

AFPP – 23^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
DIJON – 6, 7 ET 8 DÉCEMBRE 2016

**COSAC, UN PROJET POUR LA CONCEPTION DE STRATEGIES DURABLES DE GESTION DES
ADVENTICES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT (CLIMAT, PRATIQUES AGRICOLES,
BIODIVERSITE)**

N. COLBACH⁽¹⁾, F. ANGEVIN⁽²⁾, P. MÉTAIS⁽³⁾, D. MOREAU⁽¹⁾, L. PAGÈS⁽⁴⁾, A. RODRIGUEZ⁽⁵⁾, J. VILLERD⁽⁶⁾,
F. VUILLEMIN⁽⁷⁾

⁽¹⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France
(Nathalie.Colbach@dijon.inra.fr)

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

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

⁽⁴⁾ PSH, INRA, Site Agroparc, 94914 Avignon, France

⁽⁵⁾ ACTA, 6 chemin de la côte vieille, 31450 Baziege, France (alain.rodriquez@acta.asso.fr)

⁽⁶⁾ LAE, INRA, Univ. Lorraine, F-54500 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

⁽⁷⁾ Terres Inovia, Avenue Lucien Brétignières, 78 850 Thiverval-Grignon, France

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 d'évaluer leurs performances dans différents contextes de changements (pratiques agricoles, climat, biodiversité), (4) permettre l'adoption de ces stratégies innovantes par les agriculteurs. Il est présenté les premiers résultats du projet, notamment l'effet des cultures de couverture, en interculture ou en association avec une culture « de rente », sur les adventices, ainsi que l'évaluation *ex ante* de changements de pratiques agricoles en termes d'impact de la flore adventice sur la production agricole et la biodiversité, ou la conception de systèmes agricoles multiperformants à l'aide du modèle FLORSYS.

Mots-clés : évaluation multicritère, durabilité, système agricole, adventice, modèle.

ABSTRACT

DESIGNING SUSTAINABLE WEED MANAGEMENT STRATEGIES IN A CHANGING CONTEXT (CLIMATE, AGRICULTURAL PRACTICES, BIODIVERSITY)

The CoSAC project associates partners from research and development in order to (1) quantify and understand, with experiments, the effects of novel agricultural practices on weeds and the functioning of the agroecosystem, (2) design tools that predict the effect of agricultural techniques et pedoclimate on weed flora, (3) use these tools to design sustainable weed management strategies and to evaluate their performances in contexts of changing agricultural practices, climate, biodiversity, (4) facilitate the adoption of these novel strategies by farmers. We will present the first results of the project, e.g. the effect on weeds of cover crops during fallow or associated to a cash crop, the *ex ante* evaluation of changes in agricultural practices in terms of weed impact on crop production and biodiversity, or the design of multiperformant agricultural systems with the FLORSYS model.

Keywords: multicriteria evaluation, sustainability, agricultural system, weed, model.

1 INTRODUCTION

Dans le cadre de la réduction de l'usage d'herbicides demandée par les réglementations françaises et européennes, la gestion des adventices devra évoluer. La flore adventice est un facteur de réduction de la production agricole mais elle est aussi un des piliers de la biodiversité des paysages agricoles. Il est donc nécessaire de proposer des nouveaux systèmes agricoles qui permettent de concilier réduction d'usage des herbicides, production agricole et conservation de la biodiversité en grandes cultures. 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, (4) évaluer la durabilité globale de ces stratégies dans différents contextes de changement (pratiques agricoles, climat, biodiversité) et (5) permettre l'adoption de ces stratégies innovantes par les agriculteurs. Nous présentons ici quelques premiers résultats.

2 ANALYSER ET QUANTIFIER LES EFFETS DES PRATIQUES AGRICOLES INNOVANTES SUR LA FLORE ADVENTICE

2.1 OBJECTIF

Des essais au champ et des expérimentations en conditions contrôlées sont 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 est 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 permettront de savoir comment améliorer l'efficacité des techniques culturales en optimisant les interactions biologiques et les processus physiques impliqués et de préparer la modélisation des effets, en identifiant les techniques et processus les plus pertinents à intégrer au modèle FLORSYS.

Les travaux se concentreront sur les stratégies innovantes pour lesquelles un inventaire des nouvelles techniques et des lacunes de connaissances sera réalisé :

- La spatialisation du désherbage chimique à l'intérieur de la parcelle ;
- La diversification des couverts avec des couverts d'interculture ou des cultures associées ;
- Le semis direct et le travail du sol limité à la ligne de semis ("strip-till"), avec ou sans plantes de couverture.

