Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

APR « Pour et Sur le Plan Ecophyto 2018 » (PSPE1)
Edition 2012 : Pour et Sur trois dispositifs du Plan

Epidémiosurveillance / DEPHY / Indicateurs

Approches de modélisation pour l'évaluation et la comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes

Acronyme : Perform

Convention ONEMA du 1er juillet 2013

Coordinatrice : Laure MAMY
INRA - Unité ECOSYS, Pôle Science du Sol 78850 Thiverval-Grignon ; laure.mamy@inra.fr

Participants : Laure Mamy, Lionel Alletto, Enrique Barriuso, Carole Bedos, Pierre Benoit, François Brun, Benoît Gabrielle, Simon Giuliano, Andy D.M. Hart, Eric Justes, Marc C. Kennedy, David Makowski, Jesús-María Marín-Benito, Julien Moeys, Valérie Pot, Daniel Poudroux, Thibaud Quemar, Gaël Rametti, Karen Yemadje-Lammoglia

Rapport final – 24 avril 2017

Sommaire

1. Fiche de synthèse à diffusion publique 1

2. Rapport d'activités 5

2.1 Exécution du projet (par tâche, par partenaire) et moyens (humains et techniques) mis en œuvre 6

2.2 Réalisation des jalons et de la production des livrables annoncés 8

2.3 Collaborations effectives à l'intérieur du projet et entre projets 9

2.4 Liens établis avec les acteurs du plan Ecophyto, en particulier du ou des dispositifs concernés 11

2.5 Produits du projet 12

3. Rapport scientifique 16

3.1 Introduction : contexte, objectifs et démarche 16

3.2 Matériels et méthodes 17

3.3 Résultats et discussion 26

3.4 Conclusion 36

Références 36

4. Contribution au plan Ecophyto (et à l'agroécologie) 41

1. Fiche de synthèse à diffusion publique

Nom du projet : Perform
Titre du projet : Approches de modélisation pour l'évaluation et la comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes
Mois/Année de démarrage : 07/2013
Mois/Année de fin : 01/2017
Responsable scientifique : Laure Mamy
Partenaires : INRA (Enrique Barriuso, Carole Bedos, Pierre Benoit, Eric Justes, David Makowski, Laure Mamy, Nicolas Munier-Jolain, Valérie Pot, Sabine-Karen Lammoglia), ACTA (François Brun, Thibaud Quemar), AgroParisTech (Benoît Gabrielle), AgroSup Dijon (Bernard Nicolardot, Marjorie Ubertosi), INP EI-Purpan (Lionel Alletto, Simon Giuliano, Gaël Rametti), Université d'Uppsala - Suède (Julien Moeys), FERA - UK (Marc C Kennedy, Andy DM Hart), IRNASA-CSIC - Espagne (Jesús-María Marín-Benito)
Financements : APR « Pour et sur le plan Ecophyto 2018 » (PSPE1) - Edition 2012 : Pour et Sur trois dispositifs du Plan

Mot clés : Systèmes de culture, Pesticides, Modélisation, Variabilité, Incertitudes, Environnement, Santé

En quelques mots :
Lors de la conception de systèmes de culture permettant de réduire l'utilisation des pesticides, il est nécessaire de prendre en compte des critères liés aux impacts environnementaux et sanitaires de ces systèmes. De nouvelles approches de modélisation ont donc été développées pour permettre une évaluation *ex ante* des impacts liés aux pesticides. Une analyse de sensibilité des modèles et le traitement des incertitudes des paramètres les plus influents ont montré que les systèmes impliquant un travail du sol simplifié auraient tendance à augmenter les impacts (multiplication des traitements herbicides) tandis que les systèmes bas et très bas niveaux d'intrants, réduisant l'IFT d'au moins 50%, et les systèmes avec désherbage mécanique permettraient de réduire ces impacts.

Contexte et objectifs :
Le plan Ecophyto vise à réduire l'utilisation des pesticides et des impacts associés. Pour atteindre ces objectifs, il faut notamment concevoir de nouveaux systèmes de culture moins dépendants des pesticides. Différentes procédures permettent de concevoir des systèmes répondant à des objectifs prédéfinis, en particulier grâce à des outils d'aide à la décision intégrant l'évaluation *ex ante* des performances agronomiques et socio-économiques des systèmes. Cependant, dans ces outils, l'évaluation des impacts environnementaux et sanitaires des pesticides utilisés dans l'ensemble du système de culture est soit inexistante, soit imprécise et qualitative.
Dans ce contexte, l'objectif du projet Perform consiste à développer une démarche d'évaluation globale par système de culture permettant de comparer les impacts des pesticides sur l'environnement et sur la santé. Cette démarche tient compte (1) de la complexité des systèmes, (2) de l'utilisation globale des pesticides dans l'ensemble de la rotation, (3) de la variabilité spatio-temporelle des conditions agro-pédoclimatiques et (4) des principales sources d'incertitudes affectant les flux de pesticides responsables des impacts.
Le projet ECoPESt (APR Pesticides) a été mené en parallèle de ce projet pour compléter l'évaluation des outils de modélisation existants, permettre l'acquisition d'observations de terrain et établir le lien pratiques-pression-impacts.

Principaux résultats et intérêts en lien avec le plan Ecophyto :

Dans un premier temps, une nouvelle approche de modélisation basée sur une utilisation séquentielle du modèle de culture STICS et du modèle « pesticides » MACRO a été développée afin de simuler les flux de pesticides vers les eaux souterraines, dans des systèmes de culture complexes. Le modèle ainsi conçu, STICS-MACRO, a été testé en confrontant les résultats des simulations à des mesures de concentrations en pesticides dans l'eau du sol prélevée à différentes profondeurs. Ces mesures ont été faites dans des lysimètres implantés sur plusieurs sites où sont expérimentés des systèmes de culture innovants (Figure F1). Les résultats ont montré que la performance de STICS-MACRO était acceptable, sans phase de calage, même si elle dépend des conditions pédoclimatiques. Par rapport aux modèles « pesticides » existants, STICS-MACRO permet, en outre, d'accéder à d'autres sorties d'intérêt environnemental (dynamique des composés azotés) et agronomique (rendements).

Figure F1. (a) Site expérimental de Lamothe (© Lionel Alletto, INP - EI Purpan) ; (b) Site expérimental d'Auzeville (© Eric Justes, INRA) ; (c) Site expérimental de Dijon (© Pascal Farcy, INRA)

Une analyse de sensibilité globale de STICS-MACRO, basée sur la méthode de Morris, a ensuite permis d'évaluer et de comparer les effets d'un grand nombre de pratiques agricoles sur les flux de pesticides. L'apport de résidus organiques au sol et le travail du sol simplifié ont été identifiés comme étant les pratiques qui conduisent à une augmentation des flux d'eau et de pesticides vers les eaux souterraines, essentiellement parce qu'elles modifient le bilan hydrique dans les sols (Figure F2).

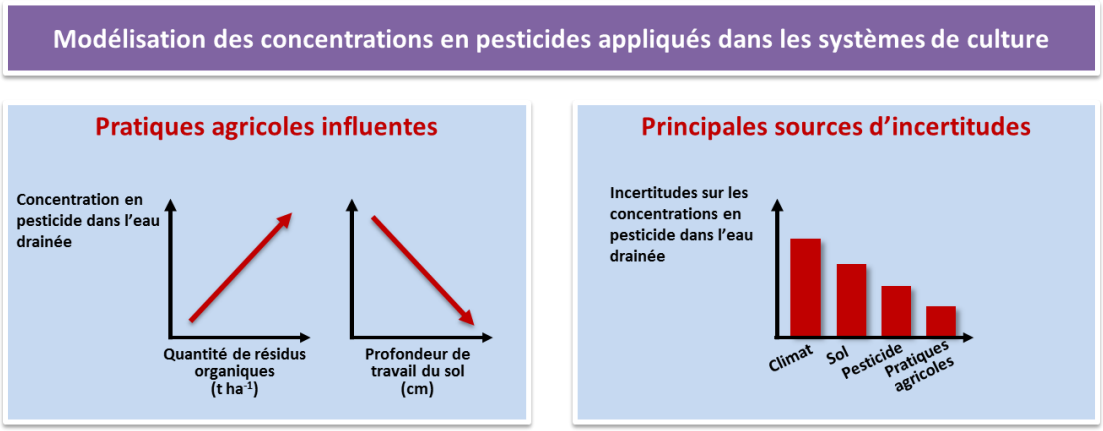

Figure F2. Synthèse des principaux résultats obtenus dans le projet Perform : identification par modélisation des pratiques agricoles les plus influentes et étude de leurs effets sur les concentrations simulées en pesticides dans l'eau drainée ; identification des principales sources d'incertitudes des concentrations en pesticides dans l'eau drainée

Dans une troisième étape, une analyse d'incertitudes, basée sur la méthode d'échantillonnage par Hypercube latin, a été réalisée afin de déterminer le niveau de confiance qui peut être accordé aux résultats des simulations de STICS-MACRO. Cette analyse a été focalisée sur les caractéristiques du climat, du sol et des pesticides et sur les pratiques agricoles. Au final, les incertitudes liées au sol, aux pesticides et aux pratiques agricoles semblent avoir moins d'influence sur la prédiction des concentrations en pesticides dans les eaux souterraines que les incertitudes liées au climat (précipitations en particulier) (Figure F2).
Enfin, un modèle d'évaluation de l'exposition de la population humaine aux pesticides, BROWSE, a été utilisé afin d'estimer les risques pour la santé des applicateurs et des riverains liés à la totalité des pesticides utilisés dans un système de culture. Comme BROWSE ne peut traiter qu'un seul pesticide à la fois, nous avons proposé une méthode afin de représenter les résultats obtenus pour l'ensemble des pesticides appliqués dans un même système et ainsi comparer les différents systèmes étudiés. Cette méthode a montré que les systèmes basés sur un travail du sol simplifié tendent à augmenter les impacts sanitaires en raison de la multiplication du nombre de traitements herbicides. Les résultats de l'analyse de sensibilité avaient par ailleurs montré que ces systèmes présentaient aussi les risques les plus élevés de contamination des eaux souterraines par les pesticides. En revanche, les systèmes bas ou très bas niveaux d'intrants visant une réduction d'au moins 50% de l'IFT par rapport aux systèmes conventionnels correspondants, basés notamment sur des rotations et non sur des monocultures, et les systèmes de culture privilégiant les techniques de désherbage mécanique (i.e. systèmes sans herbicide) permettent de réduire de façon significative les impacts sur la santé et ils ont aussi un impact plus faible sur l'environnement.

Lien avec le plan Ecophyto :
Perspective de transfert :
Les résultats issus de la modélisation intéressent directement les professionnels car ils apportent des critères quantitatifs permettant, au moment de la mise en place des systèmes de culture, de connaître les risques environnementaux et sanitaires. Les outils de modélisation permettent en outre d'identifier les systèmes ayant le moins d'impacts, ainsi que les pesticides contribuant le plus aux risques globaux des systèmes, dans l'optique de leur substitution. Ces travaux seront diffusés dans Innovations Agronomiques, Phytoma... Par ailleurs, les participants au projet contribueront à des sessions de formation pour présenter les démarches, les résultats et les propositions de systèmes innovants.

Perspective de recherche :
Les nouvelles approches de modélisation développées se veulent génériques, mais pour pouvoir généraliser les résultats de ce travail, la capacité de STICS-MACRO à décrire correctement les flux de pesticides dans d'autres contextes agro-pédoclimatiques reste à tester. Il serait important d'élargir la gamme de variation des paramètres les plus sensibles et d'analyser les incertitudes associées aux modifications du régime hydrique et des températures dans un contexte, par exemple, de changement climatique. Enfin, les approches développées ici pourraient être utilisées dans le cadre du réseau FERME DEPHY afin d'étendre l'évaluation des impacts à une échelle nationale et d'intégrer une plus grande gamme de scénarios et de systèmes associés.

