Projet ANR 2014 Grands défis sociétaux			
Acronyme	**CoSAC**		
Titre du projet	Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement (Climat, pratiques agricoles, biodiversité)		
Proposal title	Designing sustainable weed management strategies in a changing context (climate, agricultural practices, biodiversity)		
Catégorie R & D	**Recherche fondamentale**		
Instrument de financement	**Projet collaboratif en partenariat public-privé**		
Aide totale demandée	498 986 €	**Durée du projet**	48 mois

Table des matières

Table des matières 1
1 Synthèse **2**
1.1 Résumé du projet (en anglais) tel que saisi en ligne sur le site de soumission 2
1.2 Tableau récapitulatif des personnes impliquées dans le projet 2
2 Contexte, positionnement et objectif de la proposition détaillée **4**
2.1 Contexte 4
2.2 Les objectifs de CoSAC 5
2.3 État de l'art 5
2.4 Positionnement du projet 10
2.5 Résultats attendus dans CoSAC 12
3 Programme scientifique et technique, organisation du projet **13**
3.0 Tâche 0: Management du projet 14
3.1 Tâche 1. Analyser et quantifier les effets des pratiques agricoles innovantes sur la flore adventice 14
3.2 Tâche 2: Développement d'outils et de méthodes d'évaluation et de conception in silico 17
3.3 Tâche 3. Conception et évaluation multicritère de systèmes de culture innovants permettant la gestion durable des adventices selon plusieurs scénarios d'évolution 20
3.4 Tâche 4. Valorisation et transfert des systèmes agricoles innovants vers les acteurs 22
3.5 Calendrier des tâches, livrables et jalons 22
4 Stratégie de valorisation, de protection et d'exploitation des résultats, impact global de la proposition **24**
4.1 Protection des résultats 24
4.2 Valorisation et dissémination 24
4.3 Les retombées pour la société 25
5 Description du partenariat **25**
5.1 Adéquation et complémentarité des partenaires 25
5.2 Description des partenaires 25
5.3 Qualification de la coordinatrice du projet 26
6 Justification scientifique des moyens demandés **27**
6.1 Partenaire 1 : INRA Agroécologie 27
6.2 Partenaire 2 : INRA EcoInnov 27
6.3 Partenaire 3 : INRA LAE 27
6.4 Partenaire 4 : INRA PSH AVIGNON 27
6.5 Partenaire 6 : ACTA 27
6.6 Partenaire 7 : ARVALIS 27
6.7 Partenaire 8 : CETIOM 28
7 Références bibliographiques **28**

1 Synthèse

1.1 Résumé du projet (en anglais) tel que saisi en ligne sur le site de soumission

Reduced herbicide use required by French and European legislation will change weed management. Weeds are very harmful for crop production but contribute to biodiversity in agricultural landscapes. Consequently, reduced herbicide use, agricultural production and biodiversity conservation must be reconciled in arable crops. The project team consists of multidisciplinary partners (ecologists, agronomists, modellers,...) from research and development in order to: (1) understand and quantify with experiments the effects of novel agricultural practices on weed flora and on the functioning of the agroecosystem, (2) design tools predicting the effects of agricultural practices and pedoclimate on weed flora, (3) use these tools to design weed management strategies and to evaluate their performance in various contexts of changing agricultural practices, climate and biodiversity, (4) facilitate the adoption of the novel weed management strategies by farmers.

Task 1 will focus on crop diversification (cover crops, crop associations), localized technology (local herbicide spraying, fertilizer placement in crop rows, strip-till) and no till. These techniques will be monitored in field experiments, the underlying processes will be studied in controlled conditions (competition for light, nitrogen and water; root architecture; seed germination on soil surface...) and in fields (weed detection and identification by aerial image analysis; soil structure and hydrothermal conditions in no-till).

Task 2 will use these results to improve the existing FLORSYS model which quantifies the effects of cropping system and pedoclimate on weed dynamics and calculates indicators of weed harmfulness (e.g. crop yield loss) and benefits (e.g. species richness, food offer for bees). FLORSYS will be further improved by adding herbicide resistance and seed dispersal functions, by upscaling from the field to a multi-field mosaic, by improving the phenology prediction, and by completing the weed evaluation indicators. FLORSYS will be used to run sensitivity analyses to identify correlations between cultural techniques and weed species traits. These simulations will also be used to develop a decision-aid tool for evaluating cropping systems in terms of weed harmfulness and benefits, after questioning future users (scientists, advisors, farmers) to identify pertinent evaluation criteria and model uses. If possible, another tool for designing cropping systems as a function of the user's goals in terms of weed harmfulness and benefits will be developed.

Task 3 will use FLORSYS and its tool progeny to evaluate existing cropping systems identified in past farm surveys, existing farm networks (DEPHY) and cropping system trials (INRA, ARVALIS, SYPPRE project). New cropping systems reconciling reduced herbicide use, agricultural production and biodiversity conservation will be designed by experts (scientists, advisors), and evaluated with FLORSYS and its progeny. Existing and prospective cropping systems will then be improved in a second loop based on their simulated performance in a second loop of conception. Then, the sensitivity of the best strategies to different changes (regulations, socio-technical context, climate, weed flora) will be tested. The best systems will be evaluated by multicriteria analysis (DEXIiPM® and SYSTERRE®) for their economic, environmental and organisational performances. To take account of farmers' objectives and constraints during cropping system design, farmer interviews will be organized to identify obstacles that hinder the adoption of technical innovations.

Task 4 will organize the publication and dissemination of the project results, *via* meetings, website, training sessions on the newly developed tools and weed management strategies for advisors and farmers.

1.2 Tableau récapitulatif des personnes impliquées dans le projet

Partenaires					
Organisme/ Institution	**Nom**	**Prénom**	**Emploi actuel [1]**	**Implication dans CoSAC[2]**	**Rôle & Responsabilité dans CoSAC**
P1 : INRA - Agrosup Dijon, UMR1347 Agroécologie, Dijon	COLBACH	Nathalie	DR	20	**Coordinateur scientifique, porteur T2 et plusieurs sous-tâches**, modélisation des effets des systèmes de culture sur la flore adventice, évaluation et conception de systèmes de culture par simulation
	MOREAU	Delphine	CR	16	**Porteur T1**, **participant T2 T3** analyse des traits des plantes impliqués dans les relations de compétition et la spatialisation des apports d'azote

[1] Nomenclature : DR : directeur de recherche, CR : chargé de recherche, MC : maître de conférences, CE : chargé d'études, RP : responsable de pôle, IE : ingénieur d'étude, IR : ingénieur de recherche, I : ingénieur, C : consultant, P : professeur, Do: doctorand, CDD: contrat durée déterminée

[2] Sur la durée totale du projet

	CORDEAU	Stéphane	CR	12	**Porteur T1.2.3**, **participant T2, T3,** Agronomie systémique au service de la régulation biologique des adventices
	LE CORRE	Valérie	CR	3	**Porteur T2.1.4**, Génétique des populations, modélisation
	DÉLYE	Christophe	CR	2	**T2,** Résistance aux herbicides, biologies des adventices
	DARMENCY	Henri	DR	0.5	**T2,** Résistance aux herbicides, biologies des adventices
	RICCI	Benoît	CR	3	**Porteur T2.1.3**, Écologie spatiale et modélisation de la dispersion à l'échelle supra-parcellaire
	CHAUVEL	Bruno	CR	4	**T1 T3**. Évaluation des effets des techniques innovantes
	GRANGER	Sylvie	MC	6	**T2, T3**. Construction, évaluation de scénarios innovants, enquêtes
	GIBOT-LECLERC	Stéphanie	MC	3	**T2**, Ecologie et biologie de la plante parasite Orobanche rameuse
	GUILLEMIN	Jean-Philippe	MC	6	**T1 T3**, Biologie des adventices et dynamique dans les systèmes de cultures
	GÉE	Christelle	PR	8	**Porteur T1.2.4, participant T2**, Désherbage localisé – agroéquipement, robotique
	JONES	Gawain	MC	12	**Porteur T.2.1.2, participant T1 T3**, Désherbage localisé – agroéquipement, robotique
	VILLETTE	Sylvain	MC	5	**T1, T2**, Désherbage localisé – agroéquipement, robotique
	UBERTOSI	Marjorie	MC		**T1, T2**, sciences du sol
	PUECHLONG	Thomas	Doc	24	**T2**, Analyse de sensibilité, métamodélisation
	LOUARGANT	Marine	Doc	24	**T1** imagerie aérienne, détection adventices
	À recruter		IE CDD	24	**T2**, Informatisation de modèles
P2 : INRA Eco-Innov / GIS HP2E	ANGEVIN	Frédérique	IR	5	**Porteur T3,** Expertise conception/évaluation multicritère, Encadrement CDD, Lien avec les programmes du GIS HP2E
	MESSÉAN	Antoine	DR	0.8	**T3,** Expertise conception/évaluation multicritère, Encadrement CDD, Lien avec les programmes du GIS HP2E
	À recruter		IE	23	**T3,** Réalisation des simulations et des évaluations avec les différents modèles, Animation des groupes de conception
P3 : INRA LAE	BOCKSTALLER	Christian	IR	2	**T2** Passage au paysage: intégration des processus de dispersion, Étendre la gamme des indicateurs d'évaluation de la flore adventice
	VILLERD	Jean	IR	8	**Porteur T2.1.6, T2.2.1, T2.2.2** et **T2.3** fouille de données, indicateurs, outils d'aide à la décision
P4 : INRA, UR1115 PSH Avignon	PAGÈS	Loïc	DR	8	**T1, T2** ; modélisation de l'architecture racinaire
P5 : ACTA	RODRIGUEZ	Alain	IE	4.2	**Porteur T4** responsable RMT Florad, malherbologie, gestion intégrée de la flore adventice, désherbage
	BRUN	François	IE	1	**T2** méthodes d'analyse et d'exploration des modèles; statistiques
P6 : ARVALIS-Institut du végétal	LABREUCHE	Jérôme	IE	0.23	**T1** analyser et quantifier les effets des pratiques agricoles innovantes sur la flore adventice
	METAIS	Pascale	IE	3.64	**Porteur T.1.1**. analyser et quantifier les effets des pratiques agricoles innovantes sur la flore adventice, évaluation des effets des techniques innovantes sur la régulation des adventices
	BONIN	Ludovic	RP	1.42	**Porteur T2.1.5, T1, T2, T3 T4 :** intégration de nouvelles techniques dans FLORSYS, amélioration du module de phénologie, extension de la gamme des indicateurs d'évaluation de la flore adventice, conception de systèmes alternatifs, développement d'outils d'aide à la décision
	VOLAN	Sandrine	IE	1.54	**T1, T2, T3, T4 :** intégration de nouvelles techniques culturales dans FLORSYS, amélioration du module de phénologie, extension de la gamme des indicateurs d'évaluation de la flore adventice, conception de systèmes alternatifs, développement d'outils d'aide à la décision
	VACHER	Catherine	IE	0.46	**T2** amélioration du module de phénologie
	TOQUE	Clotilde	RP	1.59	**T1, T2, T3 :** évaluation des effets des techniques culturales innovantes, intégration de nouvelles techniques culturales dans FLORSYS, conception et évaluation de systèmes de culture
	Ingénieurs	régionaux	I	0.46	**T2 :** amélioration du module de phénologie, plateforme SYPPRE sur 2 sites
P7 : CETIOM	LIEVEN	JEAN	I	1.6	**T1, T2, T4** Agronomie, Chargé d'études sur le désherbage, techniques alternatives aux herbicides. Rédacteur de protocoles, synthèses d'essais, articles techniques
	CADOUX	Stéphane	I	0.4	**T1, T2**, Agronomie, Chargé d'études sur les systèmes innovants (colza associés, dispositifs SYPPRE)
	KAZEMIPOUR	Farzaneh	I	0.5	**T1** responsable de la plateforme d'expérimentation PHENOME, outils issues des technologies de pointes
	RONCEUX	Aïcha	I	12	**T3 :** animatrice programme adventices du GIS HP2E
	SAUZET	GILLES	I	0.2	**T1.1., T2.3**, Agronomie, Ingénieur développement (colza associés, dispositifs SYPPRE)

Sous-traitants et collaborations externes			
UMR SAD-APT INRA / AgroParisTech	LE BAIL	Marianne	**T3, T4** Appui aux enquêtes sur les freins à l'adoption, Appui sur méthode des jeux de rôles
Centre de Recherches de Climatologie – UMR Biogeosciences Dijon	CASTEL	Thierry	**T3** Changement climatique, scénarios climatiques actuels et futurs
	RICHARD	Yves	**T3** Changement climatique, scénarios climatiques actuels et futurs
INRA MIA Jouy	GAUCHI	Jean-Pierre	**T2** Analyse de sensibilité, plans de simulation
Plateforme RECORD (MIA Toulouse)	RAYNAL	Hélène	**T2** intégration de FLORSYS dans la plateforme RECORD, parallélisation calculs
INRA Transfert	POTOK	Stéphanie	**T0** Gestion administrative, logistique et financière **T4** Supports de communication
INRA- UE Dijon-Epoisses	FARCY	Pascal	**T1** Conduite d'essais
InVivo AgroSolutions	DENIEUL	Céline	**T4** Transfert des systèmes innovants vers les agriculteurs
	DIZIEN	Caroline	**T2** Effets des pratiques innovantes sur les pratiques agricoles
ITB	DUVAL	Rémy	**T3** groupe de conception des systèmes de culture des plates-formes SYPPRE
UNIP	CARROUÉE	Benoît	**T3** groupe de conception des systèmes de culture des plates-formes SYPPRE
AIRINOV			**T1** entreprise spécialisée dans l'agridrone pour les survols des parcelles agricoles
Sat-Info			**T1** entreprise spécialisée en signal GPS, guidage des robots

2 Contexte, positionnement et objectif de la proposition détaillée

2.1 Contexte

La production agricole s'est fortement accrue à partir des années 1950, notamment grâce aux intrants chimiques. Aujourd'hui, des raisons environnementales et de santé ont conduit à la mise en place du plan ECOPHYTO en France et de la directive européenne (2009/128) qui visent à réduire les risques et les usages des produits phytosanitaires. Ce contexte nécessite de repenser la gestion des bioagresseurs des cultures, parmi lesquels les adventices ("mauvaises herbes") dont la gestion par des méthodes alternatives est difficile à intégrer dans la conception de systèmes de culture économes en produits phytosanitaires (INRA, 2010)[3]. Les enjeux sont de plusieurs ordres :

1. **Économiques :** Si les adventices peuvent causer d'importantes baisses de rendement et de qualité du fait de leurs effets directs (compétition avec la culture) et indirects (vecteur de maladies, augmentation du temps de travail de l'agriculteur) (Oerke, 2006). Le contrôle des adventices est essentiel pour le maintien de la production agricole, afin de relever le double défi de nourrir une population mondiale toujours croissante et de remplacer les énergies fossiles par des sources d'énergies d'origine agricole.
2. **Agronomiques :** Il n'existe aujourd'hui aucune technique curative aussi efficace que les herbicides[4]. De plus, le nombre d'espèces adventices résistantes aux herbicides augmente continuellement, compliquant le contrôle chimique et amenant parfois à des impasses techniques (http://www.weedscience.org). Pour réduire l'usage des herbicides, il est donc nécessaire de combiner plusieurs techniques de gestion des adventices : préventives et curatives. Ces techniques agissent à moyen et à long terme. En effet, les semences adventices survivent pendant des années dans le sol (Gardarin et al, 2010b) et se dispersent dans les paysages (Menalled *et al*, 2000) ; elles tamponnent ainsi les effets des techniques. Le contexte actuel d'augmentation de fréquences des aléas climatiques et de changement global augmente ces difficultés de gestion des adventices.
3. **Environnementaux :** Les herbicides et leurs dérivés sont les polluants majeurs des eaux de surface et de profondeur (www.ifen.fr). Identifier des leviers de gestion durable des adventices et économes sur les grandes cultures permettrait de diminuer l'usage des herbicides sur de grandes surfaces à l'échelle nationale.
4. **Écologiques :** Les adventices contribuent aux services écosystémiques produits par l'agroécosystème : elles constituent l'essentiel de la biodiversité végétale des paysages agricoles (Petit *et al*, 2011) et représentent une ressource trophique importante pour de nombreuses autres composantes de la biodiversité, dont les pollinisateurs (Marshall *et al*, 2003).
5. **Règlementaires :** Le contrôle des adventices est rendu plus compliqué et risqué (sélection accrue de biotypes résistants) par la réduction du nombre de substances actives disponibles suite au règlement (CE) N°1107/2009 qui régit l'inscription des substances au niveau européen et les homologations des produits au niveau des états membres.

3 Les publications auxquelles les membres du consortium ont participé seront en bleu.
4 À l'exception du désherbage manuel dont les coûts sont prohibitifs dans nos sociétés.

2.2 Les objectifs de CoSAC

L'objectif du projet CoSAC est de concevoir, d'évaluer et de promouvoir des systèmes de culture qui concilient (i) la réduction d'usage des herbicides, (ii) le maintien de la production agricole et (iii) la préservation de la biodiversité, le tout dans un contexte de changement global permanent (des pratiques agricoles, du contexte climatique et dévolution de la diversité des communautés végétales (apparition d'espèces envahissantes). Il est donc nécessaire de :

1. mieux **comprendre et prédire le fonctionnement de l'agro-écosystème**, particulièrement les mécanismes bio-physiques régissant la dynamique des communautés adventices. Vu la complexité des processus en jeu et l'échelle temporelle concernée, l'expérimentation est insuffisante et la modélisation s'avère indispensable. Le projet propose d'utiliser le modèle existant le plus complet du point de vue prise en compte des effets des systèmes de culture, FLORSYS[5] (Gardarin et al, 2012; Colbach et al, 2014), et de l'adapter à ses besoins.
2. **proposer des stratégies de gestion des adventices** adaptées aux contraintes de la profession agricole et répondant au triple enjeu de la durabilité. L'expérience passée a montré que les innovations dont les performances ont été démontrées ne sont pas pour autant adoptées par les agriculteurs (Vanloqueren & Baret, 2008). Par conséquent, les différentes parties prenantes (coopératives, instituts techniques,…) seront associées à la mise au point de nouveaux outils d'aide à la conception de nouvelles stratégies, et à l'identification des verrous à l'adoption de ces stratégies afin de les adapter au mieux aux objectifs et contraintes locaux des agriculteurs.

Pour répondre à ces besoins, le projet mobilisera une ***communauté pluridisciplinaire*** (écologues, agronomes, modélisateurs, biométriciens, informaticiens, écophysiologistes..., voir section 6) issue à la fois de la recherche et du développement, la plupart de ces acteurs étant mobilisés depuis deux ans autour de réflexions communes sur la gestion durable des adventices dans le cadre du groupe "adventices" du GIS GC HP2E[6].