2.2 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES PRATIQUES INNOVANTES AU CHAMP

La simplification ou l'abandon du travail du sol permet d'alléger le calendrier du travail des agriculteurs mais pourrait rendre la gestion des adventices plus difficile. Le suivi de parcelles d'agriculteurs et expérimentales met en évidence une dynamique de la flore adventice différente dans les systèmes en semis direct sous couvert comparée aux systèmes avec travail du sol et sans usage de couvert. Un essai de longue durée à de Boigneville (91) compare plusieurs modalités de gestion de l'interculture (avec ou sans culture intermédiaires, culture intermédiaire détruite par un labour ou un herbicide total, implantation des cultures après labour ou en semis direct) depuis 1992. Les suivis de flores réalisés de 2011 à 2015 montrent que la densité d'adventices dans les cultures suivantes est plus élevée dans les modalités en semis direct sans couvert ou avec couvert de radis chinois seul que dans les modalités labourées (Figure 1). En revanche, aucune des cultures intermédiaires testées n'a permis de réduire les adventices.

L'association de cultures de rente avec couverts associés est un autre moyen pour contrôler les adventices en augmentant la compétition. Les essais au champ testant du colza associé à des plantes de couvert montrent que les couverts associés accentuent la concurrence du colza vis-à-vis des adventices dès l'automne. Cet effet dépend de la biomasse produite à la fois par le colza et le couvert associé (Figure 2). Dans ces essais, l'effet est marqué à partir de 1.5 kg/m² de biomasse fraîche totale en entrée hiver.

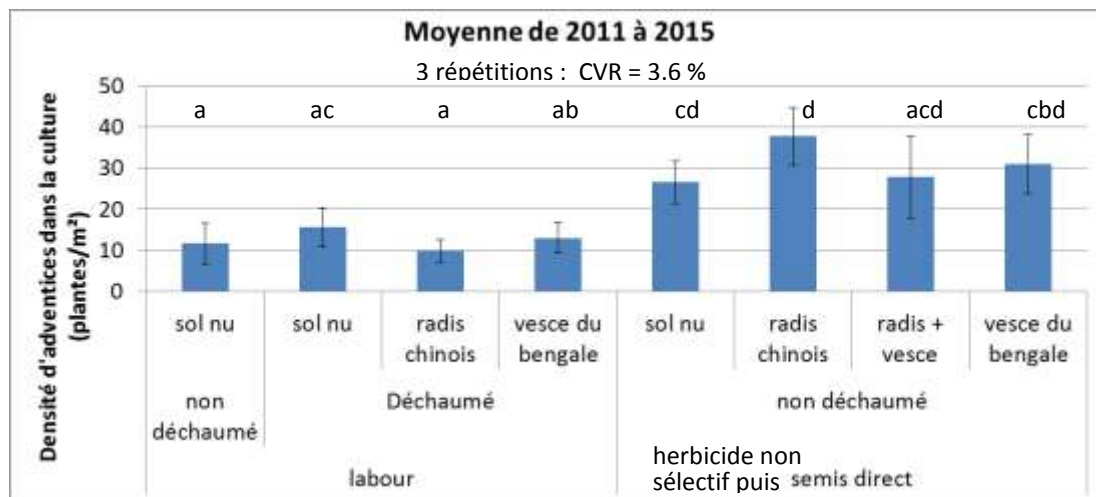


Figure 1 : Densité d'adventices en fin de cycle dans les cultures en fonction du mode de gestion de l'interculture à Boigneville (91). Des lettres différentes traduisent des différences significatives au seuil de 5% avec le test de Newman Keuls. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard (Weed density in crops in the month before harvest depending on summer fallow management (cover crops, tillage after cover crops, seed bed preparation) at Boigneville (91). Different letters show significant differences at $p=0.05$ using a Newman Keuls test. Vertical bars show standard errors) (Arvalis © 2016)