Publications scientifiques et autres valorisations du projet :
Références bibliographiques principales des documents valorisés (4 maximum)
- Lammoglia SK, 2016. Approches de modélisation pour évaluer et comparer les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine des pesticides utilisés dans des systèmes de culture conçus pour réduire l'usage des pesticides. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 196p.
- Lammoglia SK, Moeys J, Barriuso E, Larsbo M, Marin-Benito JM, Justes E, Alletto L, Ubertosi M, Nicolardot B, Munier-Jolain N, Mamy L, 2017. Sequential use of the STICS crop model and of the

MACRO pesticide fate model to simulate pesticides leaching in cropping systems. Environ Sci Pollut Res 24, 6895-6909.
- Lammoglia SK, Kennedy MC, Barriuso E, Alletto L, Justes E, Munier-Jolain N, Mamy L. Assessing human health risks from pesticide use in conventional and innovative cropping systems with the BROWSE model (soumis).
- Lammoglia SK, Brun F, Quemar T, Moeys J, Barriuso E, Gabrielle B, Mamy L. Modelling pesticides leaching in cropping systems: effect of uncertainties in climate, soil and pesticide properties, and agricultural practices (en préparation).

2. Rapport d'activités

Dans la perspective de proposer des outils d'évaluation *ex ante* des systèmes de culture qui permettraient de réduire l'utilisation et les impacts des pesticides, les objectifs du projet Perform consistaient à (1) développer de nouvelles approches de modélisation permettant d'évaluer et de comparer les performances environnementales et sanitaires des systèmes de culture (vis-à-vis de l'utilisation des pesticides) et (2) étudier les effets de la variabilité des conditions agro-pédoclimatiques et des principales sources d'incertitudes liées au climat, aux pratiques agricoles et aux propriétés des sols et des pesticides sur l'évaluation des concentrations en pesticides dans l'environnement.
Le projet était organisé en 5 tâches techniques (Tâches 0 à 4) et une tâche de coordination (Tâche 5) (Figure A1). Les tâches 0 et 4 n'étaient pas prévues au moment du dépôt du projet, elles ont été ajoutées après. La tâche 0 est une conséquence des résultats du projet ECoPESt qui a été conduit en parallèle à Perform (Cf 2.3.2) et la tâche 4 a été rajoutée car nous voulions compléter l'évaluation des performances environnementales des systèmes de culture par l'évaluation de leurs performances sanitaires.
Cette section 2 présente les activités réalisées dans le cadre du projet Perform, tandis que la section 3 présente le rapport scientifique.

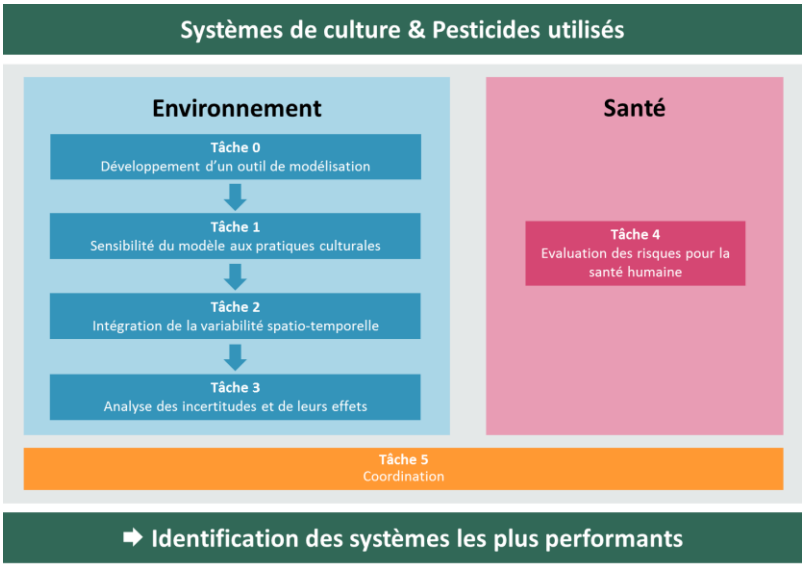

Figure A1. Organisation du projet Perform

2.1 Exécution du projet (par tâche, par partenaire) et moyens (humains et techniques) mis en œuvre

Les partenaires impliqués et leurs contributions sont indiqués ci-dessous et dans le Tableau A1.
Trois partenaires qui n'étaient initialement pas associés à Perform (INRA-Agronomie, Fera Science Ltd. et IRNASA-CSIC) ont été sollicités au cours du projet pour répondre à des besoins de compétences apparus ultérieurement (analyse de sensibilité, risques pour la santé humaine).

INRA – UMR ECOSYS (Thiverval-Grignon)

Participants : Laure Mamy, Enrique Barriuso, Carole Bedos, Pierre Benoit, Benoît Gabrielle, Valérie Pot, Daniel Poudroux, Karen Yemadje-Lammoglia (Tâches 0 à 5)

- Coordination du projet
- Responsables Tâche 2 (Pierre Benoit), Tâche 3 (Benoît Gabrielle) et Tâches 0, 4 et 5 (Laure Mamy)
- Thèse de Karen Yemadje-Lammoglia
- Encadrement de la thèse de Karen Yemadje-Lammoglia (Enrique Barriuso et Laure Mamy)
- Développement de STICS-MACRO
- Analyse de sensibilité
- Analyse d'incertitudes
- Evaluation des risques pour la santé humaine (modèle BROWSE)

INRA – UMR Agronomie (Thiverval-Grignon)

Participant : David Makowski (Tâche 1)

- Analyse de sensibilité

INRA – UMR 1248 AGIR (Castanet-Tolosan)

Participant : Eric Justes (Tâches 0, 1, 4)

- Données expérimentales issues du site de Toulouse-Auzeville
- Développement de STICS-MACRO
- Analyse de sensibilité
- Evaluation des risques pour la santé humaine

INP – Ecole d'Ingénieurs de Purpan – Equipe DINA (Toulouse)

Participants : Lionel Alletto, Simon Giuliano, Gaël Rametti (Tâches 0, 1, 4)

- Données expérimentales issues du site de Toulouse-Lamothe
- Développement de STICS-MACRO
- Evaluation des risques pour la santé humaine

ACTA – Le Réseau des Instituts des filières animales et végétales (Castanet-Tolosan)

Participants : François Brun, Thibaud Quemar (Tâche 3)

- Analyse d'incertitudes
- Encadrement du stage de Master 2 de Thibaud Quemar (16 février - 16 juillet 2015).
  Sujet : « Analyse d'incertitudes d'un modèle de flux de pesticide en situation agronomique »

Biogeophysics and Water Quality division – Department of Soil and Environment – Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) (Uppsala, Suède)

Participant : Julien Moeys (Tâches 0 à 3, 5)

- Responsable Tâche 1
- Développement de STICS-MACRO
- Analyse de sensibilité
- Analyse d'incertitudes
- Accueil de Karen Yemadje-Lammoglia (10 - 25 mai 2014)

IRNASA-CSIC (Salamanque, Espagne)

Participant : Jesús-María Marín-Benito (Tâche 0)

- Modélisation

Fera Science Ltd. – « Sustainable Agriculture and Environment » team (York, Royaume Uni)

Participants : Marc C. Kennedy, Andy D.M. Hart (Tâche 4)

- Evaluation des risques pour la santé humaine (BROWSE)
- Accueil de Karen Yemadje-Lammoglia (1er octobre - 30 novembre 2015)

Tableau A1. Moyens humains et techniques mis en œuvre : contributions des différents partenaires

Partenaire	Nom	Prénom	Emploi actuel	Disciplines	Personne mois	ETP	Rôle et responsabilités dans le projet
INRA - ECOSYS	Mamy	Laure	IR	Pesticide, Sol, Modélisation	12	0.33	Coordinatrice scientifique Co-encadrement de la thèse Responsable Tâches 0, 4 et 5 Tâches 0 à 5
	Barriuso	Enrique	DR	Pesticide, Sol	3	0.09	Tâches 0 à 4 Direction de la thèse
	Bedos	Carole	CR	Pesticide, Air	3	0.09	Tâches 0 à 3
	Benoit	Pierre	DR	Pesticide, Sol	3	0.09	Responsable Tâche 2 Tâches 0 à 3, 5
	Gabrielle	Benoît	Pr	Pesticide, Modélisation, Analyse d'incertitudes	1	0.03	Responsable Tâche 3 Tâches 3, 5
	Pot	Valérie	CR	Pesticide, Sol, Modélisation	4	0.11	Tâches 0 à 3
	Poudroux	Daniel	IR	Informatique	2	0.06	Tâches 1 à 3
	Yemadje-Lammoglia	Karen	Doctorante	Agronomie, Modalisation, Analyses de sensibilité et d'incertitudes	36	1.00	Tâches 0 à 4
INRA - AGIR	Justes	Eric	IR	Agronomie	1	0.03	Tâches 0, 1 et 4
INRA - Agronomie	Makowski	David	DR	Agronomie, Modélisation, Analyse de sensibilité	1	0.03	Tâche 1
INP - EI Purpan	Alletto	Lionel	MC	Agronomie, Pesticide, Sol	3	0.09	Tâches 0, 1 et 4
	Giuliano	Simon	IR	Agronomie	1	0.03	Tâche 0
	Rametti	Gaël	TR	Agronomie	1	0.03	Tâche 0
ACTA	Brun	François	IR	Modélisation, Analyse d'incertitudes, Agronomie	1.1	0.03	Tâche 3
	Quemar	Thibaud	Stagiaire M2	Analyse d'incertitudes	6	0.18	Tâche 3
SLU – Uppsala (Suède)	Moeys	Julien	IR	Pesticide, Sol, Modélisation, Analyses de sensibilité et d'incertitudes	3	0.09	Responsable Tâche 1 Tâches 0 à 3, 5
IRNASA-CSIC (Espagne)	Marín-Benito	Jesús-María	CR	Pesticides, Sol, Modélisation	0.5	0.01	Tâche 0
Fera Science Ltd. (Royaume Uni)	Kennedy	Marc C.	Pr	Modélisation, Risque pour la santé	1	0.03	Tâche 4
	Hart	Andy D.M.	Pr	Modélisation, Risque pour la santé	0.5	0.01	Tâche 4

2.2 Réalisation des jalons et de la production des livrables annoncés

Le calendrier d'exécution des tâches du projet et l'échéancier des livrables sont présentés dans les Tableaux A2 et A3. Le projet devait initialement se terminer le 30 juin 2016 mais une prolongation de 6 mois avait été demandée et accordée en raison des problèmes techniques liés au développement de STICS-MACRO (16 versions ont été nécessaires) et à la disponibilité des données expérimentales.

Tableau A2. Calendrier d'exécution des tâches du projet Perform

Tâche	Année 1				Année 2				Année 3				Année 4			
	09/13	12/13	03/14	06/14	09/14	12/14	03/15	06/15	09/15	12/15	03/16	06/16	09/16	12/16	03/17	06/17
0. Développement																
1. Analyse de sensibilité																
2. Variabilité pédoclimatique																
3. Analyse d'incertitudes																
4. Risques pour la santé																
5. Coordination																

Tableau A3. Echéancier des livrables du projet Perform

Livrable	Année 1				Année 2				Année 3				Année 4			
	09/13	12/13	03/14	06/14	09/14	12/14	03/15	06/15	09/15	12/15	03/16	06/16	09/16	12/16	03/17	06/17
Rapports intermédiaires																
Rapport final																
Publications																
Communications																
Formations																
Développement du modèle																
Analyse de sensibilité																
Variabilité pédoclimatique																
Analyse d'incertitudes																
Risques pour la santé																
Identification des systèmes les plus performants																

2.2 Collaborations effectives à l'intérieur du projet et entre projets

2.3.1 Collaborations internes au projet

En dehors des collaborations nécessaires pour effectuer le travail prévu dans les différentes tâches du projet, les collaborations entre les partenaires ont également été effectives au travers de nombreuses réunions et de deux séjours à l'étranger (Suède et Royaume-Uni) réalisés par la doctorante Karen Yemadje-Lammoglia.

