Plénet D., Picault S., Faloya V., 2017. Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation "système" pour les cultures assolées et pérennes, GIS PIClég, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique, 172 pages

Jouy L., Wissocq A., Berrodier M., Weber S., 2018. Évaluer des systèmes de culture, concevoir des alternatives innovantes et multi-performantes. Poster, Phloème, rendez-vous de l'innovation céréalière. Janiver 2018. 2ème Edition.

Lechenet M., Deytieux V., Antichi D., Aubertot J-N., Bàrberi P., Bertrand M., Cellier V., Charles R., Colnenne-David C., Dachbrodt-Saaydeh S., Doré T., Farcy P., Fernandez-Quintanilla C., Grandeau G., Hawes C., Jouy L., Justes E., Kierzek R., Kudsk P., Lamichhane J-R., Lescourret F., Mazzoncini M., Melander B., Messéan A., Moonen A-C., C Newton A., Nolot J-M., Panozzo S., Retaureau P., Sattin M., Schwarz J., Toqué C., Vasileiadis V., Munier-Jolain N., 2016. Diversity of methodologies to experiment Integrated Pest Management in arable cropping systems: analysis and reflections based on a European network. European Journal of Agronomy. 83.

Messéan A., Lô-Pelzer E., Bockstaller C., Lamine C., Angevin F., 2010. Outils d'évaluation et d'aide à la conception de stratégies innovantes de protection des grandes cultures. Innovations Agronomiques 8, 69-81

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.

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.

Pernel J., Munier-Jolain N., 2011. OdERA-Systèmes : un outil de gestion des adventices. Vers des Systèmes de culture Intégrés. La production intégrée : une alternative simple et perfromante pour réduire l'usage des intrants. Communication orale.

Sauzet G., Cadoux S., 2016. Sols argilo-calcaires du berry; Innover en milieu contraint. Perspectives agricoles. N°434. Juin 2016. p 73.

Toqué C., Cadoux S., Pierson P., Duval R., Toupet A.-L., Flénet F., Carrouée 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 Farming Systems Design, 7-10 September 2015, Montpellier, France, pp 385-386

Weber S., Jouy L., Angevin F., Berrodier M., Emonet E., Vanhove P., Viguier L., Wissocq A., Toqué C., 2019. SYSTERRE®, an online tool to describe diversified cropping systems, to calculate their performances, and assess their sustainability. European Conference on Crop Diversification, Budapest, Hungary, pp. 333-334.

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).