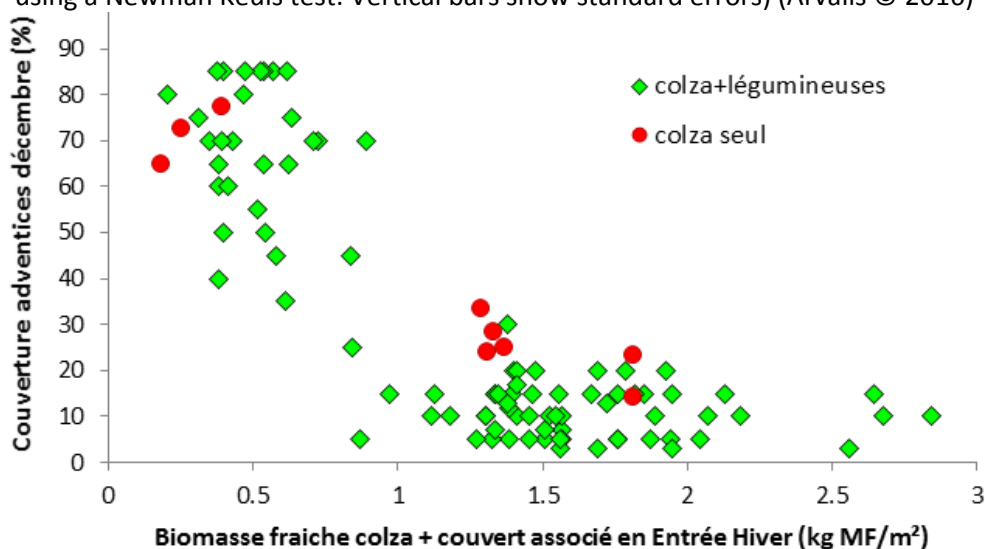


Figure 2 : Taux de couverture du sol par les adventices en décembre, en l'absence de traitement herbicide anti-dicotylédones, en fonction de la biomasse fraîche du colza et du couvert associé en entrée hiver (Soil coverage by weeds in December depending on the fresh biomass of oilseed rape and its associated cover crop at winter onset in the absence of anti-broadleaved herbicides) (Terres Inovia © 2016)

2.3 UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DES TRAITS DES ADVENTICES ET DES MECANISMES IMPLIQUES DANS LES IMPACTS DES PRATIQUES AGRICOLES

Afin de comprendre et prédire les effets des cultures de couverture et des cultures associées sur la flore adventice, des expérimentations ont été menées en parcelles jardinées et en serre pour paramétrer des espèces cultivées et adventices pour la compétition pour la lumière (morphologie aérienne) et l'azote (architecture racinaire et demande en azote des plantes) et rechercher des corrélations entre paramètres difficiles à mesurer et traits plus accessibles (voir Moreau *et al.*, 2016 dans ce congrès). Ces expérimentations montrent par exemple que les paramètres d'architecture racinaire sont très différents selon les espèces mais que les règles qui gouvernent l'architecture sont peu affectées par la disponibilité en azote du sol.

Le non travail du sol induit des conditions hydrothermiques et structurales particulières dans le sol, notamment proches de la surface où s'accumulent les semences adventices dans ces conditions. Nos travaux combinent analyse bibliographique, expérimentation et modélisation pour comprendre et prédire ces conditions, puis prédire les effets de ces conditions sur les adventices. Des essais ont par exemple montré que les semences des adventices germent moins bien lorsqu'elles sont à la surface du sol, en présence d'un couvert végétal, ou en conditions de stress hydrique.

Les applications d'herbicides localisées sur les taches d'adventices permettraient de réduire la consommation d'herbicides tout en contrôlant les adventices. Cette technique nécessite la détection automatisée des adventices. Nous avons notamment travaillé sur l'élaboration d'un modèle de chaîne d'acquisition d'images, l'acquisition d'images par drone, et l'évaluation des images et algorithmes de détection à l'aide de relevés floristiques géoréférencés. L'évaluation du potentiel de discrimination culture/adventices est en cours. Le robot terrestre est une alternative qui combine guidage automatisé, prise d'image et traitement localisé (voir Maillot *et al.*, 2016 dans ce congrès).

3 DEVELOPPEMENT D'OUTILS ET DE METHODES D'EVALUATION ET DE CONCEPTION *IN SILICO*

3.1 INTRODUCTION

FLORSYS (Colbach *et al.*, 2014) est un modèle de recherche qui prédit les effets des systèmes de culture sur la dynamique de la flore adventice ainsi son impact sur la biodiversité et la production agricole. L'objectif est d'utiliser ce modèle comme champ virtuel pour développer des outils et méthodes pour l'évaluation multicritère *in silico* de systèmes de culture et la conception multiobjectif de systèmes de culture innovants pour la gestion durable de la flore adventice.

Ce travail va: (1) améliorer FLORSYS, à partir notamment des expérimentations du chapitre 2, pour intégrer les techniques culturales innovantes manquantes, les processus pour les modéliser correctement, et les indicateurs nécessaires pour les évaluer, (2) réaliser des simulations avec FLORSYS pour quantifier les effets des techniques et combinaisons de techniques sur les indicateurs de nuisibilité et biodiversité liées à la flore adventice, (3) utiliser ces données pour construire des outils plus opérationnels d'évaluation et conception de stratégies de gestion de flore adventice.

3.2 INTEGRATION DE TECHNIQUES INNOVANTES DANS LE MODELE "PARCELLE VIRTUELLE" FLORSYS

Avant de compléter FLORSYS, nous avons tout d'abord évalué la version existante en comparant des simulations à des données observées dans quatre régions françaises provenant d'essais systèmes des domaines expérimentaux de l'INRA à Dijon-Époisses et Versailles-Lacage, ainsi que du réseau Biovigilance-Flore. La qualité des prédictions est généralement satisfaisante, surtout en Bourgogne où une grande partie des processus biophysiques a été paramétrée (Colbach *et al.*, in revision-a). L'évaluation a mis en évidence certaines défaillances (ex. prévision des dates de floraison, devenir des semences en semis direct) et des expérimentations ont été mises en place pour les pallier.