La constitution du comité de pilotage de la thèse a par ailleurs été déterminée pour permettre des interactions avec d'autres partenaires non impliqués dans Perform, comme l'ANSES, l'ONEMA ou Syngenta (Cf ci-dessous).

Séminaires et réunions d'animation

- Réunion de lancement : 12 novembre 2013
- Séminaire intermédiaire d'animation des projets issus de l'APR PSPE1 : 5-6 juin 2014
- Réunion du Comité de pilotage : 22 septembre 2014
- Séminaire intermédiaire d'animation des projets issus de l'APR PSPE1 : 1-2 octobre 2015
- Réunion intermédiaire : 3 décembre 2015
- Séminaire de clôture des projets issus de l'APR PSPE1 : 22-24 mars 2017
- Réunion de clôture : septembre 2017

Réunions de suivi de la thèse de Karen Yemadje-Lammoglia

- Réunions du Comité de pilotage de la thèse : 19 juin 2014, 24 juin 2015, 14 avril 2016
  Composition du Comité de pilotage : Pierre Benoit, INRA-ECOSYS
  Claire Billy, ONEMA
  Arnaud Boivin, ANSES
  François Brun, ACTA
  Eric Justes, INRA-AGIR
  Ludovic Loiseau, Syngenta
  David Makowski, INRA-Agronomie
- Réunions internes de suivi de la thèse :
  2013 : 4 novembre, 13 novembre, 17 décembre
  2014 : 19 février, 19 mars, 8 avril, 7 mai, 11 juin, 11 juillet, 13 novembre, 2 décembre
  2015 : 9 janvier, 23 janvier, 6 février, 18 février, 17 mars, 20 avril, 12 mai, 10 juin, 22 juin, 9 septembre, 23 septembre, 8 décembre
  2016 : 13 janvier, 20 janvier, 29 janvier, 3 février, 5 avril, 28 avril, 3 mai, 27 mai, 8 juin, 16 juin, 28 juillet, 8 septembre, 19 octobre, 27 octobre, 7 novembre, 12 décembre, 14 décembre, 17 décembre
- Soutenance de la thèse : 19 décembre 2016
  Composition du Jury : Thierry Doré, Professeur AgroParisTech, Président
  Yves Coquet, Professeur Université d'Orléans, Rapporteur
  Marc Voltz, Directeur de recherche INRA, Rapporteur
  Hélène Blanchoud, Maître de conférences EPHE, Examinateur
  Eric Scopel, Directeur de recherche CIRAD, Examinateur
  Enrique Barriuso, Directeur de recherche INRA, Directeur de thèse
  Laure Mamy, Ingénieur de recherche INRA, Encadrante de thèse

Séjours à l'étranger de Karen Yemadje-Lammoglia

- Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) (Uppsala, Suède) : 11-25 mai 2014
- Fera Science Ltd. (York, Royaume Uni) : 1er octobre - 30 novembre 2015

Réunions de suivi du stage de Master 2 de Thibaud Quemar – Encadrement François Brun (ACTA)

- 2015 : 19 février, 19 mars, 8 avril, 13 mai, 12 juin, 9 juillet, 24 août

Réunions techniques

- Réunion avec les concepteurs de « STICS-Pesticides », Hélène Blanchoud (EPHE), Florence Habets (EPHE) et Wilfried Queyrel (doctorant EPHE) : 20 décembre 2013
- Réunion avec Eric Justes (INRA) « Approfondissement de l'utilisation de STICS » : 17 juillet 2014
- Réunion avec Julien Moeys (SLU) concernant le couplage STICS-MACRO : 22 juillet 2014
- Réunions avec Bruno Cheviron (IRTSEA) « Formation à l'outil MACRO-Cemafor » : 8 décembre 2014, 21 janvier 2015
- Réunion avec Eric Justes (INRA) « Définition des bornes pour l'analyse de sensibilité de STICS-MACRO » : 16 janvier 2015

2.3.2 Collaborations avec d'autres projets

Interactions avec les projets ECoPESt, MicMac Design et SystemEcoPuissance4

Le projet Perform (Figure A1) a été mené en parallèle du projet ECoPESt (« Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts », coordonné par Laure Mamy, APR « Pesticides » 2011) et ces deux projets sont complémentaires (Figure A2).

ECoPESt a permis d'évaluer les outils de modélisation existants -ce qui a montré la nécessité de développer un nouvel outil-, d'acquérir des données de terrain et d'établir le lien entre pratiques, pression et impacts des pesticides (Mamy et al., 2017a).

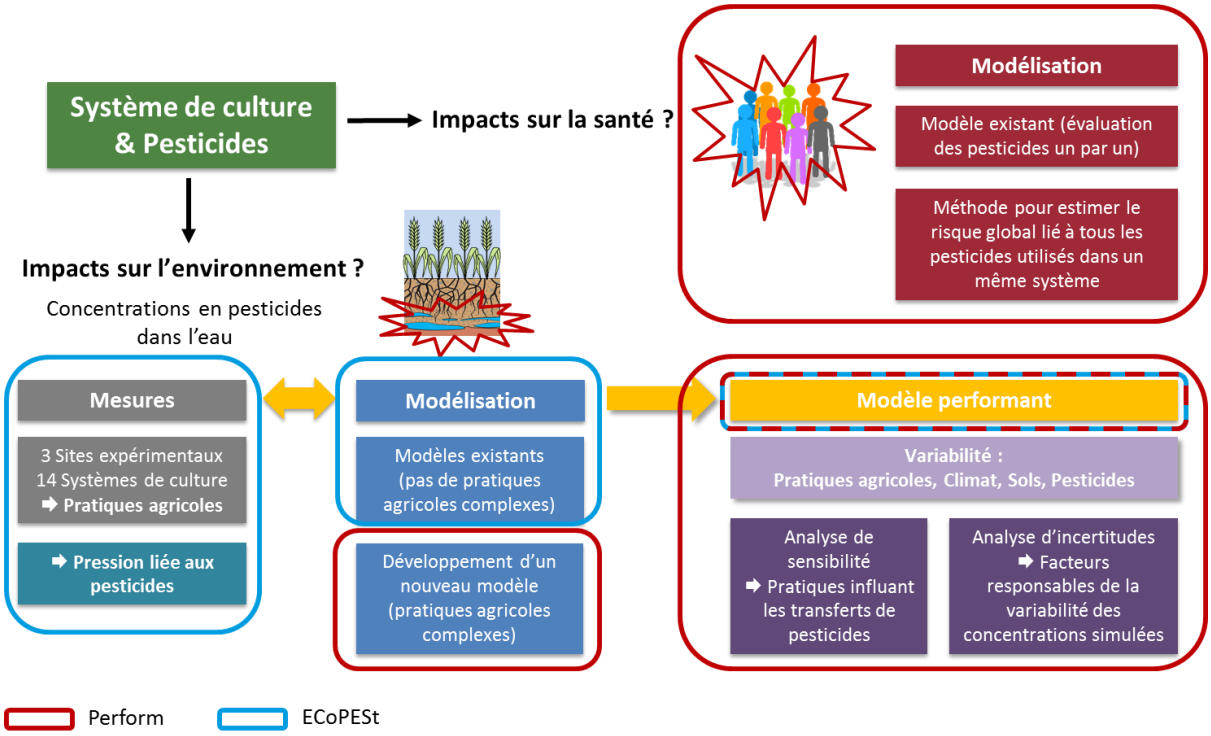

Figure A2. Complémentarité entre les projets Perform et ECoPESt

Le projet Perform exploite aussi des interactions avec les projets MicMac Design et SystemEcoPuissance4 :

- MicMac Design (ANR-09-STRA-06) (2010-2013) : « Conception et évaluation par expérimentation et modélisation de prototypes de systèmes de culture intégrés à bas niveaux d'intrants », coordonné par Eric Justes (INRA, UMR AGIR, Toulouse)
- System-Eco-Puissance4 (SystemEco^4) (APE Ecophyto 2011) (2012-2018) : « Evaluation et modélisation quantitative multicritères de systèmes de culture en rupture à faible usage de pesticides en réseau multi-sites, répondant aux exigences Ecophyto 2018 », coordonné par Nicolas Munier-Jolain (INRA, UMR Agroécologie, Dijon)

Ces deux projets ont également permis l'acquisition de données de terrain afin de tester les modèles existants. Par ailleurs, contrairement à Perform et ECoPESt, MicMac Design et SystemEco^4 réalisent une évaluation économique et sociale des systèmes de culture. Cette évaluation prend en compte les coûts directs de production, le matériel et les contraintes liées au labour, la productivité (rendement, produit brut, qualité des produits récoltés), la performance économique (marges brute et semi-nette) et la faisabilité en terme d'organisation du travail (outil de simulation du fonctionnement des exploitations agricoles SIMEQ-ARVALIS et Equip'Agro-Chambres d'Agriculture). Le rôle de l' « apprentissage collectif » sur l'adoption d'un nouveau système de culture a été également étudié, ainsi que la chaîne de décision aboutissant ou non à l'adoption d'un nouveau système.

Perform se distingue des trois projets ECoPESt, MicMac Design et SystemEco^4 et les complète car il a permis de :

- Développer un nouvel outil de modélisation pour évaluer les flux dans l'environnement des pesticides appliqués dans les systèmes de culture
- Analyser la sensibilité de cet outil aux différentes pratiques culturales et identifier les pratiques ayant le plus d'effet sur les flux de pesticides
- Etudier de manière approfondie les sources d'incertitudes, la propagation de ces incertitudes et leurs effets sur l'évaluation des concentrations
- Evaluer les risques pour la santé humaine.

Action de coordination avec un autre projet de l'APR PSPE1

Le projet EQUIPE «Evaluation de la QUalité prédictive d'Indicateurs PEsticides et conditions d'utilisations », coordonné par Christian Bockstaller (INRA, UMR LAE, Nancy-Colmar), a notamment pour objectif d'évaluer la qualité prédictive d'une large gamme d'indicateurs pour les thématiques « pesticides - qualité de l'eau ».

Cette évaluation nécessite de disposer de données expérimentales telles que celles qui sont mesurées sur les sites de Dijon, Toulouse-Auzeville et Toulouse-Lamothe.

Un accord entre les différents responsables des sites, propriétaires des données, et Christian Bockstaller a été mis en place.

Christian Bockstaller a été invité à la réunion intermédiaire d'animation de Perform le 3 décembre 2015 et il sera invité à la réunion de clôture.

Par ailleurs, Laure Mamy a participé au comité de pilotage du projet EQUIPE ayant eu lieu le 13 octobre 2014.

2.4 Liens établis avec les acteurs du plan Ecophyto, en particulier du ou des dispositifs concernés

Les résultats issus des approches de modélisation développées dans le projet Perform intéressent directement les professionnels car ils apportent des critères quantitatifs permettant, au moment de la mise en place des systèmes de culture, de connaître les risques environnementaux et sanitaires. Les outils de modélisation permettent en outre d'identifier les systèmes ayant le moins d'impacts, ainsi que les pesticides contribuant le plus aux risques globaux des systèmes, dans l'optique de leur substitution.
Des publications, notamment en français dans Innovations Agronomiques, ont permis de diffuser ces résultats. D'autres publications sont envisagées dans des revues comme Phytoma ou Cultivar.
Les participants au projet sont également prêts à contribuer à des sessions de formation pour présenter les démarches, les résultats et les propositions de systèmes innovants.
Enfin, bien que le projet Perform couvre une gamme de variabilité des systèmes importante, l'interrogation de la base de données Agrosyst du réseau DEPHY a permis de déterminer quels autres systèmes devront être pris en compte dans la suite. Laure Mamy avait obtenu l'accord du Comité de pilotage de DEPHY pour consulter Agrosyst dans le cadre du projet ECoPESt.