2.3 État de l'art

Les adventices : un bioagresseur nuisible et un pilier de la biodiversité. Les adventices sont toutes les plantes non semées par l'agriculteur dans le champ cultivé, comprenant aussi bien des espèces "sauvages" (par exemple vulpin, folle-avoine, renouée…) que des repousses de plantes cultivées. Les adventices sont considérées comme le bioagresseur le plus nuisible parce qu'elles sont en compétition avec les cultures pour la lumière, l'eau et les nutriments (Oerke, 2006). Elles peuvent aussi propager d'autres bioagresseurs, comme des champignons pathogènes (Wisler & Norris, 2005) (Bonin *et al*, 2013) ou des adventices parasites comme l'orobanche (Gibot-Leclerc et al, 2003). Même à faible densité, les adventices peuvent être nuisibles, en produisant des semences qui survivent pendant plusieurs années (Gardarin et al, 2010b) et qui sont ainsi à l'origine d'infestations dans les cultures suivantes (Jordan, 1992). C'est cet aspect temporel qui rend les adventices si difficiles à gérer.

Les adventices sont aussi un des piliers de la biodiversité. Elles constituent l'essentiel de la biodiversité végétale dans les paysages agricoles (Petit *et al*, 2011) et contribuent à nourrir de nombreux organismes phytophages (insectes, oiseaux, mammifères...) (Marshall *et al*, 2003). Les adventices pourraient même contribuer à réguler d'autres bioagresseurs, en hébergeant ou nourrissant des auxiliaires des cultures ou en étant des plantes pièges ou perturbatrices pour les ravageurs (Altieri & Whitcomb, 1980).

Les adventices annuelles se reproduisent et se dispersent *via* les semences, avec un ou plusieurs cycles de reproduction par an. Les espèces pérennes se reproduisent essentiellement par multiplication végétative (rhizomes, stolons…). En fonction des systèmes de culture et des conditions de milieu, la flore adventice d'un champ est composée de dizaines voire centaines d'espèces différentes ayant des exigences, des comportements et des conséquences agronomiques extrêmement variables (Fried *et al*, 2008). S'y ajoute la variabilité intra-spécifique, notamment la tolérance d'une part grandissante des populations aux herbicides (Délye et al, 2013).

Quelles pratiques agricoles pour gérer la flore adventice? La gestion des adventices économe en herbicides doit maintenir la densité des semences adventices dans le sol à un niveau faible, en combinant l'ensemble des techniques culturales, afin de limiter la levée, le développement et la reproduction des adventices (Bonin, 2009). Outre les

---

5 FLORSYS est un modèle de recherche simulant un champ virtuel à un pas de temps journalier sur plusieurs années, permettant d'évaluer les performances de systèmes agricoles en terme de contrôle de la flore adventice, maintien de la production agricole et préservation de la biodiversité fonctionnelle, et ce dans une large gamme de situations agricoles et pédoclimatiques.

6 GIS GC HP2E : Groupement d'Intérêt Scientifique « Grande Culture à Hautes Performances Économiques et Environnementales ». Il associe 26 partenaires de la recherche, du développement, de la collecte et de la distribution pour instaurer un mode de fonctionnement véritablement coopératif au sein du système de recherche-développement. L'enjeu est d'élaborer et mettre en œuvre des stratégies communes, depuis la recherche de base jusqu'à l'accompagnement des innovations sur le terrain.

méthodes curatives chimiques (herbicides) et non-chimiques (désherbage mécanique...), les leviers agronomiques combinent une large gamme de techniques très diverses (ARVALIS, 2009; Bonin *et al*, 2010; Attoumani-Ronceux *et al*, 2011): la diversification des rotations (alternant des cultures d'hiver, de printemps et d'été et donc des conditions favorables et défavorables aux différents types d'adventices), le *faux semis* (travail du sol estival stimulant des germinations de semences en-dehors des cultures de rente), le labour et d'autres travaux du sol profonds et inversants (enfouissant les semences à une profondeur où elles ne peuvent ni germer ni lever), les retards des dates de semis (laissant le temps aux adventices de lever puis d'être détruites avant le semis de la culture de rente) (Rasmussen, 2004), les fortes densités de semis, de faibles inter-rangs et des variétés "étouffantes" (limitant l'espace et la lumière disponibles pour les adventices). L'UMR Agroécologie a ainsi démontré la possibilité de gérer les adventices en optimisant rotation, travail du sol, date et densité de semis (Chauvel et al, 2009). ARVALIS suit des flores adventices dans son essai micro-fermes combinant des systèmes de culture contrastés (Pottier et al, 2013). Le CETIOM a quantifié, dans différentes situations, les effets des travaux du sol sur les levées d'adventices en interculture (Lieven *et al*, 2013).

Dans CoSAC, il s'agit de compléter cette gamme de techniques en **analysant de nouvelles techniques et combinaisons de techniques** permettant de maîtriser les adventices et de réduire l'usage des herbicides**.** Les guides et outils existants (guide STEPHY, outil web Agro - PEPS[7]) auxquels ont contribué différents partenaires de CoSAC, leurs réseaux expérimentaux et la littérature ont permis d'identifier plusieurs grandes stratégies innovantes : (1) *spatialiser les intrants et les opérations* pour intervenir seulement là où c'est nécessaire, réduisant les coûts et les impacts sur l'environnement, et favorisant les cultures par rapport aux adventices; (2) *optimiser la régulation biologique* des adventices *via* la diversification des couverts cultivés (couverts d'interculture, cultures associées). L'implantation de couverts intermédiaires est d'ailleurs actuellement imposée dans toutes les zones vulnérables (directive Nitrates) pour réduire les fuites de nitrates. Cependant, ces couverts limitent souvent les possibilités de faux semis estival pour gérer les adventices problématiques (Rodriguez, 2013). La situation la plus extrême est le passage au couvert permanent, réduisant le travail du sol au strip-till (travail du sol sur le seul rang de semis) ou passant au semis direct, permettant par ailleurs de réduire les charges de travail et l'érosion des sols dans les régions à risque (Holland, 2004).

La spatialisation des intrants et des opérations. Appliquer les herbicides seulement là où se trouvent les adventices permet de réduire considérablement la consommation de pesticides. Le traitement localisé nécessite le développement de matériels spécifiques pour moduler les apports (Slaughter *et al*, 2008) et des systèmes innovants de détection des adventices, utilisant de nouveaux capteurs non destructifs (spectro-imageur, spectroradiomètre, vision numérique) (Bossu et al, 2008). L'UMR Agroécologie a ainsi commencé à développer un robot de désherbage localisé (Gée et al, 2013) et des méthodes d'analyse d'images pour la détection d'adventices (Jones et al, 2009). La plupart des études existantes se concentrent sur le développement de nouvelles approches de détection des adventices ou de nouveaux systèmes de pulvérisation localisée (Berge *et al*, 2013) mais peu s'intéressent à l'effet sur la maîtrise à long-terme des adventices nuisibles.
Appliquer l'engrais azoté localement, au pied des plantes cultivées, peut être une voie pour maximiser l'efficacité de la fertilisation azotée, réduire les pertes azotées vers l'environnement (Rasmussen, 2002) et de ce fait la consommation d'engrais qui peut être réduite de 10 à 25% selon les conditions pédolimatiques et la nature du précédent (ITB, 2009). Cette technique peut aussi contribuer à gérer les adventices dans les cultures à fort écartement (Rasmussen, 2002; Blackshaw *et al*, 2003). Cependant, elle n'a été étudiée que dans peu de milieux (Kirkland & Beckie, 1998). Les conditions pédoclimatiques et floristiques de son efficacité ne sont donc pas connues précisément.

Les processus impliqués dans la régulation des adventices par les couverts plurispécifiques. À ce jour, peu d'études quantifient et analysent le rôle des couverts et les caractéristiques biologiques rendant les espèces de couverts efficaces pour la régulation des adventices (den Hollander *et al*, 2007)(ARVALIS, 2011). Or, connaître les causes des effets des couverts est essentiel pour apprécier la robustesse des effets observés et adapter les conseils aux conditions locales des agriculteurs. La diversification des couverts, sous forme de couverts d'interculture ou de cultures associées, vise à réguler les adventices en maximisant le prélèvement des ressources du milieu (lumière, azote, eau) par les cultures. Le rôle des processus allélopathiques est mineur. Les couverts plurispécifiques sont particulièrement efficaces car ils valorisent mieux les ressources, notamment lorsque les intrants chimiques sont réduits (Liebman & Dyck, 1993; Corre-Hellou *et al*, 2011). En climat tempéré, c'est la compétition pour la lumière qui est la plus importante, processus

[7] Le guide Stephy d'aide à la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires est accessible à cette adresse : http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE_STEPHYopt.pdf. L'outil Agro-PEPS est ici : http://agropeps.clermont.cemagref.fr/mw/index.php/Accueil.

déjà bien étudié à ce jour. L'UMR Agroécologie a ainsi modélisé la compétition pour la lumière dans le modèle FLORSYS, et ce pour une large gamme d'espèces adventices et de cultures de rente (Munier-Jolain *et al*, 2013; Colbach *et al*, 2014; Munier-Jolain *et al*, 2014).

La compétition pour les ressources du sol, notamment l'azote, est moins bien connue alors que l'azote est une ressource majeure pour laquelle les cultures et les adventices sont en compétition (Valantin-Morison & Meynard, 2008). Cette compétition dépend de différents processus : (1) l'architecture racinaire des espèces en compétition qui détermine le volume de sol exploré et donc la quantité d'azote accessible à la plante (Hodge *et al*, 2009); elle est peu connue pour les adventices. L'UMR PSH a récemment développé un modèle d'architecture racinaire des cultures (Pagès, 2011), et son application aux adventices, dont l'architecture racinaire est peu modélisée, a débuté en collaboration avec l'UMR Agroécologie (Pagès et al, 2014) ; (2) la demande en azote des espèces, aujourd'hui prédictible pour des couverts monospécifiques grâce au concept de la courbe critique de dilution de l'azote (Lemaire & Salette, 1984), mais pas pour une plante insérée dans un couvert plurispécifique. Une piste est actuellement testée dans le projet INNi dans lesquel l'UMR Agroécologie est impliquée, considérant la surface foliaire comme indicateur de la demande en azote (Lemaire *et al*, 2005) ; (3) la capacité des espèces à valoriser l'azote absorbé pour étendre leur surface foliaire, et ainsi augmenter leur photosynthèse et leur capacité à faire de l'ombre aux plantes voisines. À ce jour, la réponse morphologique d'une gamme d'espèces cultivées et adventices à la disponibilité en azote du sol est documentée pour de nombreuses espèces cultivées mais pour quelques espèces adventices seulement (Blackshaw *et al*, 2003) (Moreau et al, 2013).

Les changements dus au semis direct. Les rares expérimentations analytiques en conditions tempérées croisant travail du sol et type de culture intermédiaire sont actuellement menées par ARVALIS et le CETIOM et très peu d'études au champ se sont intéressées aux caractéristiques biologiques des espèces adventices adaptées au non travail du sol (Chassine et al, 2009; Trichard et al, 2013). Or, l'arrêt du travail du sol (interdisant faux semis, enfouissement des semences, et désherbage mécanique) change radicalement les conditions biophysiques auxquelles sont exposées les adventices.

Le non travail du sol change la structure du sol et les conditions hydrothermiques (Hill, 1990) (Ugarte et al, submitted), qui sont des paramètres cruciaux pour la germination et levée des adventices (Gardarin et al, 2010a; Guillemin et al, 2013). Les semences adventices restent en surface où elles sont exposées à des conditions physiques différentes des semences enfouies, certaines favorisant la germination (lumière, alternances de température et d'humidité), d'autres l'inhibant (faible contact terre-semence, risque de desséchement ou de gel), d'autres encore avec un effet incertain comme le mulch (protection des aléas climatiques et barrière physique pour la levée). Les premiers travaux de l'UMR Agroécologie montrent que la germination et la levée sont bien affectées par le non travail du sol, mais avec des effets dépendant des espèces (Reibel et al, 2010). Enfin, l'absence de travail du sol expose les semences à la prédation (Bohan *et al*, 2011) et réduit la perturbation des prédateurs (Baraibar *et al*, 2009), des processus actuellement étudiés dans le projet Peerless.

Quelles méthodes pour évaluer et concevoir des systèmes de culture? Ces techniques innovantes ne peuvent cependant pas être considérées seules puisqu'à ce jour aucune méthode alternative de contrôle des adventices n'est aussi efficace et robuste que les herbicides. En effet, les stratégies de gestion des adventices économes en herbicides doivent systématiquement combiner l'ensemble des composantes du système de culture pour aboutir à une gestion intégrée souvent appelée "many little hammers" (Liebman & Gallandt, 1997).

Plusieurs méthodes existent pour concevoir de nouveaux systèmes de culture (Loyce & Wéry, 2006) : (1) le **diagnostic agronomique**, avec des mesures au champ et des enquêtes en exploitations agricoles (Doré *et al*, 2008) ; (2) **la conception à dires d'experts** et test des prototypes au champ (Lançon *et al*, 2007) ; et (3) les **approches *in silico*** testant une large gamme de systèmes agricoles pour identifier ceux répondant aux objectifs, ce qui peut requérir des méthodes d'optimisation pour améliorer pas à pas les systèmes initiaux (Bergez et al, 2010). Les deux premières méthodes ne sont pas adaptées au projet CoSAC : le diagnostic agronomique ne permet pas d'évaluer des alternatives aux systèmes diagnostiqués; le test expérimental des prototypes conçus par les experts limite sévèrement la gamme de systèmes évaluables et ne permet pas d'apprécier les effets long-terme particulièrement importants dans le cas des adventices; aucune de ces deux méthodes ne permet d'apprécier des contextes de changement, notamment du climat ou de la flore adventice. Des modèles et outils quantifiant les effets des systèmes de culture sur la flore adventice, sa nuisibilité et ses bénéfices, sont donc indispensables.

Les modèles permettent en effet de (1) représenter et ordonner les hypothèses concernant les processus en jeu dans un système complexe, (2) de synthétiser les connaissances acquises et de souligner les lacunes

éventuelles, (3) d'explorer des scénarios d'évolution dans différents contextes, (4) de favoriser les apprentissages individuels et collectifs en utilisant les modèles comme outils de débat (Jeuffroy et al, 2008). La participation des utilisateurs potentiels des modèles et outils est essentielle pour leur utilisation effective, et ce dès la phase de conception pour une adaptation réciproque de ces outils et de l'activité de leurs utilisateurs.

Quels modèles pour prédire la flore adventice dans les systèmes de culture ? Parmi les nombreux modèles de dynamique adventice existants (Holst *et al*, 2007), FLORSYS (Gardarin et al, 2012; Munier-Jolain et al, 2013; Colbach et al, 2014; Munier-Jolain et al, 2014) est aujourd'hui le seul modèle quantifiant les effets des systèmes de culture (succession culturale, techniques culturales en termes d'outils, options et dates) sur la dynamique d'une flore adventice plurispécifique avec un pas de temps journalier, en interaction avec le pédoclimat, permettant ainsi de prédire les effets moyens des pratiques agricoles ainsi que la variabilité de ces effets (Colbach, 2010). Le cœur de ce modèle est une succession de stades du cycle de vie des adventices (ex. semences dormantes, germées, plantules levées...), et l'effet des techniques culturales est décomposé en effets individuels (ex. travail du sol = mouvements de semences, structure du sol, pénétration de la lumière, levée de dormance...). Le couvert plurispécifique culture-adventices est modélisé en 3D, avec une représentation individu-centré pour intégrer la plasticité morphologique des adventices.

Malgré sa complexité, FLORSYS ne présente cependant pas encore toutes les caractéristiques requises, ayant été développé à l'origine pour des parcelles travaillées, semées avec des cultures de rente en conditions non-limitantes d'eau et d'azote. Sa nature mécaniste et sa structure modulaire sont un atout pour **l'intégration des techniques culturales innovantes et des processus** manquants. L'introduction des plantes de couverture dans FLORSYS nécessitera tout d'abord le paramétrage des fonctions déjà existantes de la compétition pour la lumière pour les espèces de couverture, puis le développement d'un module d'architecture racinaire couplé avec des fonctions d'absorptions et d'utilisation d'azote. Il existe aujourd'hui des approches individu-centrées pour l'architecture racinaire des plantes cultivées (Pagès et al, 2013), mais trop détaillées pour être intégrées dans un modèle pluriannuel. Une représentation simplifiée du volume racinaire, similaire à celle utilisée pour le volume aérien (Munier-Jolain et al, 2013) sera développée, à partir de simulations réalisées avec des modèles architecturaux complexes comme ArchiSimple (Pagès et al, 2014) ("métamodélisation").

À ce jour, la seule variabilité intraspécifique considérée par FLORSYS est la plasticité morphologique en réponse à l'ombrage, négligeant une cause de variabilité majeure que constitue l'apparition de la résistance aux herbicides (Délye et al, 2013). De nombreux modèles traitent de la résistance aux herbicides, avec des approches très détaillées de génétique des populations (e.g. Renton *et al*, 2011), souvent au détriment des effets du système de culture. Les rares modèles combinant génétique et facteurs agronomiques sont tous monospécifiques et ne considèrent que la résistance liée à la cible[8] (Colbach et al; Colbach, 2009) alors que l'essentiel des résistances observées n'est pas liée à la cible (Délye et al, 2013).

Évaluer un modèle ("valider") est essentiel pour confirmer les choix de modélisation, déterminer le **domaine de validité du modèle et estimer son incertitude et son erreur de prédiction**. Une des méthodes existantes vise à comparer les simulations du modèle à des observations de terrain dans des contextes agricoles et pédoclimatiques variés (Wallach, 2006). Cette étape est à ce jour rare pour les modèles de dynamique adventice (Holst *et al*, 2007), notamment à cause d'un manque de données. L'UMR Agroécologie adapte actuellement des méthodologies de validation existantes, développées pour des modèles plus simples (Wallach, 2006), au cas de modèles complexes comme FLORSYS (Colbach et al, in preparation). Les premiers résultats indiquent notamment qu'il est nécessaire d'intégrer l'effet de la latitude sur la date de floraison des adventices (par ex, via la longueur du jour, Habekotté, 1997) pour étendre son domaine de validité.

Spatialiser pour mieux prédire et évaluer. Les modèles de dynamique spatialement explicites intégrant les effets des systèmes de culture sont rares et tous monospécifiques (Colbach, 2009). La prise en compte de l'échelle supra-parcellaire est pourtant essentielle pour les adventices qui se dispersent au-delà des limites d'une parcelle (Benvenuti, 2007). Les pratiques agricoles d'une parcelle donnée peuvent ainsi influencer la flore adventice d'une autre parcelle (Alignier et al, 2013), soit parce qu'elle se situe à proximité (dispersion naturelle), soit parce qu'elle échange des semences *via* des vecteurs anthropiques (machines agricoles notamment).