Plusieurs modules (désherbage spatialisé, résistance au glyphosate, dispersion des semences, habitats semi-naturels) ont été ajoutés au modèle. D'autres sont en cours d'intégration (structure hydromécanique du sol, architecture racinaire, azote, résistance aux ALS, module phénologique). Le système racinaire est par exemple représenté par un volume enveloppe (cône dont la pointe est dirigée vers la profondeur) rempli de racines dont la densité varie avec le temps et la profondeur. Les fonctions de ce module et les paramètres des espèces ont été établis à partir d'un modèle d'architecture racinaire existant plus détaillé (ARCHISIMPLE, Pagès *et al.*, 2014) paramétré à partir des expérimentations réalisées au chapitre 2.3 (voir aussi Moreau *et al.*, 2016 dans ce congrès).

3.3 DU MODELE "PARCELLE VIRTUELLE" VERS L'OUTIL D'AIDE A L'EVALUATION ET LA CONCEPTION DE SYSTEMES

3.3.1 Simplification des modules gourmands en temps dans FLORSYS

FLORSYS représente les couverts en 3D, avec une représentation individuelle et voxelisée (pixels 3D) de chaque plante cultivée et adventice. La prédiction de la lumière interceptée et de l'ombrage des plantes est donc très gourmande en temps. Des analyses de sensibilité ont été réalisées pour identifier les facteurs déterminants, puis des métamodèles ont été élaborés pour prédire interception et ombrage plus rapidement (Colas *et al.*, 2016b).

3.3.2 Identification des besoins des utilisateurs

Des enquêtes et des ateliers avec FLORSYS réalisés pour définir les besoins en outils d'aide à la décision (OAD) auprès de conseillers en chambre d'agriculture et en instituts techniques ont permis (1) d'identifier les problèmes rencontrés dans la gestion des adventices et les questions à traiter avec l'OAD, (2) de vérifier l'intérêt des indicateurs d'impact de la flore adventice inclus dans FLORSYS (perte de rendement, contribution à la biodiversité, protection contre l'érosion...), (3) d'évaluer la facilité de renseigner les entrées de FLORSYS (voir détails dans Colas *et al.*, 2016a dans ce congrès).

Deux types d'OAD à développer ont été définis: (1) un OAD synthétique pour évaluer des méta-règles de décision¹ et identifier des alternatives, qui vise plutôt des agriculteurs confrontés à une impasse de gestion, (2) un OAD détaillé, avec les fonctionnalités de FLORSYS, mais pré-paramétré pour les variables régionales et/ou difficiles à renseigner pour en faciliter l'utilisation. Cet outil est destiné à des utilisateurs prêts à comprendre et modifier leurs pratiques avant d'atteindre une impasse. Les ateliers ont aussi montré que les agriculteurs sont souvent prêts à aller plus loin dans l'innovation et les changements de pratiques que les conseillers. Cependant, cette attitude n'est pas nécessairement représentative de l'ensemble des agriculteurs dans la mesure où les agriculteurs participant à ces ateliers sont aussi les plus ouverts à l'innovation.

3.3.3 Test de prototypes

Des prototypes du nouvel outil d'aide à la décision seront testés dans des ateliers avec les futurs utilisateurs pour identifier les adaptations nécessaires de l'outil et déterminer les méthodes d'utilisation (voir détails dans Colas *et al.*, 2016a dans le présent congrès).

3.4 DEVELOPPEMENT DE METHODES D'EVALUATION ET DE CONCEPTION DE SYSTEMES DE CULTURE AVEC FLORSYS

L'objectif est d'identifier les plans de simulations et des méthodes statistiques adaptés pour utiliser FLORSYS, à différentes échelles de gestion (technique culturale vs itinéraire technique vs système de culture) ou spatiale (champ vs. micro-paysage), et avec différentes approches (évaluer l'existant vs. rechercher des solutions) et objectifs (optimiser un critère vs. concilier plusieurs critères). Nous présentons ici quelques cas d'étude.

3.4.1 Évaluation des conséquences d'une technique innovante sur un indicateur d'impact: le cas des variétés tolérantes à un herbicide non sélectif et le risque de résistance des adventices

L'objectif de cette étude était d'évaluer le risque de résistances de la flore adventice dans des systèmes de culture à base de maïs en cas d'introduction de variétés tolérantes au glyphosate. Des simulations avec FLORSYS ont été réalisées sur deux régions, avec des systèmes conventionnels, puis en introduisant les nouvelles variétés ainsi qu'un ensemble de changements de pratiques qui les accompagnent (Tableau I). Les simulations montrent que l'application de glyphosate (en interculture ou en culture) entraîne la résistance des adventices uniquement si d'autres pratiques culturales, notamment le semis direct, favorisent son apparition. Le glyphosate sélectionne surtout des espèces adventices qui évitent le traitement plutôt que celles qui sont effectivement résistantes.

3.4.2 Concilier au niveau du champ ou du paysage? Quelles combinaisons de systèmes de culture permettent de concilier production agricole et biodiversité au niveau du micro-paysage?