2.5 Produits du projet

Publications dans des revues à Comité de lecture

[1] Lammoglia SK, Moeys J, Barriuso E, Larsbo M, Marín-Benito JM, Justes E, Alletto L, Ubertosi M, Nicolardot B, Munier-Jolain N, Mamy L, 2017a. Sequential use of the STICS crop model and of the MACRO pesticide fate model to simulate pesticides leaching in cropping systems. Environmental Science and Pollution Research 24, 6895-6909.
[2] Lammoglia SK, Makowski D, Moeys J, Justes E, Barriuso E, Mamy L, 2017b. Sensitivity analysis of the STICS-MACRO model to identify cropping practices reducing pesticides losses. Science of the Total Environment 580, 117-129.

Publications soumises dans des revues à Comité de lecture

[1] Lammoglia SK, Kennedy MC, Barriuso E, Alletto L, Justes E, Munier-Jolain N, Mamy L. Assessing human health risks from pesticide use in conventional and innovative cropping systems with the BROWSE model.
[2] Mamy L, Lammoglia SK, Alletto L, Bedos C, Benoit P, Brun F, Gabrielle B, Justes E, Makowski D, Marín-Benito JM, Moeys J, Munier-Jolain N, Nicolardot B, Pot V, Quemar T, Ubertosi M, Barriuso E. Modélisation des flux de pesticides dans les systèmes de culture : effets de la variabilité du climat, des pratiques agricoles et des propriétés des sols et des pesticides. Synthèse des résultats du projet Perform. Innovations Agronomiques.

Publication en préparation

[1] Lammoglia SK, Brun F, Quemar T, Moeys J, Barriuso E, Gabrielle B, Mamy L. Modelling pesticides leaching in cropping systems: effect of uncertainties in climate, soil and pesticide properties, and agricultural practices.

Thèse de doctorat

[1] Lammoglia SK, 2016. Approches de modélisation pour évaluer et comparer les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine des pesticides utilisés dans des systèmes de culture conçus pour réduire l'usage des pesticides. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 196p.

Rapport de stage

[1] Quemar T, 2015. Analyse d'incertitude d'un modèle de flux de pesticide en situation agronomique. Rapport de stage de Master 2 « Modélisation des Systèmes Écologiques », Université Paul Sabatier, Toulouse, 35 p.

Rapports de recherche

[1] Mamy L, 2015. Approches de modélisation pour l'évaluation et la comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes (Perform). Bilan juin 2014 - septembre 2015. Rapport intermédiaire 3. Septembre 2015, 3p.
[2] Mamy L, 2014. Approches de modélisation pour l'évaluation et la comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes (Perform). Rapport intermédiaire 2. Novembre 2014, 13p.
[3] Mamy L, 2014. Approches de modélisation pour l'évaluation et la comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes (Perform). Rapport intermédiaire 1. Avril 2014, 11p.

Communications

[1] Mamy L, Boivin A, Lammoglia SK, Moeys J, Barriuso E, 2017. Modelling the fate of pesticides in European and French cropping systems: integration of complex agricultural practices in the regulatory risk assessment. SETAC Europe 27th Annual Meeting, 7-11 mai 2017, Bruxelles, Belgique (poster).
[2] Mamy L, 2017. Ecopest et Perform. Approches de modélisation pour évaluer et comparer les performances environnementales et sanitaires de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes, lien entre pratiques, pression et impacts. Colloque Ecophyto Recherche, 22-24 mars 2017, St Malo (communication orale).
[3] Mamy L, Boivin A, Lammoglia SK, Moeys J, Barriuso E, 2016. Modelling the fate of pesticides in European and French cropping systems: integration of complex cropping practices in the regulatory risk assessment. 7th SETAC World Congress/37th SETAC North America Annual Meeting, 6-10 nov. 2016, Orlando, USA (poster).
[4] Mamy L, Yemadje-Lammoglia SK, Barriuso E, 2016. Approches de modélisation pour l'évaluation et la comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes. SMACH - Séminaire de restitution des projets lancés en 2013 et thèses, 6-7 oct. 2016, Paris (communication orale).
[5] Mamy L, Barriuso E, Alletto L, Marín-Benito J, Munier-Jolain N, Pot V, Ubertosi M, Benoit P, 2016. Modelling the fate of pesticides in innovative cropping systems designed to reduce the use of

pesticides. 9th European conference on pesticides and related organic micropollutants in the environment - 15th Symposium on chemistry and fate of modern pesticides, 4-7 oct. 2016, Santiago de Compostela, Espagne (communication orale).
[6] Benoit P, Alletto L, Marin-Benito J, Gavaland A, Giuliano S, Farcy P, Darras S, Ubertosi M, Pernel J, Pot V, Bedos C, Colnenne C, Justes E, Munier-Jolain N, Barriuso E, Mamy L, 2016. Assessing the potentialities of innovating cropping systems to reduce pesticide losses to groundwater through a network of long term experimental sites and quantitative modelling. 5th International Ecosummit - Ecological sustainability: Engineering change, 29 août - 1 sept. 2016, Montpellier (communication orale).
[7] Yemadje SK, Moeys J, Larsbo M, Justes E, Barriuso E, Ubertosi M, Munier-Jolain N, Mamy L, 2015. Forcing MACRO pesticides fate model with STICS crop model to simulate pesticides flows in innovative cropping systems. XV Symposium in Pesticide Chemistry "Environmental risk assessment and management", 2-4 sept. 2015, Piacenza, Italie (poster). *Prix du 2ème meilleur poster*.
[8] Yemadje SK, Moeys J, Larsbo M, Justes E, Barriuso E, Ubertosi M, Munier-Jolain N, Mamy L, 2015. Evaluation des flux de pesticides dans les systèmes de culture innovants : forçage du modèle de simulation du devenir des pesticides MACRO avec le modèle de culture STICS. 45ème congrès du Groupe Français des Pesticides, 27-29 mai 2015, Versailles (communication orale).
[9] Yemadje SK, Moeys J, Justes E, Barriuso E, Ubertosi M, Munier-Jolain N, Mamy L, 2015. Forçage du modèle de simulation du devenir des pesticides MACRO avec le modèle de culture STICS pour évaluer les flux de pesticides dans les systèmes de culture innovants. 10ème Séminaire Stics, 24-26 mars 2015, Rennes (communication orale).
[10] Mamy L, Voltz M, Bedos C, Benoit P, Barriuso E, 2014. Des pratiques agricoles aux transferts de pesticides dans l'environnement : observations, modèles, utilisation dans l'évaluation des risques. Séminaire « Pesticides, écotoxicologie et exposition environnementale », 11-12 déc. 2014, INRA, Paris (communication orale).
[11] Mamy L, 2014. Perform : Approches de modélisation pour l'évaluation et la comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes. Séminaire intermédiaire d'animation – Projets PSPE1, 5-6 juin 2014, St Malo (communication orale).

Résumés soumis

[1] Lammoglia SK, Kennedy MC, Barriuso E, Alletto L, Justes E, Munier-Jolain N, Mamy L, 2017. Assessing human health risks from pesticide use in conventional and innovative cropping systems with the BROWSE model. 7th edition of the International Conference on Pesticide Behaviour in Soils, Water and Air, 30 août - 1 sept. 2017, York, UK.
[2] Lammoglia SK, Makowski D, Moeys J, Justes E, Barriuso E, Mamy L, 2017. Sensitivity analysis of the STICS-MACRO model to identify cropping practices reducing pesticides losses. 7th edition of the International Conference on Pesticide Behaviour in Soils, Water and Air, 30 août - 1 sept. 2017, York, UK.
[3] Mamy L, Boivin A, Lammoglia SK, Barriuso E, 2017. Modelling the fate of pesticides in European and French cropping systems: integration of complex agricultural practices in risk assessment. 7th edition of the International Conference on Pesticide Behaviour in Soils, Water and Air, 30 août - 1 sept. 2017, York, UK.

Prix et distinctions

[1] « Fait Marquant » du Département Santé des Plantes et Environnement de l'INRA.
Mamy L, Barriuso E, Lammoglia SK, 2016. Approches de modélisation pour évaluer et comparer les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine des pesticides utilisés dans des systèmes de culture conçus pour réduire l'usage des pesticides. https://intranet.inra.fr/spe/Page-d-accueil/Actus/FM-2016.

[2] « Fait Marquant » du Département Environnement et Agronomie de l'INRA.
Mamy L, Barriuso E, Lammoglia SK, 2016. Des systèmes de culture pour réduire l'usage des pesticides : Evaluation et comparaison des impacts environnementaux et sanitaires. http://www.ea.inra.fr/Toutes-les-actualites/FM-EA2016

[3] « Fait Marquant » du Centre Versailles-Grignon de l'INRA.
Mamy L, Barriuso E, Lammoglia SK, 2016. Concevoir de nouveaux systèmes de culture pour réduire l'usage des pesticides : apport d'une démarche de modélisation globale. http://www.versailles-grignon.inra.fr/Toutes-les-actualites/2017-Systemes-de-culture-et-reduction-de-l-usage-des-pesticides

[4] Prix du 2ème meilleur poster.
Yemadje SK, Moeys J, Larsbo M, Justes E, Barriuso E, Ubertosi M, Munier-Jolain N, Mamy L, 2015. Forcing MACRO pesticides fate model with STICS crop model to simulate pesticides flows in innovative cropping systems. XV Symposium in Pesticide Chemistry "Environmental risk assessment and management", 2-4 sept. 2015, Piacenza, Italie.

Méthodologies produites

L'ensemble des résultats obtenus dans ce projet a permis de proposer une démarche, basée sur la modélisation, qui pourra être utilisée pour évaluer *a priori* les performances environnementales et sanitaires des systèmes de culture et pour les classer les uns par rapport aux autres. La méthode permet aussi d'identifier les pesticides contribuant le plus au risque global du système de culture et susceptibles d'entraîner un risque inacceptable pour la santé humaine.

Formation

[1] Lammoglia SK, 2016. Formation « Initiation au modèle STICS-MACRO », 30 novembre 2016, INRA, Paris.

Autres

[1] Gérer la santé des cultures au niveau des paysages et territoires. Lettre d'information SMaCH No 8, Février 2017, p4 (https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/387734-e6fe4-resource-lettre-information-smach-numero-8.pdf).

[2] Mamy L, 2016. Évaluation environnementale des systèmes de culture innovants : problématique des impacts liés aux pesticides, outils et dispositifs utilisés. Exposé réalisé dans le cadre de la visite de l'unité ECOSYS d'étudiants en 1er cycle d'ingénieur de l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Grignon (30 minutes, 15 janvier 2016).

[3] Mamy L, 2014. Évaluation environnementale des systèmes de culture innovants : problématique des impacts liés aux pesticides, outils et dispositifs utilisés. Exposé réalisé dans le cadre de la visite à l'INRA (Unité Environnement et Grandes Cultures, Grignon) des étudiants de 4ème année de l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, Grignon (30 minutes, 15 décembre 2014).