[8] La résistance de cible évolue par sélection de mutations dans le gène codant pour la cible de l'herbicide (en général une enzyme clé du métabolisme) qui rendent cette cible insensible. La résistance non liée à la cible peut faire intervenir de multiples mécanismes, tels que la détoxication de l'herbicide. On pense qu'elle évolue via des modifications de la régulation et de l'expression de plusieurs gènes distincts du gène de la cible.

La seule variabilité spatiale actuellement intégrée dans FLORSYS est la variabilité à l'intérieur du champ, avec la représentation plurispécifique, 3D et individu-centrée du couvert. Restent à y ajouter à cette échelle des algorithmes pour spatialiser les effets des techniques comme les herbicides, l'azote ou le travail du sol (ex. Forcella & Lindstrom, 1988). La prise en compte de la spatialisation supra-parcelle est plus complexe. Récemment, une méta-analyse a lié les distances de dispersion naturelle des semences à des traits d'espèces (Thomson *et al*, 2011). Il existe aussi des résultats sur la dispersion le long des routes (Garnier *et al*, 2008) mais la quantification des échanges entre parcelles agricoles par le matériel agricole reste encore à faire.

Les modèles pluriparcellaires sont aussi plus adaptés pour évaluer les stratégies de gestion en termes de conciliation de production et de biodiversité (Makowski *et al*, 2007). La performance varie en effet entre les différentes cultures d'un système de culture; c'est leur combinaison au cours du temps dans un champ donné, et dans l'espace sur un îlot de parcelles qui donne la performance globale du système. De plus, on peut combiner des systèmes de culture pour compenser les déficiences d'un champ par ses voisines, permettant de concilier production et biodiversité au niveau de l'îlot sans le réaliser dans chaque champ, à condition que l'organisme-cible soit mobile (ex. oiseaux), que les pratiques n'affectent pas les champs voisins (ex. insecticides) et que les variations soient suffisamment faibles pour être compensables (ex. l'agriculteur a besoin d'une stabilité de rendement et de revenu).

Des outils pour évaluer et concevoir des stratégies de gestion de flore adventice. Les modèles de dynamique complexes comme FLORSYS jouent le rôle de "champ virtuel" dans lequel les chercheurs testent de nombreux systèmes de culture, avec de nombreuses variables "mesurées" sur les cultures, les adventices et le milieu. Du fait de sa complexité, FLORSYS est un outil difficile à manier (temps de calcul, multiplicité des variables à renseigner et à analyser, absence d'interface graphique…). Ceci limite son utilisation par les chercheurs et la profession (instituts techniques, conseillers, agriculteurs...), demandeurs d'outils simples pour tester et élaborer des stratégies de gestion des adventices. Il existe certes des outils d'aide à la décision plus simples pour la gestion de la flore adventice mais ceux-ci optimisent le désherbage chimique (DECID'herb, Munier-Jolain et al, 2005) ou bien classent simplement des types de systèmes de culture en fonction d'un potentiel de risque d'enherbement moyen dans le Nord de la France (ODERA-systèmes[9]).

Plutôt que de développer des nouveaux outils *de novo*, une solution est la transformation de FLORSYS en un outil plus simple et adapté à l'aide à la décision. Une première adaptation de FLORSYS consistera à agréger et traduire les multiples sorties décrivant la flore adventice en indicateurs agri-environnementaux (Bockstaller et al, 2009) qui fournissent des éléments pour une prise de décision par les acteurs (gestionnaires, évaluateurs) (Mitchell *et al*, 1995). Les UMR Agroécologie et LAE ont déjà développé, en interaction avec les acteurs (écologues, agriculteurs), puis connecté à FLORSYS une série d'indicateurs de nuisibilité (ex. perte de rendement, contamination des récoltes) et de bénéfice (ex. richesse spécifique, ressources trophiques pour abeilles) liées à la flore adventice (Ricou et al, 2014; Mézière et al, in revision).

Une autre simplification consiste à développer un méta-modèle ou émulateur[10] à partir de FLORSYS. Cette approche n'a jamais été appliquée pour des modèles des effets des systèmes de culture sur des bioagresseurs, mais a déjà été utilisée dans d'autres disciplines (e.g. Brooks *et al*, 2001). Une telle approche nécessite (1) de réaliser une analyse de sensibilité, i.e. des expérimentations in silico dans toutes les conditions pertinentes pour les utilisations futures du modèle, puis (2) d'ajuster des modèles statistiques (régressions, arbres de régression, random forests) afin de calculer des indices de sensibilité puis de lier les variables d'entrée et de sortie significatives, pertinentes pour nos objectifs, et éventuellement transformées et/ou agrégées. Vue la complexité de FLORSYS, cette approche nécessite des développements méthodologiques comme l'adaptation de plans d'expériences dits optimaux (connus dans le monde des expériences au champ) à la problématique de la réalisation de simulation avec des modèles numériques (Conti & O'Hagan, 2010; Faivre *et al*, 2013). Une analyse de sensibilité contribue aussi directement à l'identification de stratégies innovantes de gestion d'adventices puisqu'elle balaie un large ensemble de systèmes de culture et en évalue les performances (Bergez et al, 2010).

Un tel modèle permettra une évaluation multicritère des systèmes de culture en termes de nuisibilité et de bénéfices résultant de la flore adventice. Cependant, il ne fait pas de la conception de systèmes de culture *sensu stricto*, c'est-à-dire il ne propose pas des systèmes de culture candidats répondant à un ensemble d'objectifs et de

[9] http://agtrt.nnx.com/odera/modemploi.php

[10] Terme provenant de l'informatique: programme/logiciel ou outil électronique qui imite un autre programme/logiciel ou outil.

contraintes agronomiques et/ou écologiques. Une solution sera d' "inverser"[11] cet outil d'évaluation pour obtenir un outil proposant des systèmes de culture candidats répondant à des objectifs, (conception de systèmes de culture).

De l'évaluation multicritère de la flore adventice vers l'évaluation multicritère des systèmes de culture. FLORSYS et les outils développés à partir de ses simulations permettent d'évaluer *in silico* des techniques et stratégies innovantes, sous différents scénarios de changement (réduction d'usage d'herbicides et du travail du sol, introduction de bandes enherbées, apparition d'espèces envahissantes, changements climatiques...), puis de concevoir de nouveaux systèmes de culture répondant à des objectifs contrastés (réduction de l'usage des herbicides, maintien de la production, préservation de la biodiversité). Cependant, les agriculteurs ne considèrent pas seulement la flore adventice dans leur prise de décision. D'autres indicateurs et outils seront donc nécessaires pour évaluer les systèmes de culture quant à leurs performances économiques, environnementales et organisationnelles de façon à estimer leur durabilité globale, par exemple DEXiPM (Pelzer et al, 2012) et SYSTERRE (Jouy & Tournier, 2011).

Comment intégrer le changement climatique? Il sera aussi nécessaire d'évaluer la robustesse des stratégies de gestion d'adventices face aux aléas climatiques, notamment dans un contexte de changement climatique. Des simulations à l'aide de modèles biotechniques et de scénarios climatiques actuels et futurs ont ainsi déjà été utilisées pour analyser la variabilité des rendements de culture (Asseng *et al*, 2013), notamment dans le projet CLIMATOR (Brisson & Levrault, 2010). Il existe aujourd'hui quatre trajectoires, également appelées "representative concentration pathways" (RCPs), d'évolution possible du climat (Moss *et al*, 2010). La simulation de climats pour ces trajectoires avec des modèle couplés de circulation générale comme Arpege-Climat (Voldoire *et al*, 2013) produit des climats résolus à la maille ~ 200km qui nécessitent d'être désagrégés à l'échelle des territoires pour des études d'impact comme celle de CoSAC (Castel et al, 2010). La méthode de régionalisation dynamique utilisant le modèle climatique régional ARW/WRF (Skamarock *et al*, 2008) a ainsi été validée pour la région du Grand-Est de la France (Castel et al, 2010; Xu et al, 2012) et prédit les variables journalières pour FLORSYS.

Le rôle des acteurs dans le développement d'outils et la conception de systèmes de culture. L'intégration des acteurs (conseillers, agriculteurs) sera une étape-clé dans CoSAC lors du développement des indicateurs et des outils d'évaluation et de conception de systèmes de culture, pour faciliter par la suite la prise en main de ces outils et l'appropriation des résultats produits (Cerf *et al*, 2012). Ce point est souvent négligé par les modélisateurs, aboutissant ainsi à des modèles peu utilisés hormis par leurs concepteurs (Prost, 2008).

L'intégration des acteurs est aussi centrale lors de la conception de systèmes de culture elle-même pour assurer l'adoption de nouvelles stratégies de gestion des adventices par la profession. En effet, l'expérience passée a montré que les innovations dont les performances ont été démontrées ne sont pas pour autant adoptées par les agriculteurs (Meynard *et al*, 2013). Ce danger est d'autant plus grand lors d'une conception à partir d'expérimentations *in silico*, nécessaire ici. Il est donc indispensable d'associer acteurs et modèles, (1) en identifiant les freins des agriculteurs à l'adoption de stratégies alternatives à l'usage d'herbicides mais aussi les leviers qu'ils proposent, (2) en réalisant un diagnostic de situations réelles identifiées en exploitation agricole et en expérimentations systèmes dont les performances seront évaluées avec des modèles multicritères (FLORSYS, DEXiPM) pour connaître leurs forces et leurs faiblesses ; (3) en mobilisant l'expertise des acteurs lors de groupes de conception de prototypes combinant acquis du projet sur les techniques innovantes, freins, leviers, éléments de trajectoires identifiés lors des étapes précédentes ainsi que les résultats des expérimentations *in silico* (Craheix *et al*), (4) en optimisant la diffusion des résultats en associant la profession dès la conception des modèles, outils et systèmes de culture.

2.4 Positionnement du projet

2.4.1 Pertinence et caractère stratégique du projet au regard des orientations de l'appel

Les enjeux auxquels répond le projet sont explicités largement au chapitre 2.1, et résumés ci-dessous. CoSAC est proposé en réponse au défi "Sécurité alimentaire et défi démographique" et à l'axe "Productions durables". En effet, il répond à l'objectif de mieux gérer et utiliser les services des écosystèmes en maintenant des niveaux **de** production optimum. Il est centré sur la gestion des adventices, bioagresseurs majeurs des systèmes agricoles, mais aussi source de biodiversité dans les paysages agricoles et ressource trophique importante pour la biodiversité animale en grandes cultures - grandes cultures qui fournissent l'essentiel des produits alimentaires en Europe et

[11] "Inverser" revient ici à transformer un modèle prédisant une flore adventice en fonction de variables système de culture en un modèle listant les modèles système de culture permettant d'obtenir une flore adventice donnée.

constituent des ressources pour la production d'énergie verte.

L'objectif majeur du travail proposé est la conception de stratégies de gestion des adventices mobilisant des combinaisons innovantes de pratiques en conciliant contrôle du bioagresseur, réduction d'usage des produits phytosanitaires (dans le respect des objectifs du plan Ecophyto), maintien des niveaux de production et préservation de la biodiversité et des services rendus. Les performances de ces stratégies innovantes seront évaluées dans une optique de durabilité de manière multicritère (performances environnementales, économiques, sociétales,…).

Dans une moindre mesure, le projet contribue aussi au défi "Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique" *via* la proposition de systèmes agricoles économes en intrants non renouvelables (herbicides, azote minéral...) et la compréhension du fonctionnement de l'agroécosystème à différentes échelles temporelles et paysagères pour prévoir leurs performances sous différents scénarios de gestion, mais aussi *via* l'exploration de l'impact de différents scénarios climatiques sur l'évolution et la gestion des flores adventices.

L'instrument de financement sollicité (projet collaboratif en partenariat public-privé) est en lien avec les caractéristiques du partenariat du projet, qui regroupe à la fois des scientifiques reconnus dans différents domaines (écologie, agronomie, modélisation), et aussi des parties prenantes du domaine du développement : instituts techniques, coopératives, et différents réseaux spécialisés (GIS GC HP2E, RMT FLORAD[12]).

2.4.2 CoSAC en relations avec des projets européens et nationaux passés et actuels

CoSAC s'inscrit dans le panorama de plusieurs projets passés et actuels des partenaires. Plusieurs projets concernent des processus et outils particuliers : PHERAFAB[13] (Casdar, 2014-2017) étudie les associations culturales comme moyen de contrôle de l'adventice parasite orobanche; RHIZOPOLIS (GFP, Fondation Agropolis, 2011-2014), EUROOT (FP7 KBBE.2011.1.2-05, 2012-2015) et un Pari scientifique INRA-EA (2012-2013) s'intéressent aux méthodes, outils et prédictions de l'architecture racinaire; FLINT (FP7-KBBE-2013-1.4-12, 2013-2016), EQUIPE (PSPE Ecophyto, 2013-2015) et INDIBIO (Casdar, 2011-2014) se concentrent sur le développement et la validation d'indicateurs, notamment de biodiversité. Vigiweed (ANR OGM, 2008-2010) inventoriait et établissait des liens entre pratiques agricoles et adventices françaises. CLIMATOR (ANR VMC, 2007-2010) étudiant l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés, à l'aide de modèles agronomiques et climatologiques.

D'autres projets considèrent le système de culture dans son ensemble, avec pour finalité de proposer de nouvelles stratégies de gestion. PEPITES[14] (ANR SYSTERRA, 2009-2013) étudiait les processus écologiques, d'innovation technique et sociale, pour évaluer et concevoir des systèmes techniques adaptés à l'agriculture de conservation. Advherb[15] (ANR Systerra, 2008-2012) et AgrobioSE[16] (ANR Agrobiosphère, 2013-2017) se concentrent sur le rôle de la biodiversité fonctionnelle dans l'agroécosystème et les services rendus par les adventices, avec l'objectif d'identifier les facteurs (biologiques, agronomiques) influençant les adventices pour contribuer à l'élaboration de stratégies de réduction des herbicides. Le CASDAR InnovAB[17] (2014-2016), dont l'UMR Agroécologie et ARVALIS sont partenaires, adresse des questions similaires en agriculture biologique.

Le projet Ecophyto-FlorSys[18] (APR Pesticides Ecophyto, 2013-2015) analyse et modélise les effets des systèmes de culture sur la flore adventice et un cortège de composantes biotiques associées, puis utilise ces modèles et indicateurs pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture économes en herbicides. **CoSAC** ira au-delà, en étudiant de nouveaux processus et surtout, en intégrant les partenaires techniques et la profession en général, profitant de réseaux existants comme les RMT SDCi[19] et Florad et le GIS GC HP2E. Au niveau européen, **CoSAC** s'appuie des résultats (fonctionnement de l'agroécosystème, modélisation, conception-évaluation de systèmes de culture) de ENDURE[20] (EU FP6 Network of Excellence, 2007-2010) et PURE[21] (EU FP7, 2007-2013), interagit

[12] Réseau Mixte Technologique "Gestion de la flore adventice en Grande Culture". Ce réseau mobilise différents acteurs de la recherche, du développement et de l'enseignement agricole (dont CETIOM, Arvalis, AgroSup Dijon et InVivo); il est co-animé par l'ACTA et l'UMR Agroécologie.
[13] Les projets auxquels ont participé ou participent des membres du consortium sont en bleus.
[14] http://www.projet-pepites.org/projet/resume
[15] http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/ADVHERB_cle081eed.pdf
[16] http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-13-AGRO-0001
[17] http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/casdar2013_INNOVAB_cle8e5736.pdf
[18] http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/FLORSYS_cle0b917a.pdf
[19] http://www.systemesdecultureinnovants.org/moodle/
[20] http://www.endure-network.eu/what_is_endure
[21] http://www.pure-ipm.eu/

avec AMIGA[22] (EU-FP7, 2011-2015) pour la modélisation (FLORSYS, pluriparcellaire, résistance aux herbicides) et l'évaluation *in silico* d'innovations techniques (indicateurs de biodiversité pour FLORSYS). **CoSAC** contribuera également à IWMPRAISE (déposé au H2020 SFS23) qui portera les objectifs et méthodes de **CoSAC** au niveau européen, en les complétant avec des processus (espèces envahissantes, outils de désherbage mécanique...) et méthodes (réseaux de parcelles agricoles...) en fonction des spécificités des autres partenaires, avec pour finalité la proposition de solutions opérationnelles de gestion intégrée des adventices.

2.5 Résultats attendus dans CoSAC

2.5.1 Une meilleure connaissance des traits des adventices et des mécanismes impliqués dans les impacts des pratiques agricoles

CoSAC vise tout d'abord à identifier et à quantifier les effets sur la flore adventice des techniques et combinaisons de techniques innovantes permettant de réduire l'usage des herbicides, telles que (1) la spatialisation des techniques à l'intérieur de la parcelle (traitement herbicide et fertilisation azotée localisés), (2) la diversification des couverts (couverts d'interculture, associations d'espèces), (3) le non travail du sol. L'hypothèse est que ces techniques permettent de réduire l'usage des intrants chimiques et de profiter des régulations biologiques pour contrôler les adventices nuisibles. Il s'agit ensuite d'analyser et de quantifier les effets de ces techniques sur la flore adventice et d'analyser les processus biophysiques impliqués (détection des adventices, architecture racinaire, demande azotée des adventices,...) à l'aide d'expérimentations (en serre, plateforme de phénotypage haut-débit, champ) afin de : (1) évaluer la robustesse des effets des techniques dans différentes gammes pédoclimatiques et de flores adventices, (2) améliorer les techniques culturales en optimisant les interactions biologiques et les processus physiques impliqués, (3) préparer la modélisation des effets, en identifiant les techniques les plus pertinentes à modéliser et les processus, variables et paramètres à intégrer.

2.5.2 Un modèle complexe "champ virtuel" et des outils simples pour évaluer et concevoir les systèmes de culture

La modélisation est indispensable pour quantifier et synthétiser les effets des pratiques culturales sur la dynamique et la composition de la flore adventice à différentes échelles spatio-temporelles, en raison des effets à long-terme des techniques culturales, de la variabilité de ces effets en fonction des pratiques associées et des conditions pédoclimatiques, de la multitude et de la diversité des techniques et des espèces adventices impliquées, de la nécessité d'intégrer l'impact d'évènements futurs tels que les évolutions du climat. De fait, FLORSYS apparaît comme le point de départ le plus adapté. Il sera amélioré en intégrant des techniques culturales innovantes, des processus et indicateurs manquants grâce à de nouvelles expérimentations et de bases de données de la littérature existantes. Une attention particulière sera portée à la modélisation de la variabilité des opérations culturales et des populations adventices (spatialisation intra et supra-parcellaire, variabilité intra-spécifique avec la résistance aux herbicides). Pour être opérationnel, FLORSYS devra être évalué pour déterminer son domaine de validité, estimer son incertitude et son erreur de prédiction. Il servira ensuite de champ virtuel pour réaliser des expérimentations virtuelles afin de construire des outils plus simples d'utilisation, en combinant analyse de sensibilité, fouille de données et interaction avec la profession.