Des simulations ont été réalisées pour comparer des scénarios combinant différents assolements, systèmes de culture et habitats semi-naturels pour évaluer s'il est plus facile de concilier production agricole et biodiversité sur un ensemble de parcelles ("landsparing"), plutôt que dans chaque parcelle ("landsharing"). Dans l'exemple testé ici (Colbach *et al.*, soumis-b), le meilleur compromis était obtenu avec les scénarios combinant 75% de champs visant une forte production agricole et 25% de champs visant une forte biodiversité dans la micro-région. Les scénarios combinant 90% de champs visant une forte production et 10% de bandes enherbées produisent des résultats de même ordre. La production et la biodiversité des scénarios "landsharing" étaient presque toujours plus faibles, quel que soit l'assolement annuel. Les résultats sont spécifiques à la région et au type de systèmes de culture testés.

¹ ex. labourer un an sur deux, rotation alternant cultures de printemps et d'hiver.

Tableau I. Effet de changements de pratiques dans des systèmes de culture à base de maïs sur la densité adventices et la probabilité de résistance (1 plante résistante/m²). Résultats de simulations avec FLORSYS sur 28 ans et dix scénarios climatiques. Les chiffres d'une même colonne suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents à p=0.05 (effect of changes in management practices in maize-based systems on weed density and glyphosate resistance (1 resistant plant / m²). Results of FLORSYS simulations over 28 years and 10 weather repetitions. Numbers of a given column followed by the same letter are not significantly different at p=0.05) (Colbach *et al.*, in revision-b) (N. Colbach © 2016)

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

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

3.4.3 Concevoir des systèmes de culture répondant à un objectif d'impact d'adventices: proposer des systèmes de culture qui permettent de réduire le risque d'orobanche dû aux adventices

Nous avons développé une méthode pour améliorer des systèmes de culture existants pas-à-pas afin de concilier des objectifs d'impacts des adventices (Colbach *et al.*, soumis-a), avec les étapes suivantes:

- (1) 2550 scénarios sont simulés avec FLORSYS (255 systèmes de culture x 10 répétitions climatiques) et une note globale de l'impact des adventices est établie à partir des indicateurs d'impact (ex. perte de rendement, offre trophique pour abeilles, IFT herbicide),
- (2) des arbres de décision sont établis, identifiant les combinaisons de pratiques culturales permettant d'atteindre différents notes d'impact (Figure 3),
- (3) un système de culture est modifié pas à pas, en y introduisant les modifications intéressantes identifiées dans ces arbres, en mettant l'accent sur la réduction du risque d'échec plutôt que sur l'augmentation de la probabilité de réaliser le meilleur score. Dans l'exemple de la Figure 3, le système existant a un risque de 95% d'échec (note E) et une probabilité de 5% d'une performance C-. Plusieurs modifications sont testées avec FLORSYS, permettant d'améliorer la performance du système, dont certaines permettant de réduire le risque d'échec de 90% à moins de 30% (Tableau IV).