3. Rapport scientifique

3.1 Introduction : contexte, objectifs et démarche

Le plan Ecophyto vise à réduire progressivement l'utilisation des produits phytosanitaires en France tout en maintenant une agriculture économiquement performante (Ecophyto II, 2015). Seule une combinaison de différentes techniques culturales peut, au moins en partie, remplacer la protection chimique par des produits phytosanitaires et cette combinaison doit impliquer des changements majeurs dans la nature des systèmes de culture (Mortensen et al., 2000). Cependant, compte tenu de la diversité des contextes agronomique, pédologique et climatique, un grand nombre de systèmes de culture peut être conçu (Munier-Jolain et al., 2008 ; Hossard et al., 2016) et il est impossible de réaliser des expérimentations en plein champ pour étudier la durabilité de chacun de ces systèmes.
Ainsi, le prototypage et l'introduction de systèmes de culture expérimentaux, à caractère innovant par rapport aux pratiques courantes, s'accompagnent généralement des évaluations *ex ante* de leurs performances agronomiques et économiques. En revanche, leurs performances environnementales et sanitaires, vis-à-vis de l'utilisation des pesticides, sont rarement évaluées.
L'évaluation des performances environnementales se réduit souvent à l'utilisation d'indicateurs de « pression » (quantité de produits phytosanitaires utilisés, indicateur de fréquence de traitements). Cette évaluation environnementale est parfois affinée avec l'utilisation d'indicateurs estimant des impacts (Devillers et al., 2005). Si l'intérêt des indicateurs est leur simplicité, tant pour le calcul que pour la communication, ils présentent des limites par rapport à (i) leur sensibilité (réponse face à une modification du système ou des pratiques), (ii) leur capacité à prendre en compte de nouvelles pratiques et cultures, (iii) leur difficulté à intégrer un effet système en tenant compte des rotations de cultures, (iv) leur incapacité à intégrer, pour une situation donnée, une variabilité climatique inter-saisons, (v) leur limitation pour intégrer une variabilité spatiale, liée par exemple au climat ou à la distribution de la couverture pédologique. Il est donc nécessaire de développer d'autres outils d'évaluation des performances environnementales des systèmes de culture (du point de vue de la contamination de l'environnement par les pesticides). Dans ce sens, la modélisation numérique permet une description prédictive des flux et concentrations en pesticides dans les différents compartiments de l'environnement (ECRIN, 2002). Cependant, la plupart des modèles décrivant le devenir des pesticides dans l'environnement ne permettent pas de simuler des pratiques agricoles complexes (présence d'un mulch, cultures associées…), ils représentent la plante et sa croissance de manière très simple (en général, à partir de la hauteur, de la profondeur d'enracinement et de l'indice de surface foliaire (LAI) maximaux) et ils ne tiennent pas compte des interactions entre les pratiques agricoles et le devenir des pesticides. D'autres modèles, tels que STICS-Pest (Queyrel et al., 2016) ou RZWQM (Malone et al., 2004) sont capables d'évaluer les flux de pesticides dans l'environnement tout en tenant compte des pratiques agricoles. STICS-Pest présente l'avantage de simuler correctement les flux de pesticides dans certaines conditions agropédoclimatiques, mais il décrit de façon simplifiée les processus conditionnant les transferts d'eau. De plus, l'adsorption non linéaire des pesticides, qui peut être décisive pour simuler le devenir des pesticides dans l'environnement et en particulier dans les eaux souterraines (Beltman et al., 2008), n'est pas prise en compte (Queyrel et al., 2016). Dans RZWQM, la représentation de certaines pratiques agricoles comme le mulch ou les associations de cultures reste incomplète (Mottes et al., 2014) et, le plus souvent, ce modèle ne simule

convenablement les transferts de pesticides appliqués dans les systèmes de cultures que s'il a été calé au préalable (Malone et al., 2004).

Le devenir des pesticides dans l'environnement va aussi déterminer la dynamique et les niveaux d'exposition de l'homme. Les effets des pesticides sur la santé peuvent notamment résulter d'une exposition de courte ou longue durée au cours du mélange/chargement des produits phytosanitaires, de la pulvérisation, de la récolte des cultures traitées et lors de la consommation de produits issus des plantes traitées. Pour qu'une autorisation de mise sur le marché puisse être délivrée à un produit phytopharmaceutique, il doit notamment ne pas avoir d'effets nocifs directs ou indirects sur la santé humaine (Règlement 1107/2009/CE, 2009). L'évaluation des risques pour la santé repose principalement sur des estimations standards d'exposition pour un produit donné et sur l'évaluation de la toxicité grâce à des expériences en laboratoire en utilisant des espèces animales, généralement des rongeurs. Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives à des cas cliniques et à des incidents survenus suite à l'utilisation des pesticides peuvent également être utilisées. L'estimation de l'exposition humaine et l'évaluation des risques pour la santé reposent également sur l'utilisation de modèles numériques tels que les modèles EURO *Predictive Operator Exposure Model* (EUROPOEM) (van Hemmen, 2001) ou BREAM (Kennedy et al., 2012). Récemment, un nouveau modèle, BROWSE (*Bystanders, Residents, Operators and WorkerS Exposure models for plant protection products*) (Butler Ellis et al., 2017a ; Butler Ellis et al., 2017b ; Kennedy et Butler Ellis, 2017), a été développé au cours d'un projet Européen. Il s'appuie sur les informations contenues dans les modèles existants et dans des bases de données et fournit une évaluation des risques aussi réaliste et complète que possible.

Ainsi, dans la perspective de proposer des outils d'évaluation *ex ante* des systèmes de culture qui permettraient de réduire l'utilisation et les impacts des pesticides, les objectifs du projet Perform consistent à (1) développer de nouvelles approches de modélisation permettant d'évaluer et de comparer les performances environnementales et sanitaires des systèmes de culture (vis-à-vis de l'utilisation des pesticides) et (2) étudier les effets de la variabilité des conditions agro-pédoclimatiques et des principales sources d'incertitudes liées au climat, aux pratiques agricoles et aux propriétés des sols et des pesticides sur l'évaluation des concentrations en pesticides dans l'environnement.

La démarche a consisté à (1) développer un nouvel outil de modélisation, basé sur l'utilisation séquentielle d'un modèle de culture et d'un modèle « pesticides », pour évaluer les flux de pesticides appliqués dans les systèmes de culture, (2) réaliser une analyse de sensibilité de ce modèle pour étudier les effets de la variabilité des pratiques agricoles sur les concentrations en pesticides dans les eaux souterraines, (3) réaliser une analyse d'incertitudes afin d'étudier les effets des incertitudes liées au climat, aux pratiques agricoles et aux propriétés des sols et des pesticides sur les concentrations en pesticides, (4) évaluer, à l'aide du modèle BROWSE, les risques pour la santé de l'ensemble des pesticides utilisés dans un système de culture.

3.1 Matériels et méthodes

3.1.1 Description des sites expérimentaux

Le projet Perform exploite des données mesurées dans trois sites expérimentaux : Dijon-Epoisses (nommé « Dijon ») (Munier-Jolain et al., 2008 ; Chikowo et al., 2009), Toulouse-Auzeville (« Auzeville ») (Peyrard et al., 2016) et Toulouse-Lamothe (« Lamothe ») (Giuliano et al., 2016) (Tableau 1, Figure 1).

La diversité des systèmes de culture et des contextes pédoclimatiques couverte par ces sites permet d'explorer des stratégies contrastées, avec une grande variabilité des systèmes, des sols et du climat (Tableau 1). Au total, 11 systèmes de culture innovants et 3 systèmes conventionnels ont été étudiés.

Tableau 1. Description des sites expérimentaux de Dijon, Auzeville et Lamothe et des systèmes de culture expérimentés et étudiés dans le projet Perform

	Dijon	Auzeville	Lamothe
Année de mise en place	2000	2011	2011
Objectifs	Réduire l'usage des herbicides	Réduire l'usage des pesticides et des engrais	Réduire l'usage des pesticides et de l'eau
Type de sol	Argileux à argilo-limoneux	Alluvions de bas coteaux pour partie argilo-calcaire	Limoneux-argileux (vallée alluviale de la Garonne)
Surface d'une parcelle (ha)	2	0.3	0.08
Système conventionnel	Colza - Blé - Orge	Blé dur - Tournesol (en sec)	Monoculture de maïs irriguée
Systèmes innovants	▪ Protection intégrée sans labour en semis direct sous couvert (S2) ▪ Protection intégrée sans désherbage mécanique (S3) ▪ Protection intégrée typique (S4) ▪ Sans herbicide (S5)	▪ Bas intrants (BI) ▪ Bas intrants, cultures intermédiaires (BI-CI) ▪ Très bas intrants avec cultures associées (TBI) ▪ Très bas intrants avec cultures associées, cultures intermédiaires (TBI-CI)	▪ Bas intrants avec désherbage mécanique, cultures intermédiaires (MM_{BI}) ▪ Techniques culturales sans labour, cultures intermédiaires (MM_{TCSL}) ▪ Rotation courte, cultures intermédiaires (RC)
Mesure des transferts de pesticides	Lysimètres à mèche Lysimètres à plaque poreuse Bougies poreuses ➡ 50 cm de profondeur	Lysimètres à plaque poreuse ➡ 100 cm de profondeur	Lysimètres à plaque poreuse ➡ 100 cm de profondeur

Figure 1. (a) Site expérimental de Dijon (© Google Earth) ; (b) Installation des lysimètres à mèches et des bougies poreuses sur le site de Dijon (© Bernard Nicolardot, AgroSup Dijon) ; (c) Site expérimental de Dijon (© Pascal Farcy, INRA) ; (d) Site expérimental d'Auzeville (© Google Earth) ; (e et f) Site expérimental d'Auzeville (© Eric Justes, INRA) ; (g) Site expérimental de Lamothe (© Google Earth) ; (h et i) Site expérimental de Lamothe (© Lionel Alletto, INP - EI Purpan)

3.1.2 Développement d'une approche basée sur le modèle de culture STICS et sur le modèle « pesticides » MACRO pour simuler les flux de pesticides dans les systèmes de cultures

Les modèles décrivant les flux de pesticides dans l'environnement ne permettent pas de simuler des pratiques agricoles complexes et ils représentent la plante et sa croissance de manière simplifiée. Les modèles de culture, quant à eux, sont notamment conçus pour représenter l'effet du climat et des propriétés du sol sur la croissance de la culture, mais ils ne considèrent pas les pesticides. Ainsi, nous avons développé une approche de modélisation basée sur une utilisation séquentielle d'un modèle de culture, STICS (Brisson et al., 2008), et d'un modèle « pesticides », MACRO (Larsbo et Jarvis, 2003), afin de simuler le devenir dans l'environnement des pesticides appliqués dans les systèmes de culture. STICS a été retenu car sa capacité à simuler correctement le développement des cultures dans diverses conditions pédoclimatiques a été démontrée (Coucheney et al., 2015). MACRO a été testé dans des contextes variés et de nombreuses études ont montré qu'il est capable d'estimer des concentrations en pesticides proches des concentrations mesurées dans l'environnement (Rosenbom et al., 2009 ; Marín-Benito et al., 2014). Par ailleurs, MACRO est l'un des modèles utilisés en Europe pour évaluer les risques de contamination des eaux souterraines dans le cadre de l'homologation des pesticides (FOCUS, 2000).

Description des modèles MACRO et STICS

MACRO (*Water and solute transport in macroporous soils*, Larsbo et Jarvis, 2003) est un modèle en 1D qui permet de simuler le transport de l'eau et des pesticides dans le sol. Ce modèle présente l'avantage de décrire les flux préférentiels dans le profil de sol car il considère deux porosités différentes. Ainsi, l'eau et les solutés sont distribués entre deux domaines : (1) les micropores où le transport de l'eau est représenté par l'équation de Richards et celui des solutés par l'équation de convection-dispersion ; (2) les macropores où les flux d'eau sont conditionnés par la gravité et le transport des solutés par le processus de convection. Les échanges d'eau entre les micropores et les macropores sont considérés comme étant une décharge instantanée lorsque la matrice est saturée, tandis que les flux de solutés entre les macropores et la matrice du sol sont modélisés comme des processus diffusifs contrôlés par une longueur effective de diffusion. MACRO ne modélise pas les effets du climat, de l'état hydrique du sol ou des cycles de nutriments sur la croissance de la culture. Cette dernière est déterminée *a priori via* (1) les dates d'émergence, de maturité et de récolte de la culture, (2) le LAI à l'émergence, à la maturité et à la récolte de la culture, et (3) la profondeur racinaire et la hauteur de la culture à l'émergence et à la récolte. Avec les variables climatiques et l'état hydrique du sol, les caractéristiques de la culture à un temps donné servent à calculer l'évapotranspiration potentielle et actuelle et la répartition des prélèvements en eau de la plante à différentes profondeurs dans le sol.