2.5.3 Des stratégies de gestion conciliant production agricole, réduction des intrants et biodiversité

FLORSYS et les outils issus de FLORSYS serviront ensuite à **évaluer *in silico*** des techniques et des stratégies innovantes, sous différents scénarios de changement (réduction d'usage d'herbicides et du travail du sol, introduction de bandes enherbées, apparition d'espèces envahissantes, changements climatiques...), puis à identifier les systèmes de culture répondant à des objectifs contrastés (réduction de l'usage des herbicides, maintien de la production, préservation de la biodiversité), en partant 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) qui seront améliorées pas à pas en fonction des résultats d'évaluation. Les meilleures solutions seront ensuite évaluées quant à leurs performances économiques, environnementales et organisationnelles de façon à estimer leur durabilité globale, en utilisant des outils d'évaluation multicritère.

2.5.4 Une meilleure compréhension et prise en compte des freins à l'adoption des pratiques proposées

L'implication de partenaires pluri-secteurs dans cette phase facilitera la communication sur les stratégies les plus efficientes en termes de performances économiques et écologiques, avec (1) des enquêtes auprès des agriculteurs

[22] http://www.amigaproject.eu/

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, (2) l'implication des partenaires techniques lors de la conception de systèmes de culture, (3) l'utilisation des outils dans le cadre de jeux de rôle ou de formations avec des agriculteurs pour discuter de la mise en œuvre concrète des stratégies les plus performantes *a priori* et déterminer les modalités efficaces de transfert sur le terrain.

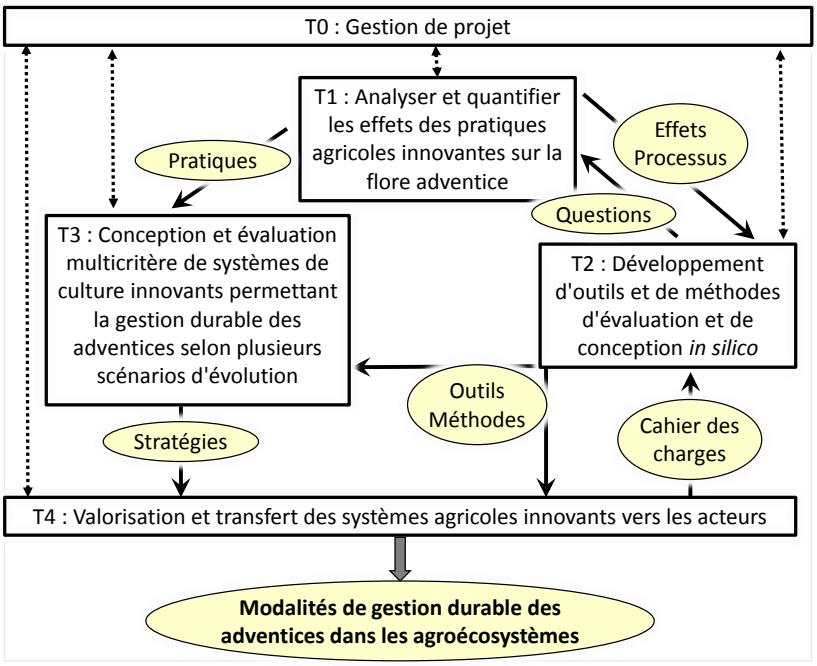
2.5.5 Une diffusion large des résultats acquis

L'implication des partenaires techniques sera cruciale lors de la diffusion, auprès d'un public large, des outils et méthodes développés dans le projet, ainsi que des stratégies les plus efficaces de gestion des adventices, en s'appuyant sur des réseaux existants (ex. RMT FLORAD, GIS GC HP2E), lors de la formation *via* les lycées agricoles impliqués dans le RMT et le réseau des coopératives *via* InVivo. Différentes formes de valorisation pourront être envisagées : fiches 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, plateforme ECOPHYTOPIC…

3 Programme scientifique et technique, organisation du projet

Le projet CoSAC est structuré en quatre tâches scientifiques principales :

- T1 : Analyser et quantifier les effets des pratiques agricoles innovantes sur la flore adventice. Cette tâche regroupe les travaux expérimentaux visant à évaluer les effets des techniques innovantes dans les conditions du champ (tâche T1.1) et à analyser les processus responsables de ces effets, avec des expérimentations au champ et en conditions contrôlées (tâches T1.2.x),
- T2 : Développer des outils et des méthodes d'évaluation et de conception *in silico* de stratégies de gestion d'adventices. Cette tâche regroupe les travaux de modélisation et est subdivisée en sous-tâches correspondant aux points particuliers à améliorer et évaluer dans le modèle "champ virtuel" FLORSYS, à partir des résultats de la tâche 1, de résultats d'autres projets (T2.1.2-2.1.5) et d'interaction avec la tâche 4 (T2.1.6). Ce modèle servira ensuite à réaliser des expérimentations virtuelles pour établir des corrélations entre techniques culturales d'une part, densités et traits d'adventices d'autre part (T2.2) puis pour développer des nouveaux outils plus ergonomiques pour l'évaluation de systèmes de culture en termes de nuisibilité et bénéfice de la flore adventice, et si possible, des outils pour concevoir des nouveaux systèmes de culture (T2.3).



- T3 : Conception et évaluation multicritère de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices dans un contexte de changement (climat, usage des terres, pratiques agricoles, biodiversité). Cette tâche tentera d'identifier les freins à l'adoption d'innovations de gestion des adventices par les agriculteurs (T3.1), puis utilisera les outils développés dans la T2 pour évaluer des systèmes de culture actuels (T3.2) et prospectifs conçus par des experts (T3.3), à partir des résultats des expérimentations réelles (T1.1) et virtuelles (T2.2) en interaction avec la profession (T4), puis estimera leurs performances globales à l'aide d'outils d'évaluation multicritère de la durabilité
- T4: Valoriser et transférer les systèmes agricoles innovants vers les acteurs (agriculteurs, conseillers). Cette tâche formera les acteurs aux systèmes de culture conçus dans la T3 et aux outils produits par la T2.3.

3.0 Tâche 0: Management du projet

Responsable T0 : Nathalie Colbach **(Agroécologie), sous-traitant : INRA Transfert**

L'objectif de cette tâche est d'animer et d'organiser les relations entre partenaires, de s'assurer de la mise en place et du bon fonctionnement des tâches du projet. Les aspects scientifiques (objectifs, animation pluridisciplinaire inter- et intra-tâches) seront gérés par la coordinatrice du projet en relation avec les responsables de tâches, ayant tous une expérience de coordination de projets de recherche, workpackages ou réseaux. Les aspects opérationnel, administratif et financier de la gestion du projet seront pris en charge par INRA Transfert (filiale de l'INRA spécialisée dans la gestion de projets de la recherche nationale, européenne et de développement).

Le plan de coordination globale vise à assurer : (1) Le **suivi des résultats scientifiques et techniques** du projet pour garantir leur qualité scientifique au regard des objectifs prévus et de l'état de l'art international, du respect des dates de remise des livrables, des délais de réalisation des travaux et de consommation des ressources ; (2) La **gestion transparente et efficace des évolutions** qui seront certainement nécessaires compte tenu de l'évolution rapide des technologies dans des domaines d'importance pour le projet ; (3) La **préparation des rapports financiers et techniques** pour l'ANR.

La coordination du projet s'articulera autour de :

- Un **comité de pilotage** mis en place dans le premier mois du projet. Il sera composé de la coordinatrice du projet, des responsables de tâches et de sites d'essais. Le comité de pilotage se réunira au moins tous les 6 mois (de préférence par conférence téléphonique ou visioconférence) pour suivre l'avancement des travaux scientifiques et des questions budgétaires et administratives
- Un **comité consultatif scientifique** composé de chercheurs extérieurs au projet, représentants de filières, responsables institutionnels,…) qui seront invités aux séminaires annuels afin de faire bénéficier le projet de leur expertise et vision critique.
- Des **séminaires annuels** de présentation des résultats, couplés avec les réunions du comité consultatif.

Dans un souci de gestion efficace du projet, un espace de travail collaboratif sera mis en place pour partager des documents administratifs et scientifiques (bibliographie par ex.), des informations sur les progrès réalisés dans les différentes tâches (livrables…), les relevés de conclusions des réunions du comité de pilotage, comité consultatif.

3.1 Tâche 1. Analyser et quantifier les effets des pratiques agricoles innovantes sur la flore adventice

Responsable T1 : Delphine Moreau **(Agroécologie)**
Participants: Agroécologie, PSH, ARVALIS, CETIOM

Objectifs. 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: (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 processus physiques impliqués et de préparer la modélisation des effets dans la tâche 2, en identifiant les techniques et processus les plus pertinents à intégrer au modèle FLORSYS.

Méthodes. Les travaux se concentreront sur les stratégies innovantes déjà identifiées dans l'état de l'art (chapitre 2.3) pour lesquelles un inventaire des nouvelles techniques et des lacunes de connaissances sera réalisé :

- La spatialisation des techniques à l'intérieur de la parcelle : robots de désherbage, fertilisation azotée sur le rang, strip-till.
- La diversification des couverts avec des couverts d'interculture ou des cultures associées ;
- Le semis direct (avec ou sans plantes de couverture).

3.1.1 Sous-tâche 1.1 Evaluation des effets des techniques innovantes sur la régulation des adventices

Responsable T1.1 : Pascale Metais **(ARVALIS)**
Participants: B. Chauvel, S. Cordeau (**Agroécologie**), L. Bonin, S. Volan, J. Labreuche, C. Toqué (**ARVALIS**), S. Cadoux, J. Lieven (**CETIOM**); ***Collaborations***: *P. Farcy* ***(UE Dijon-Epoisses),*** *F. Sauvadet* ***(Chambre d'agriculture de Côte d'Or)***

Objectif. Quantifier et analyser les effets de la diversification des couverts couplés à différents niveaux de travail du sol (y compris semis direct) et de la spatialisation de techniques sur la dynamique des adventices dans plusieurs contextes pédoclimatiques et floristiques. En particulier, contribuer à mettre en évidence à la fois les avantages (compétition pour les ressources) et les inconvénients (limitation des travaux du sol pour réduire le stock semencier) des couverts d'interculture et préciser dans quelles conditions les différentes techniques étudiées

offrent des nouveaux leviers intéressants pour la régulation des adventices.

Méthodes. Cette tâche sera réalisée à partir :

- De données déjà acquises et analysées dans le cadre du projet : (1) les essais "système" de Boigneville (ARVALIS); (2) des essais analytiques croisant des associations colza-légumineuses avec différentes techniques de travail du sol (y compris semis direct) dans différents contextes pédoclimatiques et floristiques (CETIOM) ; (3) les essais "système" du Domaine expérimental INRA Dijon-Epoisses (Agroécologie) testant des systèmes de culture couvrant une variabilité de travail du sol (du labour au semis-direct), d'IFT (d'intensif à zéro) et d'utilisation de CIPAN;
- De données acquises au cours du projet sur des essais déjà en place : (1) suivi de deux essais analytiques de longue durée à Boigneville (ARVALIS), l'un différenciant le travail du sol depuis 20 ou 40 ans (dont semis direct et strip-till) et la couverture du sol, l'autre testant la fertilisation azotée localisée sur le rang en orge de printemps et maïs ; (2) suivi de parcelles d'agriculteurs en semis direct qui couvrent une gamme d'âges depuis la conversion au semis direct afin de caractériser les évolutions taxonomiques (quelles espèces sont favorisées/défavorisées ?) et fonctionnelles (quels traits sont favorisés/défavorisés ?) de la flore adventice en l'absence de travail du sol (Agroécologie) ;
- De la mise en place de nouveaux essais analytiques dans le cadre du projet : (1) un essai sur l'effet des couverts d'interculture (gamme de mélanges mono- et pluri-spécifique) sur la régulation d'adventices (espèces cibles) dans des conditions variées de ressources en eau (pour mimer le stress hydrique estival auquel sont confrontés les couverts) et en azote (pour mimer différents niveaux de reliquat azoté post-récolte) (Agroécologie) ; (2) des essais sur l'effet du mode de conduite de l'interculture (déchaumage profond, déchaumage superficiel, couvert) sur la régulation des adventices à Saint-Hilaire-en-Woëvre (Meuse) et Villarceaux (site en agriculture biologique dans le Val d'Oise) (ARVALIS, CETIOM) ; (3) des essais analytiques croisant des associations entre le colza et différentes espèces légumineuses (semées avec le colza et supposées être gélives) avec différentes techniques de travail du sol (semis direct ou travail du sol simplifié) dans différents contextes pédoclimatiques et floristiques (CETIOM).

Contribution des partenaires. ARVALIS, le CETIOM et Agroécologie suivront et/ou mettront en place les essais précités et analyseront les résultats. Des interactions sont prévues pour mutualiser les compétences techniques et scientifiques entre partenaires sur la conduite des essais et l'analyse des résultats.

Risques. Les résultats sont conditionnés par la réussite des expérimentations. Ce risque est minimisé par le nombre de partenaires, de zones géographiques dans lesquelles les essais sont menés et de bases de données déjà disponibles.

3.1.2 Analyse et quantification des processus biophysiques impliqués dans l'effet des techniques

3.1.2.1 Sous-tâche 1.2.1 Paramétrage d'espèces de couverture pour la compétition pour la lumière

Responsable T1.2.1 : Nathalie Colbach **(Agroécologie)**

Participants : Delphine Moreau, Stéphane Cordeau **(Agroécologie),** J. Lieven (**CETIOM**); ***Collaborations***: *F. Sauvadet* ***(Chambre d'agriculture de Côte d'Or)***

Objectif. Identifier des espèces de couverture intéressantes pour la régulation des adventices et mesurer les paramètres décrivant la compétition pour la lumière, processus de compétition déjà bien étudié et modélisé dans FLORSYS (Munier-Jolain et al, 2014).

Méthodes. (1) Identifier des espèces de couverture intéressantes; (2) Suivre la dynamique de la surface foliaire pendant la phase de croissance exponentielle après la levée des plantes, en l'absence d'ombrage en serre; (3) Suivre la morphologie (biomasse, hauteur, envergure etc) des plantes en fonction du niveau d'ombrage en parcelles jardinées, (4) Si possible, établir un petit nombre de variables faciles à mesurer au champ pour pouvoir caractériser la compétitivité pour la lumière d'un grand nombre d'espèces cultivées et adventices dans la T1.

Risques. Les étapes 2 et 3 sont bien rôdées; il n'est pas sûr que l'étape 4 soit possible.

3.1.2.2 Sous-tâche 1.2.2 Régulation des adventices par la compétition et la spatialisation des apports d'azote

Responsable T1.2.2 : Delphine Moreau **(Agroécologie)**

Participants : Nathalie Colbach, Sylvain Villette **(Agroécologie)**, Loïc Pagès **(PSH)**

Objectif. Analyser les traits des plantes et les mécanismes qui interviennent dans la régulation des adventices par la compétition pour l'azote, en fonction de sa disponibilité et la localisation de l'engrais (homogène vs. sur le rang des cultures). Les traits des plantes seront quantifiés pour une gamme d'espèces (potentiellement cultivées, adventices et de couverture) pour trois processus clefs : l'architecture racinaire, la demande en azote et la valorisation de l'azote par les plantes. Nous étudierons aussi la diffusion de l'azote dans le sol à partir d'engrais granulaire pour déterminer la quantité d'azote disponible pour l'absorption au cours du temps, en fonction du placement initial de l'engrais.

Méthodes. (1) Architecture racinaire : poursuivre le paramétrage du modèle ArchiSimple dans le cas des adventices (Pagès *et al*, 2014) à partir de la bibliographie, de données précédemment acquises par les participants et de nouvelles prospections au champ ; (2) Demande et valorisation de l'azote : mener deux expérimentations en serre croisant cinq conditions de disponibilité en azote et deux niveaux de rayonnement ; (3) Diffusion de l'azote dans le sol à partir d'engrais granulaires : réaliser une synthèse bibliographique.
Contribution des partenaires. PSH se concentrera sur l'architecture racinaire (bibliographie, prospection et développement de méthodes simplifiées de phénotypage au champ). Agroécologie analysera des données déjà acquises sur l'architecture racinaire et analysera des données pour les autres processus et fera une synthèse bibliographique sur la diffusion de l'azote dans le sol.
Risques. Les résultats sont conditionnés par la réussite des expérimentations. Ce risque est minimisé par l'expérience des deux partenaires dans l'acquisition de ce type de données et par le fait que des données sont déjà acquises avant le début du projet.

3.1.2.3 Sous-tâche 1.2.3 Régulation des adventices dans le cas de parcelles non travaillées

Responsable T1.2.3 : Stéphane Cordeau **(Agroécologie)**
Participants : B. Chauvel, J.-P. Guillemin, M. Ubertosi **(Agroécologie),** ***Collaborations***: *F. Sauvadet* ***(Chambre d'Agriculture de la Côte d'Or)***
Objectif. Mieux comprendre et caractériser les processus qui définissent la dynamique de la flore adventice en l'absence de travail du sol.
Méthodes.

- Caractériser et prédire les conditions hydrothermiques de l'horizon de surface du sol dans les parcelles non travaillées : (i) étudier l'effet du semis direct sur les propriétés hydromécaniques de l'horizon de surface de sols aux textures variées (rétention en eau, conductivité hydraulique, porosité) à partir de la bibliographie et de la mise en place de collaborations ; (ii) étudier l'effet du non travail du sol sur l'horizon de surface de sols argileux à partir d'une expérimentation au champ (argiles lourdes) et en laboratoire ;
- Caractériser et prédire l'enfouissement des semences adventices en sol non travaillé : (i) expérimentation au champ pour vérifier si le semis enfouit des semences d'adventices (plusieurs adventices aux traits de semences variées) ; (ii) expérimentation au champ (parcelle agriculteurs) d'enfouissement de billes sous l'effet du climat ; (iii) expérimentation en serre d'enfouissement par la faune (vers de terre) de quelques adventices cibles et en fonction de la densité de vers de terre.
- Caractériser et prédire la germination et levée de semences à la surface du sol : expérimentation en serre du processus de germination d'adventices en surface dans des types de sol varié.

Risques. Les résultats sont conditionnés par la réussite des expérimentations.