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

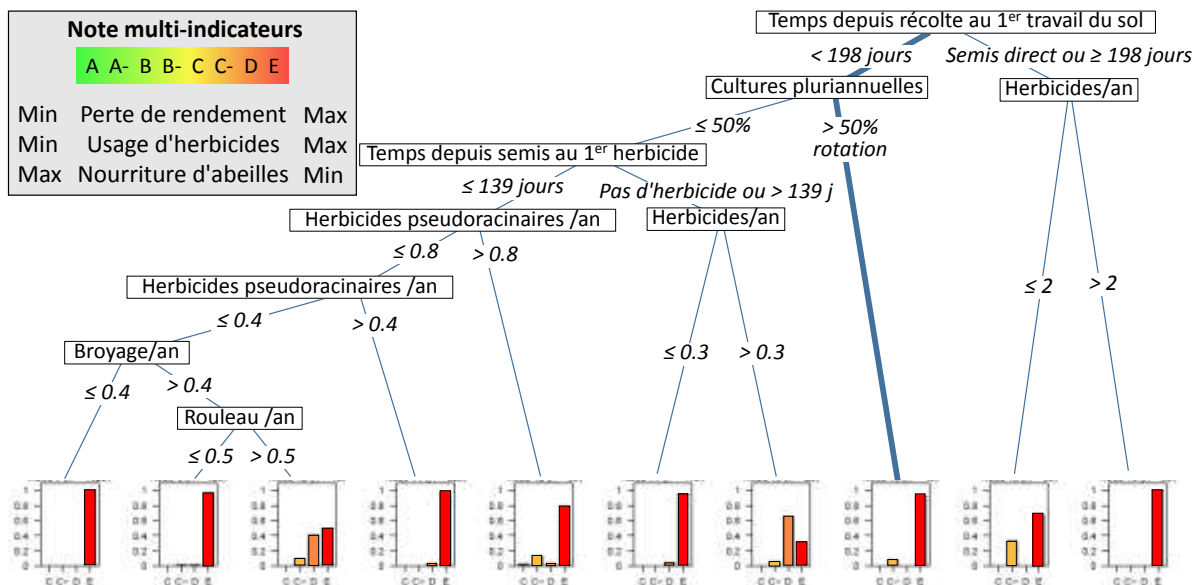


Figure 3. Arbre de décision pour identifier des règles pour concilier faible usage d'herbicide, faible perte de rendement et forte offre trophique pour abeilles dépendant de la flore adventice. Le chemin en gras montre le système de culture à améliorer (Decision tree to identify rules to reconcile reduced herbicide use, low crop yield loss and high weed-mediated food offer for bees. In bold the management path of an existing system to be improved) (Colbach *et al.*, soumis-a) (N. Colbach © 2016)

Tableau II. Performance multicritère simulée par FLORSYS pour un système de référence existant (R) et des systèmes alternatifs (A) afin de concilier faible perte de rendement, faible usage d'herbicides et promotion de l'offre trophique pour abeilles (Multi-criteria performance simulated with FLORSYS for an existing reference system A and alternative systems A aiming to reconcile low crop yield loss, low herbicide used and high weed-mediated food offer for bees) (Colbach *et al.*, soumis-a) (N. Colbach © 2016)

	Rotation		Broyage	Rouleau	Herbicides au cours de la rotation				Note multi-critère (probabilité)		
	Années	Cultures			Foliaire	racinaire	Pseudo-racinaire	Multi-mode	C-	D	E
R	5	Luzerne/blé/orge			1 print.	1 aut.	1 automne				100%
A1	3	Colza/blé/orge			1 print.	1 aut.	1 automne	1 semis		30%	70%
A2	3	Colza/blé/orge			2 print.	1 aut.		1 semis	10%	20%	70%
A3	5	Colza/blé/orge/tournesol/blé			2 print.	1 aut.	1 automne	2 semis		50%	50%
A4	3	Colza/blé/orge			2 print.		1 automne	1 semis	30%	40%	30%
A5	3	Colza/blé/orge		Semis					20%	10%	70%
A6	3	Colza/blé/orge	oui	Semis						20%	80%

3.5 OPTIMISER ET COMBINER DONNEES EXPERIMENTALES ET SIMULEES

Afin d'optimiser la gestion, le formatage et l'exploitation des données expérimentales et simulées produites par les différents partenaires, un groupe de réflexion s'est constitué. L'intégration des données dans une base commune est une étape indispensable qui permettra de (1) réaliser une méta-analyse des résultats expérimentaux du chapitre 2.2, (2) évaluer les nouveaux modules de FLORSYS du chapitre 3.2, (3) développer des modèles à partir des données observées et simulées avec FLORSYS. La réflexion se concentre sur l'hétérogénéité des données au niveau : (1) syntaxique, avec différents formats de stockages (tableurs, bases de données relationnelles, etc.) ; (2) structurelle, avec différents schéma de données ; (3) sémantique, avec l'utilisation de différents vocabulaire pour

une même technique par exemple. Le groupe de travail a décidé d'intégrer les données sous la forme d'un tableur unique, après avoir choisi et défini les variables à renseigner (techniques culturale, flore) et le vocabulaire pour décrire ces variables.

4 CONCEPTION ET EVALUATION MULTICRITERE DE SYSTEMES DE CULTURE INNOVANTS PERMETTANT LA GESTION DURABLE DES ADVENTICES

4.1 OBJECTIF ET METHODES

L'objectif de cette partie est de 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, plusieurs étapes sont prévues :

- identifier les freins à l'adoption d'innovations techniques concernant la gestion des adventices chez les agriculteurs,
- évaluer 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, conçus à dire d'experts chercheurs 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 seront réalisées avec des climats actuels et futurs et avec différentes flores adventices pour évaluer la robustesse des systèmes face au changement,
- concevoir, sur la base de ces diagnostics et en intégrant les résultats des autres tâches (chapitres 2 et 3) au fur et à mesure de leur disponibilité, de nouveaux systèmes de culture à dire d'experts, en tenant compte 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 seront prédits par FLORSYS et les nouveaux outils (avec des climats et flores actuels et futurs),
- évaluer la durabilité globale des systèmes les plus performants identifiés à l'étape précédente grâce à des outils d'évaluation multicritère (Sadok *et al.*, 2009; Pelzer *et al.*, 2012; Berrodier et Jouy, 2013).