STICS (*Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard*, Brisson et al., 2008) est un modèle dynamique à pas de temps journalier qui simule le fonctionnement des systèmes « sol-plante-climat » à l'échelle de la parcelle. STICS modélise l'effet du climat et des propriétés du sol sur la croissance de la culture et les consommations en eau et azote associées. Il modélise également le bilan d'eau, le bilan de carbone, le bilan d'azote du système de culture et les effets des pratiques agricoles (fertilisation, irrigation, travail du sol, gestion des résidus de récolte...) sur les rendements. Ses sorties sont à la fois des variables agricoles (rendement, consommation d'intrants), des variables environnementales (pertes d'eau et de nitrate) et l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture.

La généricité du modèle STICS lui permet d'être adapté facilement à différents types de culture (blé, maïs, tournesol, colza, soja, orge, moutarde...), dans différents contextes pédoclimatiques.

Développement de STICS-MACRO

L'utilisation séquentielle de STICS et de MACRO a pour objectif d'estimer les variables décrivant le développement des cultures avec STICS et de forcer ensuite MACRO avec ces variables « cultures » provenant de STICS.

Ainsi, pour automatiser le forçage de MACRO avec des sorties de STICS, des bibliothèques ont été développées pour le logiciel R (Figure 2 ; Lammoglia et al., 2017a ; R Development Core Team, 2016). Ces bibliothèques permettent : (1) d'importer les fichiers d'entrée pré-paramétrés de STICS et de MACRO (un pour chaque modèle) ; (2) de simuler la croissance de la culture et les pratiques agricoles avec STICS ; (3) d'extraire des fichiers de sortie de STICS, pour chaque pas de temps, l'évapotranspiration potentielle, le LAI total, la hauteur de la culture et la profondeur d'enracinement ; (4) de convertir ces résultats au format des fichiers d'entrée de MACRO et d'adapter le paramétrage de MACRO ; (5) de ré-estimer la quantité de pesticide interceptée par la culture (basée sur le LAI total simulé par STICS au moment de l'application du pesticide) ; (6) de lancer les simulations de MACRO avec les variables de la culture et l'évapotranspiration potentielle issues de STICS ; (7) d'importer les résultats des simulations de MACRO qui peuvent être visualisés et analysés dans R ou exportés sous d'autres formats (Lammoglia et al., 2017a).

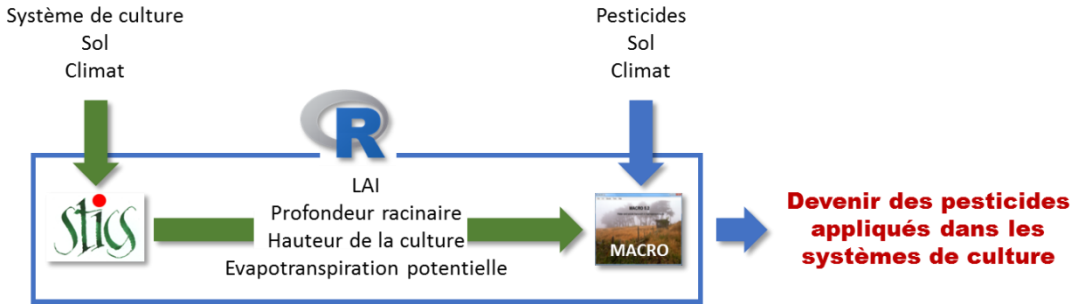

Figure 2. Utilisation séquentielle des modèles STICS et MACRO pour simuler le devenir des pesticides appliqués dans les systèmes de culture (d'après Lammoglia et al., 2017a)

Test de la performance de STICS-MACRO

La performance de STICS-MACRO a été testée, sans calage, en comparant les rendements des cultures et les flux d'eau et de pesticides simulés aux observations réalisées dans deux des sites expérimentaux (Tableau 1) : Dijon (INRA, Munier-Jolain et al., 2008) et Lamothe (INP-EI Purpan, Giuliano et al., 2016). Les systèmes de culture étudiés sont les suivants :

- Site de Dijon - Système « Protection intégrée sans désherbage mécanique » (S3), succession de cultures orge-colza-blé-soja-triticale : cas de l'imazamox (herbicide du soja)
- Site de Lamothe - Système « Monoculture de maïs irriguée conventionnelle » (MM_{Conv}) : cas du S-métolachlore (herbicide du maïs).

STICS-MACRO a été paramétré avec les données expérimentales disponibles spécifiques à chaque site : itinéraires techniques, caractéristiques des sols et certaines propriétés physico-chimiques des pesticides (Marín-Benito et al., 2014 ; Ugarte-Nano et al., 2015 ; Ugarte-Nano et al., 2016). Les données

manquantes ont été obtenues à partir de la bibliographie et de fonctions de pédotransfert. Les données climatiques proviennent de la base de données Climatik (2016) pour Dijon et de la station météorologique située sur le site pour Lamothe. Le détail du paramétrage est disponible dans Lammoglia et al. (2017a).
Des indices statistiques ont été calculés afin d'évaluer de manière quantitative la performance du modèle : l'efficience (EF) (Nash et Sutcliffe, 1970), le coefficient de corrélation (r) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (Smith et al., 1996).
Les résultats de STICS-MACRO ont été comparés aux résultats obtenus avec MACRO seul (Lammoglia et al., 2017a). Il faut souligner que dans le cas du S-métolachlore appliqué à Lamothe, MACRO (utilisé seul) a été calé pour mieux reproduire la dynamique de l'eau (Marín-Benito et al., 2014).

3.1.3 Analyse de sensibilité de STICS-MACRO

La méthode d'analyse de sensibilité globale de Morris (1991) a été appliquée aux 33 paramètres de STICS-MACRO relatifs aux pratiques agricoles (Tableau 2). Cette méthode a été retenue parce qu'elle est adaptée à des modèles complexes, avec un grand nombre de paramètres, et qu'elle permet de classer les paramètres selon leur importance (Cariboni et al., 2007). Elle consiste à répéter r fois (r = 50 dans ce travail) un plan OAT (*One At a Time* : variation des paramètres un par un) aléatoirement dans l'espace des paramètres d'entrée en discrétisant chaque paramètre en n niveaux (n = 4 dans ce travail). Chaque répétition i (i = 1 à r) permet d'évaluer un effet élémentaire E(i) (effet de la variation de la valeur d'un paramètre d'entrée sur une sortie pour deux valeurs consécutives du paramètre) par paramètre d'entrée. L'ensemble du plan d'expériences (r répétitions) fournit un « r-échantillon » des effets pour chaque entrée dont sont issus les indices de sensibilité μ^*, qui représente la moyenne des effets élémentaires, et σ qui représente l'écart type. Plus μ^* est importante, plus l'entrée contribue à la dispersion de la sortie. L'indice σ mesure, quant à lui, la linéarité du modèle étudié et les interactions entre paramètres incertains. Par conséquent, plus σ est élevé (par rapport à μ^*), moins l'hypothèse de linéarité et d'indépendance des effets est pertinente (Faivre et al., 2013).

Afin de tenir compte de la variabilité des cultures, des sols et des climats, 8 scénarios de modélisation ont été construits en sélectionnant :

- 2 cultures : une culture de printemps, le maïs, et une culture d'hiver, le blé
- 2 sols : un calcic Cambisol (Dijon) et un stagnic Luvisol (Lamothe)
- 2 climats : une année humide (2013, 940 mm de précipitations) et une année sèche (2003, 623 mm). Les données proviennent de la station météorologique de Dijon (Climatik, 2016).
- Le pesticide qui a été retenu pour faire les simulations est la substance fictive « *Dummy B* » de FOCUS (2000) en raison de sa mobilité élevée (Koc = 17 L/kg) et de sa persistance moyenne (DT50 = 20 j).

Pour chacun des 8 scénarios, 1700 combinaisons de paramètres d'entrée ont été testées ce qui correspond à un total de 13600 simulations.

Les sorties de STICS-MACRO considérées sont (1) la quantité d'eau drainée totale à 1 m de profondeur pendant 1 an suivant l'application du pesticide, (2) les quantités totales de pesticides à 1 m de profondeur pendant 1 an suivant l'application du pesticide et (3) la concentration journalière maximale en pesticide pendant la première année qui suit l'application (Lammoglia et al., 2017b).

Les paramètres d'entrée ont été classés en trois catégories : « Très influent » lorsque $\mu^* > 0.5\ \mu^*_{max}$ (avec μ^*_{max} : valeur maximale de μ^*), « Influent » si $0.1\ \mu^*_{max} < \mu^* < 0.5\ \mu^*_{max}$ et « Non influent » si $\mu^* < 0.1\ \mu^*_{max}$ (Lammoglia et al., 2017b).

Dans le cas des paramètres « Très influents », des tests de Kruskal-Wallis ont été réalisés pour déterminer les gammes de valeurs de ces paramètres ayant un effet significatif sur la variation des flux d'eau et de pesticides.

Tableau 2. Paramètres de STICS-MACRO (*symboles*) et intervalles de valeurs correspondants utilisés dans l'analyse de sensibilité de STICS-MACRO pour les deux cultures maïs et blé d'hiver (Lammoglia et al., 2017b). RO : Résidus organiques

Paramètre (*symbole*)	**Unité**	**Maïs**		**Blé d'hiver**	
		Minimum	**Maximum**	**Minimum**	**Maximum**
C/N des RO[a] (*CsurNres*)	(-)	10	125	10	125
Fraction maximale du fertilisant minéral qui peut être dénitrifiée[b] (*deneng*)	(-)	0.05	0.2	0.05	0.2
Densité de semis[b] (*densite*)	grains/m²	5	20	200	400
Teneur en eau des RO[b] (*eaures*)	% poids frais	0	100	0	100
Fraction d'ammonium dans l'engrais azoté[b] (*engamm*)	(-)	0.5	1	0.5	1
Teneur en eau initiale de l'horizon de sol i (i = 1 à 5)[b] ($Hinit_i$)	%	0	30	0	30
Date de semis[b] (*iplt0*)	Jour Julien	90	129	275	323
Date d'apport des RO[b] (*julres*)	Jour Julien	iplt0 - 14	iplt0 - 2	iplt0 - 14	iplt0 - 2
Date de travail du sol[b] (*jultrav*)	Jour Julien	iplt0 - 14	iplt0 - 2	iplt0 - 14	iplt0 - 2
Contenu initial en NO_3 de l'horizon de sol i (i = 1 à 5)[b] ($Hinit_i$)	kg N/ha	0	30	0	30
Proportion d'azote minéral dans les RO[b] (*Nminres*)	% poids frais	0	10	0	10
Quantité d'azote immobilisée[b] (*Norgeng*)	kg N/ha	0.2	42	0.2	42
Poids maximal des grains (*pgrainmaxi*)	g	0.24	0.36	0.24	0.36
Profondeur minimale d'incorporation des RO[c] (*profres*)	cm	0	30	0	30
Profondeur de semis[a] (*profsem*)	cm	1	10	1	10
Profondeur maximale d'incorporation des RO[a] (*proftrav*)	cm	0	30	0	30
Quantité de RO apportée[a] (*qres*)	t/ha	0	30	0	30
Indice de stress hydrique[b] (*ratiol*)	(-)	0.2	1	0.2	1
Indice de stress azoté[b] (*ratiolN*)	(-)	0.2	1	0.2	1
Cumul thermique entre les stades AMF[d] et LAX[b,d] (*stamflax*)	Degré jour	390	600	390	600
Cumul thermique entre les stades DRP[d] et MAT[b,d] (*stdrpmat*)	Degré jour	570	780	570	780
Cumul thermique entre les stades LAX[d] et SEN[b,d] (*stlaxsen*)	Degré jour	680	800	680	800
Cumul thermique entre les stades LEV[d] et AMF[b,d] (*stlevamf*)	Degré jour	190	310	190	310
Cumul thermique entre les stades SEN[d] et LAN[b,d] (*stsenlan*)	Degré jour	180	300	180	300
Fraction maximale du fertilisant minéral qui peut être volatilisée[b] (*voleng*)	(-)	0	0.35	0	0.35

[a] Ruget et al. (2002)

[b] Jugement d'expert

[c] Limites imposées par STICS

[d] AMF: Accélération maximale de la croissance des feuilles, fin de la phase juvénile, LAX : LAI maximal, fin de la croissance des feuilles, DRP : Début de remplissage des organes végétaux à récolter, MAT : Maturité physiologique, SEN : Début de la sénescence des feuilles, LEV : Emergence, LAN : LAI zéro.