3.1.2.4 Sous-tâche 1.2.4 Analyse des mécanismes impliqués dans la détection automatisée des adventices

Responsable T1.2.4 : Christelle Gée **(Agroécologie),**
Participants : G. Jones, S. Villette M. Louargant **(Agroécologie),** F. Kazemipour **(CETIOM),** ***Sous-traitants: AIRINOV, Sat-Info***
Objectif. (1) Développer des dispositifs mobiles et autonomes innovants (drone, systèmes embarqués sur des machines agricoles, I-Weed robot) dédiés, entre autre, à l'identification et la localisation d'adventices pour (2) établir des cartes de présence d'adventices puis (3) mettre en œuvre le désherbage chimique localisé.
Méthodes. Les essais au champ seront conduites dans différents sites (dont le Domaine expérimental de Dijon-Epoisses) et cultures (maïs, tournesol, éventuellement soja), testant deux plateformes mobiles (drone et petit robot) équipées d'un système de vision pour cartographier les adventices et identifier certaines espèces. Parallèlement, des relevés floristiques géoréférencés seront réalisées manuellement pour valider un modèle spectral de reconnaissance d'adventices par imagerie qui repose sur du "démélangeage" de spectres d'objets naturels (culture, adventices, sol,…). Enfin, la pulvérisation homogène d'herbicides sera comparée à une pulvérisation localisée par I-Weed robot, soit en ayant recours à son propre système de détection, soit en utilisant des cartes d'infestation issue de l'imagerie aérienne.
Contribution des partenaires. Agroécologie travaillera avec le CETIOM (relevés de flore) et AIRINOV (entreprise spécialisée dans l'agridrone) pour les survols des parcelles agricoles, avec Sat-Info (entreprise spécialisée en signal GPS) pour le guidage GPS-RTK du I-Weed robot dans les champs.
Risques. Ne pas réussir à identifier spectralement les espèces végétales sur les images aériennes malgré l'utilisation d'un modèle supervisé (qui se réfère à une base de données initiales servant d'apprentissage pour construire le modèle).

3.2 Tâche 2: Développement d'outils et de méthodes d'évaluation et de conception in silico

Responsable T2 : Nathalie Colbach **(Agroécologie)**
Participants : Agroécologie, PSH, LAE, ARVALIS, CETIOM,

Objectif. Utiliser le modèle de recherche FLORSYS comme champ virtuel pour développer des outils et méthodes pour l'évaluation multicritère i*n silico* de systèmes de culture et la conception multiobjectif de systèmes de culture innovants pour la gestion durable de la flore adventice.

Méthodes. (1) améliorer FLORSYS pour y intégrer les techniques culturales innovantes manquants, les processus essentiels pour les modéliser correctement, et les indicateurs nécessaires pour les évaluer, (2) réaliser des expérimentations virtuelles 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.

Résultats. Des outils et méthodes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture

Risques. La nouvelle version FLORSYS sera prête trop tard pour réaliser l'ensemble des étapes 2 et 3 qui ne pourront être réalisées seulement avec la version initiale de FLORSYS.

3.2.1 Sous-tâche 2.1 Amélioration du modèle "champ virtuel"

Objectif. Concevoir des modules pour la version améliorée FLORSYS.2, en développant des algorithmes à partir de la tâche 1, de la littérature, de modèles existants et d'expertise.

*3.2.1.1 Sous-tâche 2.1.1 Intégration de techniques culturales et de processus nouveaux dans **FLORSYS***

Responsable T2.1.1 : Nathalie Colbach **(Agroécologie)**
Participants : D. Moreau, S. Cordeau, CDD **(Agroécologie)**, L. Pagès **(PSH)**, J. Lieven **(CETIOM)**, L. Bonin, S. Volan, C. Toqué **(ARVALIS), *Collaboration:*** *C. Lecomte* ***(Agroécologie)***

Objectif. Intégrer, dans le modèle de recherche existant FLORSYS, les nouvelles techniques culturales et processus étudiés dans la tâche 1 (section 3.1), en commençant par les techniques non spatialisées (diversification de couverts, abandon du travail du sol) et les processus impliqués (architecture racinaire et demande azotée des adventices,...).

Méthodes.

- Développer des nouveaux modules à partir des résultats des expérimentations analytiques de la T1 et les intégrer dans FLORSYS. Pour introduire les processus de compétition souterraine pour les ressources, nous allons métamodéliser le modèle d'architecture racinaire ArchiSimple (Pagès *et al*, 2014) à partir de simulations balayant la gamme de paramètres et de conditions pertinentes identifiées dans la T1 pour prédire des dynamiques de volumes racinaires (profondeur, extension latérale, densités de racines). Ce module d'architecture racinaire sera complété par des données fonctionnelles sur l'absorption par les adventices et les cultures de l'azote (ex. demande en azote en fonction de la surface foliaire , Lemaire *et al*, 2005).
- Paramétrer FLORSYS.2 pour les nouveaux processus, techniques et espèces (notamment les plantes de couverture)
- Évaluer FLORSYS.2 à l'aide de suivis d'adventices dans des situations variées
  - Analyser les essais existants à ARVALIS et au CETIOM pour identifier des situations suffisamment bien caractérisées (en termes d'état initial d'adventices notamment)
  - Comparer les simulations FLORSYS.2 aux observations des essais (sources possibles ARVALIS: système de culture de Boigneville (91), Rots (14), Epieds (27), Sendets (64), Lyon-Saint Exupéry (69), essai travail du sol pluriannuel de Boigneville) afin de déterminer son domaine de validité et son erreur de prédiction, avec les méthodes développées pour l'évaluation de FLORSYS.1 (Colbach *et al*, in prep)

Contribution des partenaires. ARVALIS et le CETIOM prépareront les données pour l'évaluation à partir de leurs essais. Agroécologie et PSH développeront les nouveaux modules à partir des résultats de la T1, puis évalueront FLORSYS.2.

Risques. Le paramétrage complet des nouveaux modules dépend de la réussite des expérimentations de la T1. L'évaluation détaillée de FLORSYS.2 ne sera possible que si la flore adventice est suffisamment bien caractérisée sur les essais.

3.2.1.2 Sous-Tâche 2.1.2 Cas particulier des techniques spatialisées à l'intérieur de la parcelle

Responsable T2.1.2 : Gawain Jones **(Agroécologie)**
Participants : Christelle Gée, Sylvain Villette, Nathalie Colbach, CDD **(Agroécologie)**

Objectif. Introduire le désherbage de précision dans FLORSYS qui, actuellement, ne considère que la

pulvérisation conventionnelle (toutes buses ouvertes).
Méthodes. (1) Développer un module de désherbage de précision dans FLORSYS.2, prenant en compte les performances de la technologie (résolution spatiale de la caméra, niveau d'erreur, surface minimale des traitements, règles de décision pilotant le déclenchement des traitements localisés); (2) définir ces variables pour différentes stratégies de traitement en fonction des résultats de la tâche 1 et du modèle Sim_A_Field (Jones *et al*, 2010).
Risques. Néant

3.2.1.3 Sous-Tâche 2.1.3 Passage à l'échelle du paysage: intégration des processus de dispersion

Responsable T2.1.3 : Benoît Ricci **(Agroécologie)**
Participants : N. Colbach, S. Cordeau, CDD **(Agroécologie),** C. Bockstaller **(LAE),** ***Collaborations:*** *H. Raynal (**Plateforme de modélisation RECORD**)*
Objectif. Changer d'échelle et passer du champ virtuel à l'îlot de parcelles dans FLORSYS, en incluant des espaces semi-naturels comme les bordures de routes ou les haies, en s'inspirant de la méthodologie employée dans le modèle spatialement explicite GENESYS développé par notre équipe (Colbach, 2009). Ce changement d'échelle est nécessaire pour intégrer la dispersion des adventices, et aussi pour tester des stratégies de gestion d'adventices visant à concilier production agricole et biodiversité au niveau de l'îlot de parcelles.
Méthodes. (1) parallélisation des calculs (en collaboration avec la plateforme RECORD animée par Hélène Raynal), travail déjà entamé dans le cadre du projet AMIGA, (2) introduction de nouveaux éléments du paysage (bandes enherbées et bordures de route ou chemin herbacé), (3) intégration de fonctions de dispersion des semences par voie naturelle et anthropique. La dispersion naturelle sera quantifiée à partir de traits d'espèces à partir de la littérature, en collaboration avec les auteurs (Thomson *et al*, 2011, Daniel Laughlin, University of Waikato, NZ). La dispersion anthropique sera appréhendée par une mise en relation entre des données d'abondance de flore (zone d'étude de Fénay, 14 km², 25 exploitations) et des calculs de connectivité du paysage permettant de prendre en compte les flux associés au matériel agricole. Enfin, (4) ces résultats alimenteront le calcul des dispersions de semences entre parcelles en intégrant les fonctions de dispersion à l'aide du modèle CaliFLoPP (Bouvier *et al*, 2009) présent dans RECORD.
Risques. Impossibilité d'établir des fonctions de dispersion anthropique.

3.2.1.4 Sous-Tâche 2.1.4 Introduire la résistance aux herbicides dans FLORSYS

Responsable T2.1.4 : Valérie Le Corre **(Agroécologie)**
Participants : Henri Darmency, Christophe Délye, Nathalie Colbach, CDD **(Agroécologie)**
Objectif et méthodes. Introduire la résistance à plusieurs herbicides dans FLORSYS, avec une approche non génétiquement explicite, en considérant (1) différentes populations résistantes à différents modes d'actions et des populations sensibles, (2) un module de mutation convertissant des individus sensibles en résistants (et vice-versa), (3) des taux d'efficacité des herbicides dépendant du caractère résistant/sensible vis-à-vis de la matière active, (4) des coûts de résistance. Cette approche est une simplification du module génotype/mutation/résistance de ALOMYSYS (Colbach et al), le prototype monospécifique de FLORSYS. Dans le cas de la résistance au glyphosate, cette tâche se fera en collaboration avec le projet européen AMIGA.
Risques. Il y a peu de données sur les coûts de résistance et les taux de mutation.

3.2.1.5 Sous-Tâche 2.1.5 Amélioration du module de phénologie

Responsable T2.1.5 : Ludovic Bonin **(ARVALIS)**
Participants : L. Bonin, S. Volan (**ARVALIS),** J. Lieven **(CETIOM),** N. Colbach, CDD **(Agroécologie)**
Objectif. Développer un nouveau module de phénologie pour FLORSYS qui, en plus des facteurs température et date de levée, prend aussi en compte la longueur du jour et permet ainsi d'améliorer la prédiction de la date de floraison et de maturité à des latitudes différentes de celle de Dijon, afin de remédier aux défauts identifiés lors de l'évaluation de FLORSYS.1 (Colbach *et al*, in preparation)
Méthodes. (1) Relevé de dates de levée et dates de début floraison pour tout ou partie des 16 espèces adventices de FLORSYS à différentes latitudes et dans différentes cultures, dans les essais longue durée comme Boigneville (essais systèmes de culture), les nouvelles plateformes SYPPRE[23] (Lauragais, Pays de La Loire), les essais annuels herbicides; (2) Établissement de fonctions prédisant la date de floraison en fonction de la date de levée, température et longueur du jour.
Délivrables. Un module de phénologie adapté à différentes latitudes pour FLORSYS.2

[23] Projet de nouvelles plateformes d'essais système de culture en partenariat entre ARVALIS/CETIOM/ITB/UNIP et acteurs locaux dont le but est de comparer des systèmes de référence et des systèmes en rupture à fort objectif environnemental sans dégradation de la performance économique

Risques. Ne pas avoir les adventices attendues et disposer de peu de variabilité d'espèces selon les essais

3.2.1.6 Sous-tâche 2.1.6 Étendre la gamme des indicateurs d'évaluation des impacts de la flore adventice

Responsable T2.1.6 : Jean Villerd **(LAE)**
Participants : Nathalie Colbach, Delphine Moreau, Stéphanie Gibot-Leclerc, Sylvie Granger, Thomas Puechlong, CDD **(Agroécologie),** Christian Bockstaller **(LAE),** Sandrine Volan, Ludovic Bonin (**ARVALIS)**
Objectif. Étendre la gamme d'indicateurs déjà présents dans FLORSYS pour améliorer la capacité d'évaluation des systèmes de culture.
Méthodes. (1) Enquête auprès des futurs utilisateurs (chercheurs, conseillers) de FLORSYS et des outils d'aide à la décision (OAD) développés dans la tâche 2.3, et auprès des destinataires des conseils (agriculteurs, décideurs publics) pour identifier les critères d'évaluation manquants; (2) Construction de nouveaux indicateurs des bénéfices (ex. ressource trophique pour lépidoptères, couverture du sol pour limiter l'érosion ou le lessivage d'azote) et de nuisibilité (ex adventices hôtes ou non-hôtes facilitateurs[24] pour l'orobanche) en fonction des processus impactés par les techniques innovantes rajoutées dans le modèle, à dire d'experts et à partir de résultats d'autres projets (AMIGA, ECOPHYTO, voir section 2.4.2); (3) si nécessaire et si possible, validation des indicateurs à partir de suivis sur le terrain (ex. préférence des lépidoptères pour certaines espèces adventices). La réflexion sur les indicateurs a déjà débutée dans le cadre de la thèse de Thomas Puechlong (INRA-EA, INRA-MIA et Région Bourgogne).
Risques. La qualité prédictive des indicateurs dépendra du niveau des connaissances disponibles et accessibles pour les développer, plus particulièrement pour paramétrer les espèces.

3.2.2 Expérimentations virtuelles avec FLORSYS

3.2.2.1 Sous-tâche 2.2.1 Analyses de sensibilité

Responsable T2.2.1 : Nathalie Colbach **(Agroécologie)**
Participants : T. Puechlong, CDD **(Agroécologie),** J. Villerd **(LAE)**, ***Collaboration** : J.-P. Gauchi **(MIA)***
Objectif. Réaliser des expérimentations virtuelles avec le champ virtuel FLORSYS pour quantifier les effets des techniques et combinaisons de techniques sur les indicateurs de nuisibilité et biodiversité liée à la flore adventice. Ces expérimentations permettront (1) de comprendre le fonctionnement de l'agroécosystème (quels espèces ou traits sont sélectionnés par quelles techniques? Quelles combinaisons de techniques permettent d'atteindre quelle combinaison d'objectifs de production et biodiversité?), (2) de fournir des données pour le développement d'outils d'évaluation et de conception de systèmes de culture (tâche 2.3).
Méthodes. (1) Analyse de sensibilité aux traits des adventices pour identifier les "profils adventices" permettant d'atteindre les différentes combinaisons d'objectifs de production et biodiversité; (2) Analyse de sensibilité aux variables systèmes de culture et pédoclimat en testant des systèmes existants (enquêtes, dire d'experts) et prospectifs (probables ou non, dire d'experts, connaissances issues du modèle). (3) Constitution d'un référentiel/base de données à partir des scénarios et situations explorées pour alimenter les T2.2.2 et T2.3 (développement d'un outil d'aide à la décision). Ces étapes seront d'abord réalisées avec FLORSYS.1, puis avec FLORSYS.2.
Risques. Ne pas avoir le temps de répéter la procédure avec FLORSYS.2.

3.2.2.2 Sous-tâche 2.2.2 Complémentarité simulations-observations

Responsable T2.2.2 : Jean Villerd **(LAE)**
Participants : François Brun (**ACTA),** Nathalie Colbach **(Agroécologie)**, J. Lieven **(CETIOM)**, L. Bonin, S. Volan, C. Toqué **(ARVALIS),** ***Collaborations: RMT Modelia[25]***
Objectifs. L'objectif est de compléter les sorties du modèle FLORSYS par des analyses de données issues de relevés de flore. FLORSYS permet d'identifier finement les relations entre traits d'adventices et pratiques culturales sur des espèces réelles et virtuelles. Les analyses de relevés de flore permettent de détecter les traits qui ont permis aux espèces réelles de passer une succession de filtres sans donner des détails sur les relations entre traits et chacune des pratiques.
Méthodes. (1) Consolidation d'une base de données à partir des données disponibles (notamment celles de la T2.1), (2) Analyse des données pour construire des relations entre composition des communautés floristiques et un ensemble de traits, (3) Simulation par FLORSYS sur les situations représentées dans la base de données consolidée,

[24] Les espèces non-hôtes facilitatrices ne stimulent pas elles-mêmes la germination de l'orobanche; mais leur présence au voisinage d'espèces hôtes augmente l'infection de ces dernières.
[25] Réseau mixte technologique dont la vocation est d'organiser les échanges sur la Modélisation et Analyse de Données pour l'Agriculture entre les différents acteurs de la recherche, du développement et de l'enseignement agricole (http://www.modelia.org/moodle/)

(4) Construction de modèles statistiques (RDA, random forests) prenant notamment en compte des sorties du modèle comme co-variables permettant d'étendre les prédictions de FLORSYS à des espèces non prises en compte par le modèle, (5) Évaluation et analyse critique des modèles.
Risques. Difficulté de consolider une base de données suffisamment homogène et grande pour permettre les analyses envisagées.

3.2.3 Sous-tâche 2.3 Développement d'outils d'aide à la décision pour la conception de systèmes de culture

Responsable T2.3 : Jean Villerd **(LAE)**
Participants : N. Colbach, S. Granger T. Puechlong, CDD **(Agroécologie),** J. Lieven **(CETIOM**), L. Bonin, S. Volan **(ARVALIS),** C. Dizien **(InVivo)**, ***Collaboration*** *: J.-P. Gauchi* ***(MIA)***
Objectif. Élaborer des outils opérationnels d'aide à la conception et l'analyse des stratégies de gestion durable des adventices, dérivés de FLORSYS par méta-modélisation.
Méthodes. (1) Enquêtes auprès des chercheurs, instituts techniques, conseillers et agriculteurs (et exploitation de l'étude du GIS HP2E sur les besoins en OAD) pour établir un cahier des charges de conception de l'OAD et compléter les résultats de la T2.1.6 sur les critères d'évaluation de la flore; (2) Construction d'un modèle (OADév) prédisant les performances (conséquences des adventices pour la production, la biodiversité, l'environnement) en fonction des systèmes de culture, à partir des données issues des expérimentations virtuelles avec FLORSYS (T2.2.1); (3) Afin d'améliorer la lisibilité pour les non-modélisateurs, l'OAD sera implémenté sous la forme d'un arbre de décision liant pratiques agricoles et indicateurs de la flore adventice (méthode inspirée de la thèse de D. Mézière); (4) si possible, l'OADév sera "inversé" pour obtenir un outil proposant des systèmes de culture répondant aux objectifs listés par l'utilisateur (OADpro); (5) si possible, les OADs seront encapsulés dans une interface graphique pour les rendre ergonomiques, par exemple sous format DEXi[26].
Risques. Manque de temps et impossibilité d'inverser l'OADév pour aboutir à l'OADpro, manque de temps et de moyens pour encapsuler l'OAD.