4.2 UNE MEILLEURE COMPREHENSION ET PRISE EN COMPTE DES FREINS A L'ADOPTION DES PRATIQUES PROPOSEES

L'implication de partenaires pluri-secteurs dans cette partie du projet vise à faciliter la communication sur les stratégies les plus efficaces en termes de performances économiques, sociales et environnementales. Elle a débuté par des entretiens individuels auprès d'agriculteurs pour approfondir la compréhension des logiques de gestion des adventices afin d'identifier les points de blocage éventuels et de faciliter l'appropriation des innovations proposées *via* un conseil adapté. 28 enquêtes, dont 23 auprès d'agriculteurs et 5 auprès de prescripteurs du territoire se situant sur le Plateau du Neubourg en Normandie, ont été réalisées. Elles viennent compléter les résultats d'un stage financé par le GIS HP2E dans une autre région agricole (le Berry) dont les conditions pédo-climatiques et agronomiques sont contrastées (terres séchantes à plus faible potentiel ne permettant pas les cultures de printemps).

L'analyse des données recueillies est en cours et porte sur :

- Les causes identifiées et analysées par les enquêtés de l'apparition de résistances et de problèmes récurrents d'enherbement ;
 - Les pratiques actuelles et modifications opérées pour répondre à la problématique désherbage ;
 - La place prise dans le désherbage par la réponse chimique et des approches agronomiques ;
 - Les dysfonctionnements relevés au niveau du conseil délivré par les prescripteurs locaux ;
- La nature des freins et des leviers à l'adoption de stratégies moins consommatrices d'herbicides.

5 VALORISATION ET TRANSFERT DES SYSTEMES AGRICOLES INNOVANTS VERS LES ACTEURS

5.1 OBJECTIF

L'objectif de cette action est de faciliter l'interaction avec la profession pour les questions de recherche des autres tâches et de diffuser, auprès d'un public large, les outils et les méthodes développés dans le projet, ainsi que les stratégies les plus efficaces de gestion des adventices.

5.2 MOYENS DE DIFFUSION DES RESULTATS

Cette tâche débute à peine puisqu'elle est dépendante des résultats obtenus par les partenaires dans les actions précédentes. La diffusion, auprès d'un large public des outils et méthodes développés dans le projet, ainsi que des stratégies les plus efficaces de gestion des adventices fait appel aux réseaux existants (ex. RMT Florad, GIS GC HP2E²). Il en est de même pour concernant la formation initiale et la formation continue *via* les lycées agricoles impliqués dans le RMT Florad et le réseau des coopératives *via InVivoAgroSolutions*.

Différentes formes de valorisation ont été envisagées : fiches de synthèse reprenant les résultats principaux (impacts des pratiques étudiées, stratégies de gestion recommandées en fonction des contextes pédoclimatiques), essais de démonstration, formations aux outils, communication sur différents médias : site du RMT Florad (<http://www.florad.org/moodle/>), plateforme Ecophytopic (<http://www.ecophytopic.fr/>) ...

La diffusion de nouvelles pratiques et d'innovations techniques ou conceptuelles auprès de la profession agricole est difficile. Même si les nouveaux canaux d'informations sont aujourd'hui très puissants et accessibles à tous (numérique, smartphones, réseaux sociaux...), l'appropriation d'une nouveauté n'est encore possible que par l'échange, le témoignage *in situ* et l'accompagnement personnalisé. C'est la raison pour laquelle nous avons fait le choix d'organiser des ateliers participatifs avec des groupes d'agriculteurs afin de lever le tabou concernant l'utilisation des OAD et des modèles mais aussi pour recueillir en retour les avis et voies d'amélioration.

5.3 PREMIERES REALISATIONS

Un site web et une plaquette de présentation ont été réalisés en début de projet (<http://www.projet-cosac.fr/>). Les ateliers participatifs sont programmés pour l'automne et l'hiver 2016, en utilisant FLORSYS, les nouveaux outils d'aide à la décision et Ecoherbi (RMT Florad, 2016). Des fiches techniques pratiques sont accessibles en ligne (<http://www.florad.org/moodle/course/view.php?id=68>). L'interaction avec les conseillers agricoles et les agriculteurs a déjà débuté, en les impliquant dans le développement des outils d'aide à la décision à partir du modèle de recherche FLORSYS (chapitre 3.3.2 et 3.3.3).

6 DISCUSSION & CONCLUSION

Ce projet répond non seulement aux demandes des pouvoirs publics, notamment dans le cadre du plan Ecophyto, mais aussi à celles des agriculteurs. Lors d'une enquête réalisée en 2010 sur la thématique "quel avenir pour le désherbage demain ?" (RMT Florad, 2010), la majorité des producteurs (83%) trouvent le désherbage plus compliqué "qu'avant" essentiellement à cause de la baisse de l'offre herbicide, de la maîtrise des coûts devenue délicate et de la progression des populations adventices résistantes. Si la réduction des herbicides devient obligatoire, de nombreux producteurs se disent prêts à changer leurs pratiques, en mettant l'accent plutôt sur la prévention de la flore adventice (55% sont prêts à allonger la rotation, 38% à décaler les semis) plutôt que sur les méthodes curatives (seuls 28% sont prêts à utiliser le désherbage mécanique).