3.1.4 Analyse d'incertitudes

A partir des résultats d'analyses de sensibilité de STICS (Ruget et al., 2002), MACRO (Dubus et al., 2003) et STICS-MACRO (Lammoglia, 2016 ; Lammoglia et al., 2017b), 9 paramètres d'entrée ont été identifiés comme influents et pris en compte dans l'analyse d'incertitudes (Tableau 3) : des paramètres relatifs aux (1) pratiques agricoles (quantité de résidus organiques apportés au sol *qres*, date de semis de la culture *iplt0*, date d'application du pesticide *datepest* et dose), (2) propriétés des sols (conductivité hydraulique à la limite entre macropores et micropores *KSM*, longueur de diffusion *ASCALE*) et (3) propriétés des pesticides (coefficient d'adsorption *Kf* et exposant *nf* de Freundlich, durée de demi-vie de dégradation *DT50*). Les valeurs nominales, minimales et maximales de ces paramètres sont résumées dans le Tableau 3. La distribution des valeurs a été supposée être uniforme.

Tableau 3. Valeurs nominales et valeurs limites minimales et maximales des paramètres d'entrée de STICS-MACRO étudiés dans l'analyse d'incertitudes (Lammoglia, 2016)

Paramètre (symbole)	**Unité**	**Bentazone**			**S-métolachlore**		
		Minimum	**Nominale**	**Maximum**	**Minimum**	**Nominale**	**Maximum**
Quantité de résidus organiques (*qres*)	t/ha	0	15	30	0	15	30
Date de semis (*iplt0*)	Jour julien	91	121	151	91	121	151
Date d'application du pesticide (*datepest*)	Jour / date de semis	+30	+55	+80	-5	+12	+30
Dose (*dose*)	g/ha	750	1071	1392	1500	1711	1921.5
Conductivité hydraulique à la limite entre macropores et micropores (*KSM*)	mm/h	0.001	1.25	2.5	0.001	1.25	2.5
Longueur de diffusion (*ASCALE*)	mm	0.001	150	300	0.001	150	300
Coefficient d'adsorption (*Kf*)	-	1.2	1.55	1.9	0.3	2.5	4.7
Exposant de Freundlich (*nf*)	-	1.0	1.005	1.01	1.0	1.005	1.01
Durée de demi-vie de dégradation (*DT50*)	Jour	8	55	102	7.6	22.6	37.6

Les scénarios de modélisation construits pour l'analyse d'incertitudes sont basés sur une zone géographique correspondant au secteur du site expérimental d'Auzeville (Peyrard et al., 2016). Ce secteur est défini par une zone de 400 km^2 où la culture dominante est le maïs, semé entre le 1er avril et le 31 mai (Tableau 3). Le sol argilo-calcaire du site expérimental a été sélectionné pour être représentatif de la zone (Lammoglia, 2016). Les propriétés hydrodynamiques nécessaires en entrée de STICS-MACRO ont été estimées avec RETC (van Genuchten et al., 1991). Les herbicides étudiés sont la bentazone et le S-métolachlore parce qu'ils figurent parmi les herbicides les plus utilisés pour le désherbage du maïs et qu'ils sont fréquemment détectés dans les eaux souterraines (Alletto et al., 2013 ; Steffens et al., 2013). Le S-métolachlore est appliqué en pré-émergence et post-émergence précoce tandis que la bentazone est appliquée en post-émergence (Tableau 3). Pour la période étudiée, 2007-2014, les données climatiques de température, d'ensoleillement, d'humidité relative et de vitesse du vent proviennent de la station météorologique d'Auzeville de l'INRA (Climatik, 2016). Les données radar des précipitations, d'une résolution spatiale de 1 km^2, ont été fournies par Météo France.

Plusieurs travaux ayant démontré que la variabilité des précipitations est un facteur clé dans la modélisation des transferts d'eau et de pesticides (Chaubey et al., 1999 ; Lewan et al., 2009), nous avons préalablement étudié de manière approfondie les effets du climat sur la lixiviation de la bentazone et du S-métolachlore. Les impacts de la variation spatiale et temporelle des précipitations sur les concentrations en pesticides ont été analysés en simulant 400 séries climatiques (données radar sur la zone de 400 km^2) pendant 7 années différentes (2007 à 2014). Seules les données climatiques ont varié, tous les autres paramètres ont été laissés constants, les paramètres incertains fixés à leurs valeurs nominales (Tableau 3).

Ensuite, pour évaluer les effets combinés des incertitudes liées au climat, aux pratiques agricoles et aux propriétés des sols et des pesticides, 4 séries climatiques régulièrement réparties dans la zone de 400 km^2 et présentant différentes valeurs de précipitations annuelles pour les 7 années (2007 à 2014) ont été sélectionnées et les 9 paramètres influents ont varié en même temps. La propagation des incertitudes a été réalisée avec la méthode d'échantillonnage par hypercube latin (LHS) (McKay et al., 2000). Dans un premier temps, la méthode LHS divise l'intervalle de valeurs de chaque paramètre d'entrée étudié en intervalles disjoints de probabilité égale. Ensuite, une valeur de chaque intervalle est sélectionnée aléatoirement, en tenant compte de la fonction de densité de probabilité de cet intervalle, afin de former un élément d'échantillonnage. Dans ce travail, la taille d'échantillonnage pour l'ensemble des paramètres est de 2000. Au total, 112000 simulations ont été réalisées (2 pesticides $\times$ 2000 échantillons $\times$ 4 positions spatiales $\times$ 7 ans) (Lammoglia, 2016).

Les sorties de STICS-MACRO considérées sont (1) la concentration moyenne en pesticide à 1 m de profondeur pendant l'année qui suit l'application du pesticide et (2) la concentration maximale à 1 m de profondeur pendant cette même année.

Enfin, pour évaluer la contribution des incertitudes liées au climat et aux 9 paramètres d'entrée à la variabilité des sorties de STICS-MACRO, nous avons construit un méta-modèle de STICS-MACRO et réalisé une analyse de sensibilité à partir de ce méta-modèle (Lammoglia, 2016). Un méta-modèle est une fonction mathématique développée à partir d'un jeu de simulations du modèle original sur le domaine de variation du paramètre d'entrée. Il permet de réduire les temps de calcul par rapport au modèle original. Ce méta-modèle a été établi à partir de la transformation logarithmique des sorties de STICS-MACRO considérées (concentrations en bentazone et S-métolachlore). Sa performance a été testée et les résultats ont montré qu'elle était satisfaisante (EF = 0.65). Les indices de sensibilité ont été déterminés à partir d'une analyse de variance (ANOVA). L'ANOVA permet de déterminer la contribution de chaque paramètre d'entrée à la variance totale des sorties du modèle et de hiérarchiser ces paramètres (Wallach et al., 2016).

3.1.5 Evaluation des risques pour la santé humaine

Description du modèle BROWSE

BROWSE est un modèle mécaniste développé pour évaluer l'exposition aux pesticides de la population humaine (opérateurs et résidents notamment) (Butler Ellis et al., 2017a ; Butler Ellis et al., 2017b ; Kennedy et Butler Ellis, 2017). La prise en compte de l'exposition à court et long termes, les nombreuses voies d'exposition décrites et les distributions de probabilités assignées aux paramètres du modèle sont des particularités qui permettent à BROWSE de représenter différents scénarios d'évaluation des

risques pour la santé humaine. Le modèle BROWSE estime l'exposition aux pesticides, puis les quantités de pesticides absorbées par inhalation, par ingestion et/ou par voie cutanée. Ensuite, ces quantités absorbées sont rapportées au NEAO (*Niveau d'exposition acceptable pour l'opérateur*, ou « AOEL » *Acceptable operator exposure level*) afin d'estimer le risque pour la santé humaine (HR). Lorsque HR est inférieur à 100%, le risque est acceptable ; en revanche, lorsque HR est supérieur à 100%, le risque est inacceptable.

Paramétrage

Les données nécessaires au paramétrage du modèle BROWSE comprennent les données techniques, les propriétés physico-chimiques et toxicologiques des pesticides, les caractéristiques du matériel agricole et les conditions d'application (volume pulvérisé, vitesse du tracteur…), les caractéristiques des résidents (telles que le poids) et les équipements de protection individuelle (EPI). Les propriétés des pesticides ont été extraites des bases de données PPDB (2016) et d'Agritox (2016). Lorsque les données d'absorption dermale manquaient, les valeurs par défaut proposées par l'EFSA ont été utilisées (EFSA, 2012). Quand il n'y avait pas de données pour l'absorption orale et par inhalation, une valeur de 100% a été retenue (Lammoglia et al., soumis). Pour toutes les simulations, les opérateurs ont été supposés porter les EPI suivants : gants en nitrile, combinaison certifiée, capuchon, visière et masque.

Nous avons évalué les 5 systèmes mis en place sur le site de Dijon, les 4 systèmes du site de Lamothe et 3 systèmes du site d'Auzeville : le système conventionnel et les systèmes impliquant des cultures intermédiaires (les systèmes correspondants avec sol nu en interculture ont reçu les mêmes traitements pesticides, hormis les traitements avec du glyphosate) (Tableau 1). Les systèmes de culture sont comparés à leur système conventionnel de référence mais ils ne sont pas comparés entre eux car les durées des rotations sont différentes. Ainsi, dans le cas du site de Dijon, les simulations ont été effectuées pour les années 2003 à 2013 (la rotation la plus longue ayant une durée de 9 ans), dans le cas du site d'Auzeville, pour les années 2011 à 2015 et dans celui du site de Lamothe, pour les années 2011 à 2014. Au total, 116 produits phytosanitaires contenant 89 pesticides différents ont été étudiés.

Evaluation des risques par système de culture

Le modèle BROWSE permet d'évaluer les risques pour la santé humaine d'un seul pesticide à la fois. Ainsi, afin de comparer les systèmes innovants aux systèmes conventionnels correspondants, nous avons proposé de représenter les résultats sous forme de « boxplots » car cette représentation permet de visualiser la distribution HR et les valeurs extrêmes correspondant aux pesticides qui présentent les risques les plus élevés (Lammoglia et al., soumis).

3.2 Résultats et discussion

3.2.1 Test de la performance de STICS-MACRO

Dans un premier temps, la performance de STICS-MACRO a été évaluée en étudiant sa capacité à simuler les rendements des cultures. Les résultats ont montré que STICS-MACRO est capable de représenter les rendements observés (Figure 3), comme l'indiquent les valeurs élevées des indices statistiques : EF = 0.90, r = 0.91 et RMSE = 13% (Lammoglia et al., 2017a).