3.3 Tâche 3. Conception et évaluation multicritère de systèmes de culture innovants permettant la gestion durable des adventices selon plusieurs scénarios d'évolution

Responsable T3 : Frédérique Angevin **(EcoInnov)**
Participants : INRA Eco-Innov, Agroécologie, Arvalis, CETIOM, InVivo ; ***Collaboration*** : ITB, UNIP ***Sous-traitant.*** *CRC*
Objectifs. 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.
Méthodes. (1) identifier les freins à l'adoption d'innovations techniques concernant la gestion des adventices chez les agriculteurs, (2) évaluer une large gamme de systèmes de culture existants, en termes de nuisibilité et de bénéfices de la flore adventice, à l'aide des modèles et outils de la T2. Ces simulations sont complémentaires de celles réalisées dans la T2.2.1 et seront réalisées avec des climats actuels et futurs, et avec différentes flores adventices pour évaluer la robustesse des systèmes face au changement, (3) concevoir, sur la base de ces diagnostics et en intégrant les résultats des T1 et T2 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 changements réglementaires et socio-techniques. Leurs impacts sur la productivité, le contrôle de la flore adventice et la biodiversité seront prédits par les modèles et outils de la T2 (avec des climats et flores actuels et futurs) (4) évaluer la durabilité globale des systèmes les plus performants identifiés à l'étape précédente.
Risques. Même si l'OAD de la T2 n'est pas disponible, les évaluations prévues aux différentes étapes pourront être réalisées avec FLORSYS mais cela pourra limiter la gamme de systèmes explorée

3.3.1 Sous-tâche 3.1 Identifier les verrous à l'adoption des systèmes de culture utilisant des alternatives au désherbage chimique

Responsable T3.1 : Antoine Messéan **(EcoInnov)**
Participants: F. Angevin, A. Messéan (Eco-Innov), A. Ronceux (CETIOM – GIS HP2E) ***Collaboration :*** *C. Denieul, C. Dizien (InVivo).* ***Collaboration:*** *Marianne LeBail (****SAD-APT AgroParisTech****)*
Objectifs. Identifier les freins, en termes de contraintes et objectifs, et les leviers à l'adoption par les agriculteurs de stratégies nouvelles de gestion des adventices dont la performance a été démontrée, afin de pouvoir les prendre en compte lors de la conception de systèmes de culture dans la T3.3 et la mise en forme des conseils et outils dans la T4.

[26] http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/Main/WebHome

Méthodes. (1) Choix de deux zones d'enquêtes avec des assolements et des flores contrastées (2) Enquêtes auprès d'agriculteurs en s'assurant de la diversité des pratiques de désherbage et de travail du sol, l'hypothèse étant faite que les besoins en termes de conseils et d'outils ne sont pas nécessairement les mêmes (3) Identification des freins et leviers qui pourront être confirmés par la suite dans la T4.3.
Risque. Échantillons de taille insuffisante pour assurer la qualité de l'analyse. Dans un premier temps, les contacts avec les adhérents d'lnVivo seront privilégiés puis éventuellement complétés en appliquant la méthode de la boule de neige

3.3.2 Sous-tâche 3.2 Inventaire et diagnostic de systèmes de culture actuels

Responsable T3.2 : Frédérique Angevin **(EcoInnov)**
Participants: CDD **(EcoInnov)**, N. Colbach, S. Cordeau (**Agroécologie**), C. Toqué, P. Métais (**ARVALIS**), A. Ronceux, S. Cadoux (**CETIOM**). ***Collaboration:*** *T. Castel, Y. Richard (**CRC**), N. Munier-Jolain (**CAN DEPHY**), R. Duval (**ITB**), B. Carrouée (**UNIP**)*
Objectifs. Évaluer une large gamme de systèmes de culture existants, en termes de nuisibilité et de bénéfices de la flore adventice, et de robustesse face à des climats actuels et futurs et différentes flores adventices, à l'aide des modèles et outils de la T2.
Méthodes. (1) Identifier une diversité de systèmes de culture existants dans différents pédoclimats et conçus dans une optique de réduction de l'usage des pesticides ou du travail du sol: essais "système" INRA (Dijon-Epoisses, Versailles-Lacage), fermes de Boigneville, plateformes SYPPRE, réseaux de fermes DEPHY... ; (2) Simulations de ces systèmes avec le modèle "champ virtuel" FLORSYS et son dérivé, l'OADév, avec les climats et flores réelles ; (3) Simulations avec d'autres climats actuels et futurs possibles pour tester la robustesse des systèmes face aux aléas climatiques. Les climats sont des climats bourguignons de 1980-2100 obtenus en simulant deux hypothèses en termes d'évolution de la concentration de gaz à effet de serre (la plus haute RCP85 et la plus basse RCP26) à l'aide d'Arpege-Climat (Voldoire *et al*, 2013), puis désagrégés à la résolution de 3 km et en continu sur l'ensemble de la période avec le modèle climatique régional ARW/WRF (Skamarock *et al*, 2008) ; (4) Simulations des systèmes avec d'autres communautés de flores adventices, réelles et virtuelles, pour tester la robustesse face aux évolutions de flore[27].
Risque. Ne pas disposer suffisamment tôt de FLORSYS.2 et l'OADév et devoir utiliser FLORSYS.1. Ce dernier ne saura pas correctement simuler toutes les techniques innovantes. Le temps de calcul de FLORSYS est long et ses données d'entrée complexes à recueillir, qui limitera le nombre de systèmes pouvant être évalués (conséquences potentielles sur la tâche suivante).

3.3.3 Sous-tâche 3.3 Conception de systèmes de culture alternatifs

Responsable T3.3 : Frédérique Angevin **(EcoInnov)**
Participants: CDD **(EcoInnov)**, N. Colbach, S. Cordeau, D. Moreau, G. Jones, B. Chauvel, J.P. Guillemin, S. Granger (**Agroécologie**), L. Bonin, S. Volan, C. Toqué (**ARVALIS**) S. Cadoux **(CETIOM)**, ***Collaborations*** *: R. Duval (**ITB**), B. Carrouée (**UNIP**)*[28]
Objectifs. Conception de systèmes de culture minimisant la nuisibilité et maximisant les bénéfices de la flore adventice, en tenant compte des freins à l'adoption à l'innovation chez les agriculteurs.
Méthodes. (1) Identification du cadre d'objectifs et de contraintes de la conception, en termes d'usage d'herbicides, nuisibilité et bénéfices de la flore adventice et de changements de contexte : règlementaire ("zéro phytosanitaire", introduction d'aménagements paysagers...), sociotechnique (ex. réduction du temps de travail et donc du travail du sol, agriculture de précision, variétés tolérantes aux herbicides...), climatiques (ex. nouvelles espèces cultivées, apparition de nouvelles adventices...); (2) Conception de systèmes de culture dans des ateliers participatifs regroupant différents types d'experts et d'acteurs (chercheurs, conseillers, agriculteurs ...), en tenant compte des résultats de la T2.2 (effets des pratiques sur la flore),de la T3.1 (freins à l'adoption), des diagnostics de la T3.2 et, s'il est disponible, des sorties de l'OADpro ; (3) Évaluation de ces systèmes de culture en termes de nuisibilité et bénéfices de la flore adventices avec les mêmes méthodes que dans la T3.2 (climats actuels et futurs, différents types de flore adventice) ; (4) Si besoin, re-conception des systèmes de culture en fonction des performances simulées, à partir des connaissances des experts et des résultats de la T2.2.

---

[27] L'évaluation multicritère de la durabilité économique, sociale et environnementale de ces systèmes (par DEXiPM et/ou Systerre) est prévue dans la plupart des cas dans les projets qui les ont créés. Si toutefois ce n'était pas le cas, elle serait réalisée dans cette sous-tâche afin de fournir un diagnostic global des forces et faiblesses du système.
[28] Les participants aux groupes de conception des plates-formes SYPPRE (en cours) ayant une expertise sur le sujet pourront être sollicités au cas par cas.

Risque. Réussir à définir un cadre pour la conception qui permette de proposer une gamme assez large de systèmes innovants (de l'introduction d'une innovation technique à des systèmes très en rupture). L'OADpro ne sera pas prêt à temps ou ne sera pas possible.

3.3.4 Sous-tâche 3.4 Évaluation multicritère de la durabilité globale des systèmes innovants proposés

Responsable T3.4 : Frédérique Angevin **(EcoInnov)**
Participants: A. Messéan, CDD **(EcoInnov),** C. Toqué **(ARVALIS)**
Objectifs. Évaluer les meilleurs scénarios identifiés dans la T3.3 pour leur performance économique, environnementale et sociale. Certains systèmes peuvent se révéler intéressants du point de vue de la gestion durable des adventices mais être difficiles à mettre en œuvre techniquement ou moins durables économiquement ou socialement (augmentation des temps de travaux). Cette étape permettra de déterminer quels moyens supplémentaires peuvent être nécessaires (leviers techniques à mobiliser, appui technique, incitation financière) pour que ces systèmes soient mis en place sur le terrain.
Méthodes. (1) Évaluation multicritère de la durabilité globale des systèmes en utilisant l'outil Systerre (calculs d'indicateurs) et le modèle DEXiPM (évaluation pondérée des trois piliers de la durabilité), (2) Analyse des forces et faiblesses des systèmes, des critères de la durabilité pouvant être antagonistes, (3) Analyse de sensibilité aux pondérations présentes dans l'arbre de décision pour tester la robustesse des systèmes dans plusieurs contextes d'adoption (optimisation économique, double performance économique et environnementale, durabilité globale des systèmes, (4) Synthèse pour l'ensemble des systèmes, propositions de moyens d'accompagnement pour le transfert et l'adoption.
Risque. Pour les systèmes très en rupture, les calculs d'indicateurs avec Systerre ne seront peut-être pas réalisables. Il existe une version totalement qualitative de DEXiPM qui permet ce type d'évaluation *ex ante*.

3.4 Tâche 4. Valorisation et transfert des systèmes agricoles innovants vers les acteurs

Responsable T4 : Alain Rodriguez (ACTA)
Objectif. (1) Faciliter l'interaction avec la profession pour les questions de recherche des autres tâches et (2) 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.

3.4.1 Sous-tâche 4.1 Diffusion des résultats auprès de la profession

Responsable T4.1: Alain RODRIGUEZ (ACTA)
Participants: Partenaires du RMT Florad **(RMT Florad)**, Aïcha Ronceux **(CETIOM-GIS HP2E),** Sandrine Volan, Ludovic Bonin (**ARVALIS), *Collaborations:*** *Celine Deneuil* ***(In Vivo)***
Objectifs. Former la profession aux techniques et stratégies innovantes de gestion des adventices
Méthodes. Mettre à disposition l'ensemble des informations, outils et méthodes explorées dans le projet, via les sites internet des partenaires et réseaux (RMT Florad, ECOPHYTOPIC, partenaires...), documents et autres supports de présentation du projet et des résultats, séminaires et colloques spécifiques, articles de vulgarisation, articles scientifiques
Risque : La réalisation est liée à la qualité et à la pertinence ou des retards dans la production de résultats.

3.4.2 Sous-tâche 4.2 Diffusion grand public

Responsable T4.2: Nathalie Colbach **(Agroécologie), *sous-traitant : INRA Transfert***
Objectifs. Faciliter le réseautage en faisant connaitre le projet.
Méthodes. Création d'un site internet, d'une brochure de présentation.

3.4.3 Sous-tâche 4.3 Formation

Responsable T4.3: Alain RODRIGUEZ (ACTA)
Participants: François Brun **(RMT Modelia),** Sandrine Volan, Ludovic Bonin (**ARVALIS), *Collaborations:*** *Celine Deneuil* ***(In Vivo),*** *Marianne LeBail* ***(AgroParisTech)***
Objectifs. (1) Former la profession aux nouveaux OAD, (2) Utiliser les OAD comme outil pédagogique montrant l'impact des différentes techniques culturales et systèmes de culture, faisant réfléchir sur ses propres pratiques et ainsi les faire évoluer, (3) Utiliser les OAD comme outil de co-construction de systèmes de culture, pour vérifier er compléter les verrous identifiés à l'adoption d'innovations pour la T3.3.1
Méthodes. Organiser des sessions de formations et de jeux de rôle avec des groupes d'utilisateurs (conseillers, agriculteurs)
Risque. Impossibilité de développer une interface ergonomique pour les outils, rejet ou collaboration limitée du public

4 Calendrier des tâches, livrables et jalons

Chronogramme

		Année 1						Année 2						Année 3						Année 4					
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
T0	P1		J01 L01	L02 J03 L05	L03		J03 L04 J05	L03		J03 L06	L03		J03 J05	L03		J03 L07	L03		J03 J05	L03		J03	L03	J03	L03 L08 L09 J05
T1	**Identifier des pratiques agricoles innovantes et comprendre leurs effets sur la flore adventice**																								
T1.1	P6									L11a L11b						L11c									L11d
T.1.2.1	P1										L121a		L121b												
T1.2.2	P1						L122a							L122b, L122c											L122d
T1.2.3	P1												L123a			L123b									
T1.2.4	P1			L124a							L124b L124c					L124b L124c									
T2	**Développement d'outils et de méthodes d'évaluation et de conception in silico**																								
T2.1	P1, P6			L212			L216			L214		L216	L215						L211a						L211b
T2.2	P1, P3						L221a						L221c			L222a			L222b			L221b			L221c
T2.3	P3		L23a										L23b						L23c						L23d
T3	**Conception et évaluation multicritère de systèmes de culture innovants**																								
T3.1	P2									L31															
T3.2	P2															L32									
T3.3	P2																		L33a		L33b				
T3.4	P2																								L34a L34b
T4	**Valorisation et transfert des systèmes agricoles innovants vers les acteurs**																								
T4.1	P5									L41a L41b		L41d	L41c						L41d					L41d	L41c
T4.2	P1			L42a L42d																					
T4.3	P5																								L43

Les couleurs servent uniquement à démarquer visuellement les différentes tâches

Tâche	Livrables/ Jalons (Type de diffusion : P = public ; *C = confidentielle*)	Responsable
T0 Management du projet		
J01	Réunion de lancement	P1
L01	Relevé de conclusions de la réunion de lancement	P1
L02	Mise en place de l'espace de travail collaboratif	P1
J03	Réunions du comité de pilotage	P1
L03	Relevé de conclusions des réunions du comité de pilotage	P1
L04	Accord de consortium	P1
J05	Séminaires annuels	P1
L05/6/7/8	Rapport scientifique	P1
L09	Rapport financier	P1
T1 Analyser et quantifier les effets des pratiques agricoles innovantes sur la flore adventice (Delphine Moreau)		
L11a	Évaluation de techniques pour la régulation des adventices dans différents contextes pédoclimatiques et floristiques : Bilan année 1	P6
L11b	Méthodologies pour analyser l'effet de pratiques individuelles dans des systèmes de culture aux effets multiples.	P6
L11c	Évaluation de techniques pour la régulation des adventices dans différents contextes pédoclimatiques et floristiques : Bilan année 2	P6
L11d	Évaluation de techniques pour la régulation des adventices dans différents contextes pédoclimatiques et floristiques : Synthèse	P6
L121a	Paramètres de compétition pour la lumière pour les espèces de couverture	P1
L121b	Traits pour estimer la compétitivité au champ des espèces cultivées et adventices	P1
L122a	Synthèse bibliographique sur la diffusion de l'azote des engrais granulaires	P1
L122b	Caractérisation de la demande et de la valorisation de l'azote par des espèces cultivées et adventices	P1
L122c	Caractérisation racinaire d'espèces adventices et cultivées	P1
L122d	Ecologie comparative pour identifier des stratégies de comportements entre espèces	P1
L123a	Caractérisation de l'effet du semis direct sur les propriétés hydromécanique des sols	P1
L123b	Caractérisation de l'enfouissement des graines, de la germination et de la croissance des espèces adventices en semis direct	P1
L124a	Base données spectrales de réflectance d'adventices et de cultures	P1
L124b	Cartes de présence d'adventices avec I-Weed Robot – Relevés floristiques géoréférencés	P1
L124c	AgriDrone : survol de parcelles expérimentales – Extraction de cartes de présence d'adventices – Comparaison aux cartes obtenues avec l'I-Weed Robot et aux relevés de terrain	P1
T2 Développement d'outils et de méthodes d'évaluation et de conception in silico (Nathalie Colbach)		
L211a	Modules "racines", "azote" pour FLORSYS.2; correction des modules "structure du sol", "conditions hydrothermiques"	P1
L211b	Domaine de validité de FLORSYS.2	P1
L212	Nouveau module "désherbage de précision" pour FLORSYS.2	P1
L213	Nouveau module "spatialisation" pour FLORSYS.2	P1
L214	Nouveau module "résistance aux herbicides" pour FLORSYS.2	P1
L215	Amélioration du module "phénologie" pour FLORSYS.2	P6
L216	Indicateurs d'évaluation de la flore adventice pour FLORSYS et les OAD	P3
L221a	Base de données de simulations issues de l'analyse de sensibilité avec FLORSYS.1	P1

L221b	Base de données de simulations issues de l'analyse de sensibilité avec FLORSYS.2	P1
L221c	Grille de corrélations entre pratiques agricoles et traits d'adventices avec FLORSYS.1	P1
L221d	Grille de corrélations entre pratiques agricoles et traits d'adventices avec FLORSYS.2	P1
L222a	Base de données de performances simulées et observées de systèmes de culture avec FLORSYS.1	P3
L222b	Modèles statistiques prédisant les observations en fonction des sorties du modèle avec FLORSYS.1	P3
L23a	Identification des besoins des acteurs en termes d'OAD	P3
L23b	OADév simulant les performances des systèmes de culture proposés par l'utilisateur à partir de FLORSYS.1	P3
L23c	OADpro proposant des systèmes de culture répondant aux objectifs de l'utilisateur à partir de FLORSYS.1	P3
L23d	OADév et OADpro à partir de FLORSYS.2	P3
T3 Conception et évaluation multicritère de systèmes de culture innovants permettant la gestion durable des adventices selon plusieurs scénarios d'évolution (Frédérique Angevin)		
L31	Freins et leviers à l'adoption d'innovations techniques par les agriculteurs	P2
L32	Performances des systèmes de culture actuels en termes de nuisibilité et de bénéfices de la flore adventice	P2
L33a 33b	Propositions de systèmes de culture minimisant la nuisibilité et maximisant les bénéfices de la flore adventice	P2
L34a	Évaluation de la durabilité globale des scénarios optimaux identifiés	P2
L34b	Identification de moyens complémentaires pour l'adoption de systèmes	P2
T4 Valorisation et transfert des systèmes agricoles innovants vers les acteurs (Alain Rodriguez)		
L41a	Présentation et mise à disposition sur le web	P5
L41b	Plaquette de présentation du projet	P5
L41c	Séminaire à mi-parcours et séminaire final	P5
L41d	Articles de vulgarisation	P5
L42a	Site internet du projet	P1
L42b	Brochures papier	P1
L43	jeux de rôle dès la conception de l'OAD finalisé avec l'interface ergonomique	P5

5 Stratégie de valorisation, de protection et d'exploitation des résultats, impact global de la proposition

5.1 Protection des résultats

Les résultats de recherche fondamentaux seront librement diffusés par différents canaux, notamment les publications scientifiques, des présentations à des conférences et des ateliers, des résumés sur le site internet, sous réserve d'accord du comité de pilotage du projet. Selon la nature des résultats attendus, différentes stratégies de protection (droit d'auteur, la licence gratuite recherche et développement pour les modèles et la base de données, le secret, le dépôt de brevet[29]) pourront être envisagés.