Les producteurs sont aussi très demandeurs du type d'accompagnement que proposera CoSAC. Les approches agronomiques permettant de prévenir les infestations (rotation, labour/non labour, déchaumage/faux semis) suscitent le plus d'intérêt (45%), devant les approches curatives, avec le désherbage chimique pur (efficacité des herbicides et conditions climatiques, 30%) et mixte ou combiné (15%) (RMT Florad, 2010). Près de 60% des agriculteurs interrogés déclarent être intéressés par une journée de formation sur la gestion agronomique des adventices.

Nos interactions avec les conseillers et les agriculteurs ont montré que les agriculteurs sont souvent plus ouverts à l'innovation que leurs conseillers. Or, l'agriculteur sollicite son technicien pour ajuster son programme de décision dans 2 cas sur 3, et la stratégie est tout d'abord définie par rapport à son efficacité et à son coût, avec l'impact environnemental en 3^{ème} position seulement (RMT Florad, 2010). Le technicien doit donc être au cœur des actions de communication et de formation pour

² <https://www.gchp2e.fr/>

assurer le transfert des résultats produits dans notre projet vers les producteurs.

Face à la diversité des contextes de production, des techniques culturales et des critères d'évaluation à considérer, les modèles de simulation et les outils d'aide à la décision sont indispensables pour identifier et proposer des systèmes agricoles multiperformants. Des modèles "champ virtuel" basés sur une représentation mécaniste des processus biophysiques sont intéressants pour évaluer et comprendre le fonctionnement des systèmes de culture dans différents pédoclimats. Ce type d'outil est souvent uniquement destiné à la recherche, mais nos premières interactions avec les agriculteurs ont montré qu'il y a également une demande pour un tel outil auprès de producteurs visant à régler très finement leurs pratiques culturales.

7 REMERCIEMENTS

Le projet CoSAC (ANR-15-CE18-0007) bénéficie de collaborations et financements extérieurs, notamment Frédéric Robert et Sophie Rousval (Plateforme Agroécologique de Toulouse Auzeville), Aurélie Cardona et Catherine Pasquier (INRA), Marianne Le Bail (AgroParisTech), le programme de recherche "Évaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides" des ministères en charge de l'écologie et de l'agriculture, l'INRA (départ. EA et MIA), la Région Bourgogne et le GIS GC HP2E.

8 BIBLIOGRAPHIE

- Berrodier M., Jouy L., 2013. *SYSTERRE : Méthode de calcul des indicateurs. Arvalis institut du Végétal. Tutoriel.*
- Colas F., Cordeau S., Jeuffroy M.-H., Granger S., Queyrel W., Pointurier O., Rodriguez A., Villerd J., Colbach N., 2016a. Développement d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des adventices. In: AFPP, editor. AFPP - 23ème Conférence du COLUMA - Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France
- Colas F., Gauchi J. P., Villerd J., Colbach N., 2016b. Meta-modeling light interception in crop:weed canopies. In: 14th ESA Congress, Edinburgh, Scotland
- Colbach N., Bertrand M., Busset H., Dugué F., Farcy P., Fried G., Granger S., Meunier D., Munier-Jolain N. M., Noilhan C., Strbik F., Gardarin A., in revision-a - Evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. *Environmental Modelling & Software.*
- 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., soumis-a - Proposing a methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. *European Journal of Agronomy.*
- Colbach N., Cordeau S., Garrido A., Granger S., Laughlin D., Ricci B., Thomson F., Messéan A., soumis-b - Landsharing vs landsparing: how to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. *Agriculture, Ecosystems & Environment.*
- Colbach N., Fernier A., Le Corre V., Messéan A., Darmency H., in revision-b - Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. I. Effect on weeds. *Environmental Science and Pollution Research.*
- Maillet T., Gée C., Gobin B., Villette S., Vioix J.-B., Jones G., Paoli J.-N., 2016. I-Weed Robot : un outil pour l'étude de population d'adventices. In: AFPP, editor. AFPP – 23e conférence du Columa. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France
- Moreau D., Abiven F., Busset H., Matejicek A., Pagès L., 2016. L'architecture racinaire des espèces adventices en relation avec la disponibilité en azote du sol. In: AFPP – 23e Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France
- Pagès L., Bécel C., Boukcim H., Moreau D., Nguyen C., Sterckeman T., Voisin A.-S., 2014 - Calibration and evaluation of ArchiSimple, a parsimonious model of the root system architecture. *Ecological Modeling*, in press.
- 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.
- RMT Florad, 2010. Enquête sur les pratiques de désherbage (<http://www.florad.org/moodle/course/view.php?id=49>). In:
- RMT Florad, 2016. ECOHERBI : un outil d'aide Des suggestions de systèmes de culture adaptés à votre région et votre type de sol pour réduire les herbicides. in: http://www.florad.org/moodle/pluginfile.php/860/mod_resource/content/2/12h40_GuideInteractifEcoherbi_F.Vuillemin.pdf.
- Sadok W., Angevin F., Bergez J. E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messéan A., Dore T., 2009 - MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 447-461.