La gestion des droits de propriété intellectuelle sera réglementée en détail par l' « accord de consortium », qui permettra également de statuer le processus de protection intellectuelle, les modalités d'exploitation et de partage des revenus entre les partenaires pour les résultats générés par le projet. Le projet suivra les règles suivantes en termes de propriété intellectuelle : (1) **le savoir-faire et les connaissances antérieures**, tout en restant la propriété exclusive de leurs propriétaires, seront mis gratuitement à la disposition des autres partenaires du projet dans le cadre de son déroulement, (2) chaque partenaire du projet sera en principe propriétaire des résultats qu'il aura obtenus dans ses locaux. En cas de **résultats obtenus en commun** par plusieurs partenaires, ils les partageront en copropriété, en fonction des apports intellectuels et financiers de chacun. Toutefois des résultats obtenus en commun et voués à un usage commercial seront régis par une licence non-exclusive.

La protection et la stratégie d'exploitation des résultats générés au cours du projet seront régulièrement réexaminées par des spécialistes de la propriété intellectuelle et de l'exploitation économique spécifiquement consultés par les partenaires du projet, notamment en lien avec leur tutelle de rattachement.

5.2 Valorisation et dissémination

La valorisation et la dissémination des modèles, outils, conseils et stratégies de gestion sont envisagées auprès:

- De la profession: partie intégrante du projet détaillée dans la tâche 4 (section 0);
- De la communauté scientifique : *via* des publications scientifiques, participation à des congrès...
- Des étudiants: les travaux sur la modélisation (tâche 2, section 0) avec le développement d'un modèle spatialisée de la dynamique des adventices pourrait être intégrés dans le module "Modélisation et Outils d'Aide à la Décision" de la 3ème année et le module optionnel "le changement climatique : impact sur les cultures et adaptation" de 2ème année d'école d'ingénieur d'AgroSup Dijon.

L'OADév issu de FLORSYS (arbre de régression multivarié) pourra être intégré à la plateforme Means (Auberger

[29] Notamment pour le I-Weed robot et l'imagerie aérienne

et al, 2013) de l'INRA qui vise à mettre à disposition des méthodes d'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes (Analyse de cycle de vie, etc.)[30]. Il pourra aussi être intégré sous format DEXi[26].

5.3 Les retombées pour la société

Les retombées attendues pour la société reflètent les enjeux auxquels répond le projet en termes d'impact des pratiques de gestion de la flore adventice, et concernent surtout le monde agricole. Elles consistent en : (1) une meilleure connaissance de l'évolution de la flore adventice sous l'effet de différents éléments : pratiques, climat,… ; (2) la mise à disposition et l'appropriation d'outils d'aide à la décision développés dans le projet ; (3) l'identification et l'appropriation de stratégies innovantes de gestion des adventices adaptées aux différentes contraintes et (4) une aide au conseil et à la décision publique en identifiant des éléments clés pour l'adoption de ces stratégies.
De manière plus générale, ce projet contribuera à développer des systèmes agricoles alternatifs minimisant les impacts environnementaux et sanitaires (notamment en réduisant l'usage d'intrants chimiques) et maximisant les services écosystémiques (notamment de production et de régulation).

6 Description du partenariat

6.1 Adéquation et complémentarité des partenaires

Le consortium regroupe 4 unités INRA (Agroécologie, LAE, PSH, EcoInnov) dont deux associées à des écoles (AgroSup Dijon) et universités (Bourgogne, Lorraine), et 3 instituts techniques (ACTA, ARVALIS, CETIOM). Y seront associés *via* des collaborations et des sous-traitances 4 autres unités de recherche, l'UMR SAD-APT (INRA-AgroParisTech), le Centre de Recherches de Climatologie (UMR6282 Biogeosciences, CNRS/UB,), les UR MIA de l'INRA Jouy et de Toulouse (Plateforme RECORD), et 3 entreprises privées, In Vivo Agrosolutions (filiale R&D végétale de l'union de coopératives InVivo), AIRINOV (entreprise spécialisée dans l'agridrone) et Sat-Info (entreprise spécialisée en signal GPS). Le consortium couvre ainsi toutes les disciplines scientifiques nécessaires au projet (agronomie, écologie, modélisation, statistiques, climatologie, écophysiologie, voir section 1.2) ; il permet aussi d'intégrer au mieux les acteurs, en regroupant des chercheurs, des enseignants-chercheurs, des experts d'instituts techniques, des conseillers. Plusieurs partenaires (Agroécologie, EcoInnov, ACTA, ARVALIS, CETIOM...) et collaborateurs (InVivo, UNIP, ITB...) travaillent déjà ensemble dans le cadre des RMT Florad[12], SDCi[19], Modelia[25] et le GIS HP2E6. C'est cette implication pluridisciplinaire qui permettra non seulement de produire les connaissances, outils et solutions nécessaires pour répondre à notre objectif mais aussi de les adapter au mieux aux réalités du terrain. L'implication de la profession agricole constitue un atout nécessaire, en permettant d'identifier les déterminants socio-économiques de l'adoption des innovations proposées.

6.2 Description des partenaires

Partenaire 1 : UMR1347 Agroécologie, INRA-AgroSup Dijon-UB, Dijon - Contact: Nathalie Colbach

L'UMR regroupe des chercheurs INRA et des enseignants-chercheurs d'AgroSup Dijon et de l'UB. elle rassemble des écologues, agronomes et généticiens autour de problématiques liés à la conception et l'évaluation de systèmes agricoles conciliant productivité agricole et respect de l'environnement. Les participants à CoSAC font partie de deux pôles de l'UMR : EcolDur et GEAPSI. L'objectif d'EcolDur est d'élucider les liens entre systèmes agricoles, fonctionnement des communautés et services agroécologiques afin de concevoir et évaluer des systèmes agricoles durables. Le but de GEAPSI est de caractériser l'adaptation des espèces végétales des agrosystèmes aux contraintes environnementales. Les travaux de l'UMR sont basés sur l'expérimentation, des réseaux de parcelles agricoles et la modélisation (dont le modèle FLORSYS).

Partenaire 2 : UAR1240 Eco-Innov, INRA Grignon – Contact : Frédérique Angevin

La mission principale d'Eco-Innov consiste à développer, à partir de projets interdisciplinaires, des méthodologies d'évaluation des impacts écologiques et agronomiques des innovations en agriculture. Eco-innov coordonne ou participe à plusieurs projets liés à la conception et l'évaluation de systèmes innovants dans le domaine de la coexistence de filières de production et de la protection intégrée. Les travaux sur l'évaluation *a priori* de la durabilité de ces systèmes grâce à la méthodologie de l'analyse multicritère ont abouti à la mise au point des outils MASC®[31] et DEXiPM®[32]. DEXiPM grandes cultures est utilisé actuellement dans le projet européen PURE (2011-2015) pour la conception et l'évaluation de systèmes de culture économes en pesticides.

[30] http://www.rennes.inra.fr/Dispositifs-experimentaux/Plateaux-et-plateformes-technologiques/Plateforme-Means
[31] programmes ADD DISCOTECH, GIS HP2E
[32] programmes européens ENDURE et PURE

Partenaire 3 : UMR Agronomie Environnement, INRA–UdL, Nancy-Colmar, Contact : Christian Bockstaller

L'UMR LAE a une longue expérience dans le développement d'indicateurs ayant recours à des modèles opérationnels. Elle a notamment développé la méthode d'évaluation agri-environnementale INDIGO et est reconnue pour ses travaux méthodologiques sur le sujet, qui se sont traduits par de nombreuses publications. Elle travaille depuis plusieurs années sur l'évaluation des impacts des pratiques agricoles sur la biodiversité notamment floristique en systèmes de grandes cultures et bords de champ, et en prairies. Elle explore différentes méthodes de construction d'indicateurs à partir de l'expertise, des approches de fouilles de données et d'expérimentation numérique (métamodélisation). Elle regroupe des compétences d'agronomes, écologues (microbien, végétaux et paysage) ainsi que de calculs scientifiques.

Partenaire 4 : UMR PSH, INRA Avignon - Contact : Loïc Pagès

L'Unité de Recherche PSH a développé depuis plus de 20 ans des travaux sur la dynamique de l'architecture racinaire et son fonctionnement, en lien avec l'ensemble des fonctions de la plante. Ces travaux ont débouché notamment sur des modèles de développement et d'architecture racinaire tridimensionnelle, ainsi que des modèles couplés architecture – absorption. Plus récemment, des modèles simples et génériques ont été créés pour étudier la diversité racinaire au sein de génotypes de différentes espèces et entre espèces. Ces compétences seront mises à profit pour étendre ce genre de modèle à un ensemble d'espèces adventices jugées pertinentes dans le cadre du projet. Ils seront également simplifiés pour être intégrés au modèle FLORSYS.

Partenaire 5 : ACTA-Contact: Alain Rodriguez

L'animation du réseau des Instituts Techniques Agricoles été confiée à l'ACTA par les pouvoirs publics qui l'ont reconnue comme tête de réseau. La structuration du réseau des Instituts Techniques Agricoles est organisée autour du contrat d'objectifs signé par l'ACTA avec le Ministère de l'Agriculture mais aussi autour de la procédure de qualification des instituts techniques mise en place par le ministère de l'agriculture. Dans sa mission d'animation et d'orientation du réseau des Instituts Techniques Agricoles, l'ACTA s'appuie sur un Conseil d'Orientation Scientifique et Technique (COST). L'ACTA est une association « Loi de 1901 ». Elle est administrée par un Conseil d'Administration qui est notamment chargé d'établir le programme d'activité et d'en définir les moyens d'exécution.

Partenaire 6 : Arvalis-Institut du végétal-Contact: Sandrine Volan

Institut technique de recherche appliquée, l'objectif d'Arvalis est de développer et de transférer des techniques et des informations permettant aux agriculteurs de s'adapter aux besoins du marché, et de maintenir leur compétitivité, tout en préservant l'environnement. Sa mission est de mobiliser son expertise notamment sur la gestion de la flore adventice, sur l'agronomie et sur les systèmes de cultures innovants et durables pour permettre l'émergence de systèmes de production conciliant une contribution positive aux enjeux environnementaux sur l'ensemble du territoire. Ses travaux de recherche ont pour objectif de transférer l'innovation aux producteurs et aux filières (céréales à paille, maïs, sorgho, lin, pommes de terre, fourrage, tabac). De plus ARVALIS participe au GIS GC HP2E-axe adventices et au RMT Florad dont un des axes de travail est la conception et l'aide à la mise au point de stratégies de gestion durable des adventices.

Partenaire 7 : CETIOM - Contact: Jean Lieven

Le CETIOM est l'organisme de R&D au service des productions françaises de cultures oléagineuses et de chanvre. Son objectif principal est d'assurer une production durable de ces cultures en alliant compétitivité économique et respect de l'environnement. Dans le domaine de la lutte contre les adventices, ses missions actuelles et futures se résument à évaluer les nouveaux herbicides proposés par les firmes phytopharmaceutiques, et aussi des techniques alternatives qui permettent la réduction de l'usage des herbicides, mutualiser avec les autres organismes de R&D ses connaissances et expertises agronomiques, transférer les acquis aux agriculteurs et conseillers agricoles en les vulgarisant le mieux possible.

6.3 Qualification de la coordinatrice du projet

Nathalie COLBACH (47 ans), ingénieur agronome et docteur de l'INAPG avec un DEA en écologie (Univ. Orsay, INAPG) et une HDR (2006, UB), est DR2 à l'INRA. Elle anime l'équipe SYSTEME[33] et l'atelier d'animation *Modélisation vs. observation/expérimentation*[34] à l'UMR Agroécologie. Elle est à ce jour l'auteur de 101 publications dans des revues indexées WOS (H=20, N=20)[35] et a développé plusieurs modèles des effets des systèmes de culture sur la dynamique et la génétique d'adventices (GENESYS-COLZA et BETTERAVE, ALOMYSYS,

[33] https://www6.dijon.inra.fr/umragroecologie/Poles-de-Recherches/Ecologie-des-Communautes-et-Durabilite-Systemes-Agricoles/Equipes-de-recherche/Equipe-SYSTEME
[34] http://www6.dijon.inra.fr/umragroecologie/Animation-Scientifique/Ateliers-Scientifiques/Modelisation-vs.-Observation-Experimentation
[35] http://www.researcherid.com/rid/C-6677-2014

FLORSYS) mais aussi de maladies fongiques (TAKEALLSYS...). Elle coordonne actuellement le projet ECOPHYTO FLORSYS (chapitre 2.4.2) et une tâche dans le projet européen AMIGA; elle a coordonnée plusieurs projets (GENESYS-BETTERAVE, 2006-2007) et WPs d'ANR (ADVHERB, VIGIWEED) dans le passé et porté des projets binationaux de modélisation (ex. Univ Rostock, DE, 2013-... ; Teagasc Crops Research Centre, IR, 2007-2008).

7 Justification scientifique des moyens demandés

7.1 Partenaire 1 : INRA Agroécologie

Personnel : Mise à disposition de 145 mois de permanents (INRA, AgroSup Dijon) et 48 mois de doctorants. Recrutement d'un CDD ingénieur (24 mois) pour l'informatisation (programmation) des nouveaux modules de FLORSYS et des nouveaux outils, de main-d'œuvre occasionnelle (2 mois) pour la collecte et le traitement d'échantillons sur les expérimentations en serre (azote).

Missions (19.45k€, 15 chercheurs/enseignants-chercheurs): congrès, suivis d'essais au champ et parcelles d'agriculteurs; Coordination et réunions du projet (4k€)

Autres dépenses de fonctionnement : 57k€. 24,5k€ de Consommables et frais de serre et plate-forme de phénotypage haut-débit (19k€ pour les expérimentations azote et architecture racinaire, 1 mois-1,5k€ pour la manip lumière, 4k€ pour les manips germination), parcelles jardinées (6 mois, 1k€), consommables de laboratoire (400€), frais de publication (traduction, revues payantes, 1,9k€). 18,7k€ : 7 stagiaires M2 (essais azote, semis direct, modélisation architecture racinaire, azote, variables hydrothermiques du sol en semis direct, dispersion anthropique de semences). 10.5k€ d'achats de 4-5 ordinateurs, dont des ordinateurs puissants pour les simulations.

Prestations de service externes : enquêtes en exploitations agricoles (AgroSup Dijon, 2k€), achats de scénarios climatiques (CRC, 12k€), gestion du projet (INRA Transfert, 20k€), vols de drones et analyses d'image (AIRINOV, 8,3k€), analyses de sol (700€).

7.2 Partenaire 2 : INRA EcoInnov

Personnel : Mise à disposition de 9.6 mois de permanents (INRA Eco-Innov et INRA SAD-APT). Un CDD de 24 mois niveau ingénieur de recherche est demandé pour aider à l'animation des groupes de conception de stratégies innovantes et de leurs évaluations avec les différents modèles. Il apportera aussi un appui aux jeux de rôles de la T4. Ces activités sont consommatrices en temps et ne pourraient être assurées sans cela car l'unité Eco-Innov n'a qu'une équipe restreinte.

Missions : 2k€ pour les réunions annuelles du projet, les groupes de conception et la réalisation des enquêtes auprès des agriculteurs dans la T3.

7.3 Partenaire 3 : INRA LAE

Personnel : Tâche 2 : Développement d'outils d'aide à la décision. Mise à disposition de 10 personnes mois.

Missions : 6k€ pour la participation aux 3 réunions de projet par an, au séminaire annuel et 2 colloques internationaux

Autres dépenses de fonctionnement : 13k€. 4k€ pour l'acquisition de matériel informatique et de documentation. 9k€ pour le recrutement de 3 stagiaires M2 de 6 mois.

Dépenses justifiées sur une procédure de facturation interne : 6k€ : frais d'expérimentations (4k€) et la location des véhicules du centre pour les déplacements lors des réunions projets (2k€).

7.4 Partenaire 4 : INRA PSH AVIGNON

Personnel : Recrutement de main d'œuvre occasionnelle en été pour compléter les moyens nécessaires au prélèvement et traitement de nombreux échantillons sur le terrain dans la tâche 1.

Missions : 3k€ pour de nombreuses missions de terrain courtes pour assurer le prélèvement d'échantillons, une réunion de projet par an pour une personne, une mission de valorisation (présentation de résultats lors d'un colloque international).

Autres dépenses de fonctionnement : 8,6k€. 6k€ pour les divers consommables (laboratoire, bureau), le renouvellement du matériel (prélèvement, mesure, informatique), participation aux frais de l'Unité induits (en matière de fluides notamment). 2,65k€ pour un stage M2 de 6 mois pour un écologue ou écophysiologiste pour réaliser une partie du travail bibliographique et de l'analyse des données.

7.5 Partenaire 5 : ACTA

Personnel : 30,7k€ pour la mise à disposition de 2 ingénieurs : T2.1 ETP (5,775k€) et T4 ETP (5k€).

Missions : 8k€ pour 8 réunions et 4 journées techniques sur la durée du projet.

Autres dépenses de fonctionnement : 14k€. 11k€ pour les frais d'organisations et d'animation des réunions et de séminaires internes à mi parcours et final ainsi qu'un document final de présentation des résultats et + 3k€ pour le recrutement de 6 mois de stagiaire
Prestations de service externes : 7k€ à IN VIVO pour son expertise sur les besoins des agriculteurs (T2 et 4).

7.6 Partenaire 6 : ARVALIS

Personnel *:* **T1**, évaluation des effets des techniques innovantes sur la régulation des adventices avec des suivis d'essais analytiques (sur le travail du sol, système de cultures, interculture et déchaumage, notations d'adventices sur essai fertilisation). **T2**, mise à disposition des suivis d'adventices sur des essais longue durée afin d'évaluer FLORSYS dans des situations variées ; mise à disposition des observations de suivis d'adventices *via* entre autres des essais longue durée, les essais d'évaluation herbicides (mutualisation d'un CDD avec le CETIOM) pour le développement d'un nouveau module de phénologie ; discussion du choix des indicateurs pour améliorer la capacité d'évaluation des systèmes de culture et à l'établissement d'un cahier des charges pour l'OAD. **T4**, diffusion auprès d'un large public des conseils, outils et méthodes développés *via* notamment le RMT Florad, le GIS GC HP2E. Identification des verrous à l'adoption des innovations.
Missions *:* 17k € pour les réunions du projet, le suivi d'expérimentations sur le terrain.
Autres dépenses de charges externes : 13k€. recrutement de stagiaires : **T1** suivi essai analytique de longue durée sur travail du sol (6 mois), **T2** établissement des extractions possibles et constitution d'un jeu de données nécessaire aux travaux de validation (6 mois), **T3**, évaluation de systèmes de culture innovants permettant la gestion durable des adventices (18 mois à 436€/mois).

7.7 Partenaire 7 : CETIOM

Personnel *:* **T1** : analyse de données (colza-légumineuses) sous l'angle malherbologique ; mise en œuvre de nouveaux protocoles d'essais analytiques 2015-2018 dans différents contextes pédoclimatiques et floristiques ; recherche expérimentale portant sur les effets sur la flore adventice de la gestion d'interculture ; cartographie des adventices pour définir des algorithmes de calcul d'analyse d'image permettant de distinguer des adventices et l'espèce cultivée ; résultats d'observations et mesures, coordonnées GPS des points de contrôle. **T2** : préparation des données disponibles et nécessaires pour le paramétrage et l'évaluation de nouveaux modules de FLORSYS ; relevé, en culture de tournesol, des stades phénologiques (levée et floraison) à partir de parcelles agricoles ; synthèse et centralisation des données phénologiques d'adventices observées dans les essais désherbage des dernières années (stagiaire de 3 mois sans financement ANR demandé) ; élaboration d'outils opérationnels d'aide à la conception de systèmes de culture ; réalisation d'un cahier des charges précédant la création d'un prototype de nouvel OAD. **T3 :** Participation aux groupes de conception. **T4 :** en réponse aux sollicitations d'organisations de jeux de rôle et démonstrations de l'OAD.
Missions : 2,6k€ pour les réunions du projet et les frais de déplacement sur le terrain.
Autres dépenses de fonctionnement : 1,5k€ de frais d'audit et de certification des comptes par un commissaire aux comptes.

8 Références bibliographiques

Alignier A, Ricci B, Biju-Duval L & Petit S (2013) Identifying the relevant spatial and temporal scales in plant species occurrence models: the case of arable weeds in landscape mosaic of crops. Ecological Complexity 15, 17-25.

Altieri MA & Whitcomb WH (1980) Weed manipulation for insect pest management in corn. Environmental Management 4, 483-489.

ARVALIS (2009) Impacts environnementaux des techniques culturales sans labour en France. Éditions Arvalis

ARVALIS (2011) Cultures intermédiaires, impacts et conduite. Éditions Arvalis

Asseng S, Ewert F, Rosenzweig C, Jones JW, Hatfield JL, et al. (2013) Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. Nature Climate Change 3, 827-832.

Attoumani-Ronceux A, Aubertot JN, Guichard L, Jouy L, Mischler P, et al. (2011) Guide pratique pour la conception de systèmes de culture économes en produits phytosanitaires – Application aux systèmes de polyculture. Guide édité dans le cadre du plan Ecophyto 2018, téléchargeable sur www.systemesdecultureinnovants.org/) pour les différents leviers de gestion des adventices.

Auberger J, Gésan-Guiziou G, Haese C, Aubin J & van der Werf H (2013) MEANS : une plateforme informatique INRA pour l'analyse multicritère de la durabilité des systèmes agricoles et agro-alimentaires. Innovations Agronomiques 31, 169-181.

Baraibar B, Westerman PR & Recasens J (2009) Effects of tillage and irrigation in cereal fields on weed seed removal by seed predators. Journal of Applied Ecology 46, 380--387.

Benvenuti S (2007) Weed seed movement and dispersal strategies in the agricultural environment. Weed Biology and Management 7, 141-157.

Berge TW, Goldberg S, Kaspersen K & Netland J (2013) Towards machine vision based site-specific weed management in cereals. Computers and Electronics in Agriculture 81, 79-86.

Bergez JE, Colbach N, Crespo O, Garcia F, Jeuffroy MH, et al. (2010) Designing crop management systems by simulation. Eur J Agron 32, 3-9.

Blackshaw RE, Brandt RN, Janzen HH, Entz T, Grant CA, et al. (2003) Differential response of weed species to added nitrogen. Weed Sci 51, 532-539.

Bockstaller C, Guichard L, Keichinger O, Girardin P, Galan MB, et al. (2009) Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. Agron Sustain Dev 29, 223-235.

Bohan DA, Boursault A, Brooks DR & Petit S (2011) National-scale regulation of the weed seedbank by carabid predators. Journal of Applied Ecology 48, 888-898.

Bonin L (2009) Combinaisons de techniques: un désherbage integré pour durer? Perspectives agricoles 361, 22-24.

Bonin L, Labreuche J, Coinus L & Liévin J (2010) Faisabilité du désherbage mécanique en grandes cultures, évaluation du nombre de jours disponibles. *In:*

AFPP, 21 ième conference du COLUMA Journées internationals sur la lute contre les mauvaises herbes, Dijon, France
Bonin L, Orlando B & Gautellier-Vizioz L (2013) Impact des pratiques de désherbage dans la gestion du risque *Claviceps purpurea*. *In:* AFPP-22è Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France
Bossu J, Gée C & Truchetet F (2008) Development of a machine vision system for a real time precision sprayer. Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis 7, 54-66.
Bouvier A, Adamczyk K, Kiêu K & Monod H (2009) Computation of integrated flow of particles between polygons. Environmental Modelling and Software.
Brisson N & Levrault F (2010) Livre vert du projet CLIMATOR (http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/) 334 p.
Brooks RJ, Semenov MA & Jamieson PD (2001) Simplifying Sirius: sensitivity analysis and development of a meta-model for wheat yield prediction. Eur J Agron 14, 43-60.
Castel T, Xu Y, Richard Y, Pohl B, Crétat J, et al. (2010) Assessment of Dynamic Downscaling of the Continental East French Regional Climate at high resolution using the ARW/ WRF model. AIC 23, 107-112.
Cerf M, Jeuffroy MH, Prost L & Meynard JM (2012) Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. Agron Sustain Dev 32, 899-910.
Chassine JC, Bonin L, Labreuche J & Vacher C (2009) Impact du travail du sol pendant l'interculture et du type de semis sur la présence de ray-grass dans le blé tendre. *In:* XIIIème colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, Dijon, France
Chauvel B, Guillemin JP & Colbach N (2009) Evolution of a herbicide-resistant population of *Alopecurus myosuroides* Huds. in a long-term cropping system experiment. Crop Protection 28, 343-349.
Colbach N, Chauvel B, Darmency H, Délye C & Le Corre V Adapting cropping system to delay herbicide resistance. A simulation study. Pest Management Science.
Colbach N (2009) How to model and simulate the effects of cropping systems on population dynamics and gene flow at the landscape level. Example of oilseed rape volunteers and their role for co-existence of GM and non-GM crops. Environmental Sciences & Pollution Research 16, 348–360.
Colbach N (2010) Modelling cropping system effects on crop pest dynamics: how to compromise between process analysis and decision aid. Plant Sci 179, 1-13.
Colbach N, Collard A, Guyot SHM, Mézière D & Munier-Jolain NM (2014) Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. Eur J Agron 53, 74-89.
Colbach N, Busset H, Gardarin A, Granger S, Meunier D, et al. (in preparation) Evaluating a complex, multi-specific weed dynamics model. I. How to exploit diverse and incomplete data sets. Ecol Modelling.
Conti S & O'Hagan A (2010) Bayesian emulation of complex multi-output and dynamic computer models. Journal of Statistical Planning and Inference 140, 640-651.
Corre-Hellou G, Dibet A, Hauggaard-Nielsen H, Crozat Y, Gooding M, et al. (2011) The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. Field Crops Research 122, 264-272.
Craheix D, Colnenne-David C, Pelzer E, Torres N & Angevin F Design and assessment with farmers of innovative cropping systems to mitigate climate change and to meet sustainability requirements. Eur J Agron, submitted.
Délye C, Jasieniuk M & Le Corre V (2013) Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. Trends in Genetics 29, 649-658.
den Hollander NG, Bastiaans L & Kropff MJ (2007) Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design - I. Characteristics of several clover species. European Journal of Agronomy 26, 92-103.
Doré T, Clermont-Dauphin C, Crozat Y, David C, Jeuffroy MH, et al. (2008) Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. Agron Sustain Dev 28, 151-161.
Faivre R, Iooss B, Mahévas S, Makowski D & Monod H (2013) Analyse de sensibilité et exploration de modèles. Editions Quae, Versailles, France
Forcella F & Lindstrom MJ (1988) Weed seed populations in ridge and conventional tillage. Weed Science 36, 500-503.
Fried G, Norton LR & Reboud X (2008) Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. Agric Ecosyst Environ 128, 68-76.
Gardarin A, Dürr C & Colbach N (2010a) Effects of seed depth and soil structure on the emergence of weeds with contrasted seed traits. Weed Res 50, 91-101.
Gardarin A, Dürr C, Mannino MR, Busset H & Colbach N (2010b) Seed mortality in the soil is related to the seed coat thickness. Seed Science Research 20, 243-256.
Gardarin A, Dürr C & Colbach N (2012) Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. Ecol Modelling 240, 123-138.
Garnier A, Pivard S & Lecomte J (2008) Measuring and modelling anthropogenic secondary seed dispersal along roadverges for feral oilseed rape. Basic and Applied Ecology 9, 533-541.
Gée C, Gobin B, Busvelle E, Villette S, Jones G, et al. (2013) I-WEED ROBOT: un robot autoguidé pour un désherbage localisé. *In:* 22ème Conférence du COLUMA, Dijon, France
Gibot-Leclerc S, Brault M, Pinochet X & Sallé G (2003) Potential role of winter rape weeds in the extension of broomrape in Poitou-Charentes. Comptes Rendus de Biologie 326, 645-658.
Guillemin J-P, Gardarin A, Granger S, Reibel C & Colbach N (2013) Determination of base temperatures and base water potentials for germination of weeds. Weed Res 53, 76-87.
Habekotté B (1997) A model of the phenological development of winter oilseed rape (Brassica napus L.). Field Crops Research 54, 127-136.
Hill RL (1990) Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. Soil Science Society of America Journal 54, 161-166.
Hodge A, Berta G, Doussan C, Merchan F & Crespi M (2009) Plant root growth, architecture and function. Plant and Soil 321, 153-187.
Holland JM (2004) The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. Agriculture Ecosystems & Environment 103, 1-25.
Holst N, Rasmussen IA & Bastiaans L (2007) Field weed population dynamics: a review of model approaches and applications. Weed Res 47, 1-14.
INRA (2010) Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides., http://www.inra.fr/l_institut/etudes/ecophyto_r_d/ecophyto_r_d_resultats p.
ITB (2009) L'enfouissement localisé de l'azote est toujours d'actualité. LA TECHNIQUE BETTERAVIÈRE 908.
Jeuffroy MH, Bergez JE, David C, Flénet F, Gate P, et al. (2008) Utilisation de modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale: bilan et perspectives. In: Systèmes de culture innovants et durables, quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer? (R. Reau & T. Doré, eds.) Ed. Educagri
Jones G, Gée C & Truchetet F (2009) Assessment of an inter-row Weed Infestation Rate on simulated agronomic images by image processing. Computers and Electronics in Agriculture 67, 43-50.
Jones G, Gée C, Villette S & Truchetet F (2010) Validation of a crop field modelling to simulate agronomic images. Optics Express 18, IF: 3,88. http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?uri=oe-18-10-10694.
Jordan N (1992) Weed demography and population dynamics: Implications for threshold management. Weed Technol 6, 184-190.
Jouy L & Tournier A (2011) Ajuster ses pratiques grâce à des indicateurs. Perspectives Agricoles 383, 40-42.
Kirkland KJ & Beckie HJ (1998) Contribution of nitrogen fertilizer placement to weed management in spring wheat (Triticum aestivum). Weed Technology 12, 507-514.
Lançon J, Wéry J, Rapidel B, M A, Gérardeaux E, et al. (2007) An improved methodology for integrated crop management systems. Agron Sustain Dev 27, 101-110.

Lemaire G & Salette J (1984) Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. II. Etude de la variabilité entre génotypes. Agronomie 4, 431-436.
Lemaire G, Avice JC, Kim TH & Ourry A (2005) Developmental changes in shoot N dynamics of lucerne (Medicago sativa L.) in relation to leaf growth dynamics as a function of plant density and hierarchical position within the canopy. Journal of Experimental Botany 56, 935-943.
Liebman M & Dyck E (1993) Crop rotation and intercropping strategies for weed managment. Ecological applications 3, 92-122.
Liebman M & Gallandt ER (1997) 9 - Many Little Hammers: Ecological Management of Crop-Weed Interactions. In: Ecology in Agriculture (L. E. Jackson, ed.) Academic Press:291-343
Lieven J, Doumenc A & Segura R (2013) Influence des façons culturales sur les levees de moutarde des champs, ravenelle et repousses de colza en interculture. *In:* XXIIème colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, Dijon, France
Loyce C & Wéry J (2006) Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture. In: L'agronomie aujourd'hui (T. Doré, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney & J. Roger-Estrade, eds.) QUAE Éditions:77-95
Makowski D, Doré T, Gasquez J & Munier-Jolain NM (2007) Modelling land use strategies to optimize crop production and protection of ecologically important weed-species. Weed Res 47, 202-211.
Marshall EJP, Brown VK, Boatman ND, Lutman PJW, Squire GR, et al. (2003) The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. Weed Res 43, 77-89.
Menalled FD, Marino PC, Renner KA & Landis DA (2000) Post-dispersal weed seed predation in Michigan crop fields as a function of agricultural landscape structure. Agric Ecosyst Environ 77, 193-202.
Meynard J-M, Messéan A, Charlier A, Charrier F, Fares M, et al. (2013) Freins et leviers à la diversification des cultures : étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. OCL - Oléagineux Corps Gras Lipides 20, 4-10.
Mézière D, Petit S, Granger S, Biju-Duval L & Colbach N (in revision) Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. Ecological Indicators.
Mitchell G, May A & McDonald A (1995) PICABUE: a methodological framework for the development of indicators of sustainable development. International Journal of Sustainable Development and World Ecology 2, 104-123.
Moreau D, Milard G & Munier-Jolain N (2013) A plant nitrophily index based on plant leaf area response to soil nitrogen availability. Agron Sustain Dev 33, 809-815.
Moss R, Edmonds J, Hibbard K, Manning M, Rose S, et al. (2010) The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. Nature 463.
Munier-Jolain NM, Savois V, Kubiak P, Maillet-Mézeray J, Jouy L, et al. (2005) DECID'Herb, a decision support system on the WEB, designed for sustainable weed management in cultivated fields. *In:* 13th International EWRS Symposium, Bari, Italy
Munier-Jolain NM, Guyot SHM & Colbach N (2013) A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies. Model structure and evaluation. Ecol Modelling 250, 101-110.
Munier-Jolain NM, Collard A, Busset H, Guyot SHM & Colbach N (2014) Modelling the morphological plasticity of weeds in multi-specific canopies. Field Crops Research 155, 90-98.
Oerke E (2006) Crop losses to pests. Journal of Agricultural Science 144, 31-43
Pagès L (2011) Links between root developmental traits and foraging performance. Plant, Cell & Environment 34, 1749-1760.
Pagès L, Xie J & Serra V (2013) Potential and actual root growth variations in root systems: modeling them with a two-step stochastic approach. Plant and Soil 373, 723-735.
Pagès L, Bécel C, Boukcim H, Moreau D, Nguyen C, et al. (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, et al. (2012) Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. Ecological Indicators 18, 171-182.
Petit S, Boursault A, Le Guilloux M, Munier-Jolain N & Reboud X (2011) Weeds in agricultural landscapes. A review. Agron Sustain Dev 31, 309-317
Pottier M, Toque C, Vacher C, Gautellier-Vizioz L, Jouy L, et al. (2013) Maîtrise de la flore adventice dans l'essai système "Fermes de Boigneville": Méthodologie et premiers résultats de l'analyse de 20 ans de références sur quatre systèmes d'exploitation. *In:* AFPP – 22é Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France
Prost L (2008) Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilsateurs: le cas de la modéilsation des interactions génotype-environnement et de l'outil Diagvar. *PhD Thesis, AgroParisTech, Paris.* 214 p.
Rasmussen IA (2004) The effect of sowing date, stale seedbed, row width and mechanical weed control on weeds and yields of organic winter wheat. Weed Res 44, 12-20.
Rasmussen K (2002) Influence of liquid manure application method on weed control in spring cereals. Weed Res 42, 287-298.
Reibel C, Guillemin JP, Cordeau S & Chauvel B (2010) Ability of seedling emergence and plant establishment of weeds in sown grass strips. In: 21eme Conference du COLUMA Journees Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes, Dijon, France, 8-9 decembre, 2010:177-184
Renton M, Diggle A, Manalil S & Powles S (2011) Does cutting herbicide rates threaten the sustainability of weed management in cropping systems? Journal of Theoretical Biology 283, 14–27.
Ricou C, Schneller C, Amiaud B, Plantureux S & Bockstaller C (2014) A vegetation-based indicator to assess the pollination value of field margin flora. Ecological Indicators, in press.
Rodriguez A (2013) Techniques très simplifiées d'implantation des grandes cultures et gestion de la flore adventice en région Midi-Pyrénées. *In:* AFPP – 22e Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France
Skamarock WC, Klemp JB, J D, Gill DO, Barker DM, et al. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3 NCAR Technical Note. 125 p.
Slaughter DC, Giles DK & Downey D (2008) Autonomous robotic weed control systems: A review Computers and Electronics in Agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 61, 63-78.
Thomson FJ, Moles AT, Auld TD & Kingsford RT (2011) Seed dispersal distance is more strongly correlated with plant height than with seed mass. Journal of Ecology 99, 1299-1307.
Trichard A, Alignier A, Chauvel B & Petit S (2013) Identification of weed community traits response to conservation agriculture. Agriculture Ecosystems & Environment 179, 179-186.
Ugarte C, Nicolardot B, Quinche M, Munier-Jolain N & Ubertosi M (submitted) Effects of integrated weed management based cropping systems on the water retention properties of a silty clay loam soil. Soil Tillage Res, soumis.
Valantin-Morison M & Meynard JM (2008) Diagnosis of limiting factors of organic oilseed rape yield. A survey of farmers' fields. Agron Sustain Dev 28, 527-539.
Vanloqueren G & Baret PV (2008) Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural "lock-in" case study. Ecological Economics 66, 436-446.
Voldoire A, Sanchez-Gomez E, Mélia DSy, Decharme B, Cassou C, et al. (2013) The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. Clim Dyn 40, 2091-2121.
Wallach D (2006) Evaluating crop models. In: Working with dynamic crop models: evaluating, analyzing, parameterizing and using them (D. Wallach, D. Makowski & J. W. Jones, eds.) Éditions INRA, Paris:11-53
Wisler GC & Norris RF (2005) Interactions between weeds and cultivated plants as related to management of plant pathogens. Weed Sci 53, 914-917.
Xu Y, Castel T, Richard Y, Cuccia C & Bois B (2012) Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines. Climate Dynamisc 39, 1613-1626.