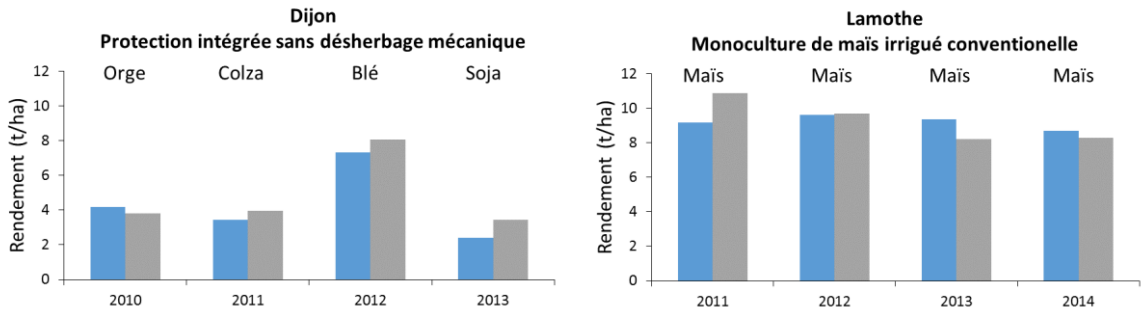

Figure 3. Rendements en orge, blé, colza et soja (Dijon, « Protection intégrée sans désherbage mécanique ») et en maïs (Toulouse-Lamothe, « Monoculture de maïs irriguée conventionnelle ») observés (■) et simulés par STICS-MACRO (■) (Lammoglia et al., 2017a)

Nous avons aussi comparé les LAI des différentes cultures implantées à Dijon et à Lamothe simulés par STICS (au sein de STICS-MACRO) et par MACRO seul. Contrairement à MACRO, STICS-MACRO permet de distinguer les cultures entre elles et de distinguer leur croissance d'une année à l'autre, en réponse notamment aux variations du climat (Figure 4). En effet, dans STICS, la croissance des cultures dépend des interactions entre le climat, le sol et les pratiques agricoles ce qui permet de discriminer les cultures et les cycles culturaux (Brisson et al., 2008 ; Lammoglia et al., 2017a), alors que, dans MACRO, la croissance de la culture est linéaire jusqu'à ce qu'elle atteigne le LAI maximal initialement paramétré, indépendamment du climat, du sol et des pratiques agricoles. Il est théoriquement possible dans MACRO d'ajuster les paramètres de croissance de la culture à des observations (culture par culture et année par année), mais les paramètres ainsi obtenus ne sont pas extrapolables à des années sans observation et l'algorithme n'est pas toujours fiable, ce qui limite son intérêt pour les problèmes traités ici. Les résultats montrent que STICS-MACRO (*via* STICS) simule de manière réaliste la phénologie des cultures en réponse aux conditions environnementales (climat en particulier) (Lammoglia et al., 2017a).

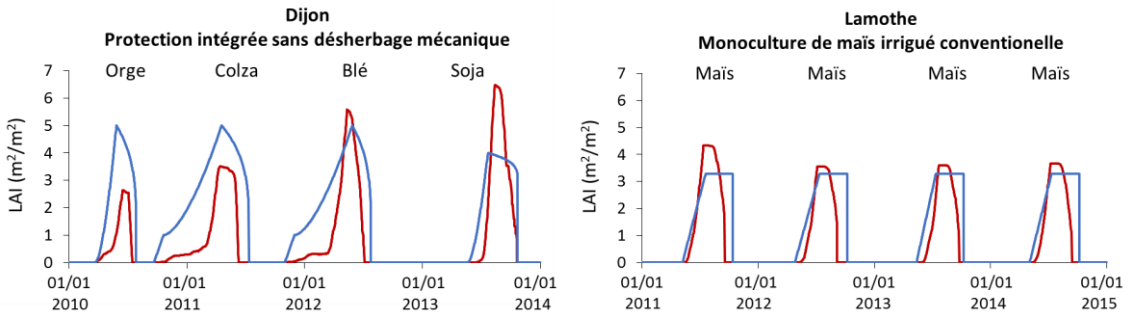

Figure 4. Comparaison des LAI des cultures implantées à Dijon (orge, colza, blé, soja) et à Lamothe (maïs) simulés par STICS-MACRO (—) et MACRO (—) (Lammoglia et al., 2017a)

Dans un second temps, la performance de STICS-MACRO à représenter les quantités d'eau drainées et les concentrations en S-métolachlore et imazamox lixiviés a été étudiée (Figures 5 et 6, Tableau 4 ; Lammoglia et al., 2017a ; Mamy et al., 2017a&b).

STICS-MACRO permet d'améliorer l'estimation des quantités d'eau drainées par rapport à MACRO dans le cas de Dijon (Figure 5), mais pas dans celui de Lamothe (Tableau 4). Cependant, dans ce dernier cas,

MACRO avait été calé, c'est-à-dire que certains paramètres d'entrée avaient été ajustés pour que MACRO reproduise au mieux la dynamique de l'eau observée (Marín-Benito et al., 2014).
Sans calage, STICS-MACRO reproduit mieux que MACRO après calage les concentrations en pesticides observées (Figure 6, Tableau 4 ; Lammoglia et al., 2017a ; Mamy et al., 2017a&b). En effet, STICS-MACRO décrit de manière plus réaliste que MACRO la croissance de la culture (Figure 4), ce qui permet une meilleure description de l'interception des pesticides par le couvert végétal au moment de l'application et ainsi une estimation plus réaliste des quantités arrivant réellement au sol (Lammoglia et al., 2017a). D'autre part, la croissance de la culture joue aussi un rôle important dans le bilan hydrique au travers de l'évapotranspiration. Les résultats suggèrent toutefois que les performances de STICS-MACRO sont meilleures lorsque les flux d'eau et de pesticides sont cumulés sur de longues périodes (plusieurs mois) (Figure 6 ; Lammoglia et al., 2017a). Aucun des 2 modèles n'est capable de représenter le pic de concentration observé après l'application de l'imazamox (le 1er juillet 2013) suite à un épisode pluvieux intense survenu le 2 juillet 2013 (Figure 6), mais la faible performance des modèles à reproduire des transferts de pesticides très peu de temps après leur application a été fréquemment observée (Brown et al., 2004 ; Marin-Beníto et al., 2014).

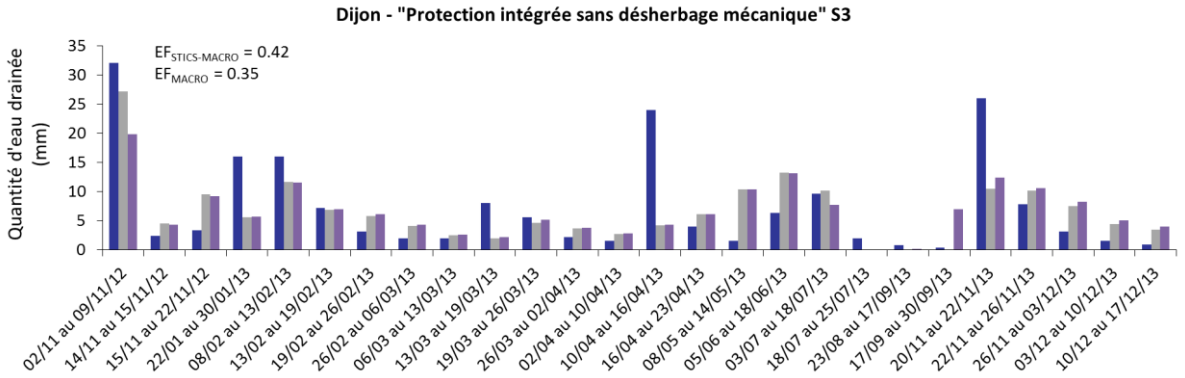

Figure 5. Exemple des quantités d'eau drainée observées (■) et simulées par STICS-MACRO (■) et par MACRO (■). Site de Dijon, système « Protection intégrée sans désherbage mécanique » S3 (Lammoglia et al., 2017a). EF : Efficience

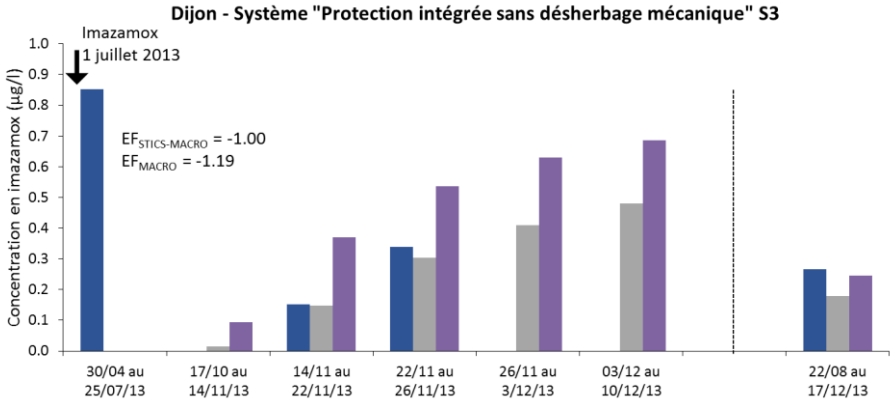

Figure 6. Exemple des concentrations en imazamox observées (■) et simulées par STICS-MACRO (■) et par MACRO (■) (Lammoglia et al., 2017a). Site de Dijon, système « Protection intégrée sans désherbage mécanique » S3. Le symbole « ↓ » indique la date d'application de l'herbicide. EF : Efficience

La nouvelle approche de modélisation développée dans ce projet présente l'avantage de permettre l'utilisation de MACRO, qui reste actuellement un des modèles « pesticides » les plus performants en terme de description du transfert d'eau et de pesticides dans les sols (Marín-Benito et al., 2014), pour modéliser les flux de pesticides dans les systèmes de culture complexes. Par ailleurs, STICS-MACRO fournit d'autres sorties d'intérêt environnemental (dynamique des composés azotés, lixiviation de nitrate, émissions de NOx) et agronomique (rendements). Cependant, avant de pouvoir être plus largement utilisé, ce modèle reste à tester dans d'autres conditions agropédoclimatiques et à plus long terme.
Il faut aussi souligner que l'évaluation de la performance du modèle est réalisée en confrontant les résultats des simulations à des données expérimentales dont la qualité propre est difficile à évaluer car elle est très dépendante des méthodes utilisées pour leur acquisition. Enfin, ces résultats montrent qu'il est important de réaliser des analyses de sensibilité pour identifier les sources d'erreurs et des analyses d'incertitudes pour connaître l'imprécision des simulations.

Tableau 4. Indices statistiques permettant d'évaluer la performance de STICS-MACRO et MACRO à simuler les quantités d'eau drainées et les concentrations en pesticides lixiviés dans le système de culture « Protection intégrée sans désherbage mécanique » expérimenté à Dijon et le système « Monoculture de maïs irriguée conventionnelle » expérimenté à Lamothe. EF : Efficience, r : Coefficient de corrélation, RMSE : Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (Lammoglia et al., 2017a)

	Dijon **Protection intégrée sans désherbage mécanique**		**Lamothe** **Monoculture de maïs irriguée conventionnelle**	
	STICS-MACRO	**MACRO**	**STICS-MACRO**	**MACRO**
Quantités d'eau drainées				
EF	0.42	0.35	-5.22	-1.9
r	0.66	0.61	0.09	0.03
RMSE (%)	87	92	279	191
Concentrations en pesticides lixiviés				
EF	-1.00	-1.19	-0.18	-0.21
r	-0.52	-0.58	0.13	-0.14
RMSE (%)	175	214	236	>1000

3.2.2 Analyse de sensibilité : effets de la variabilité des pratiques agricoles sur les transferts d'eau et de pesticides

Afin d'étudier les effets des pratiques agricoles sur les transferts d'eau et de pesticides dans l'environnement, nous avons réalisé une analyse de sensibilité du modèle STICS-MACRO. Il s'est agi de générer un grand nombre de combinaisons de pratiques à l'aide de la méthode d'analyse de sensibilité de Morris (1991) (Cf. 3.1.3), de simuler ces pratiques avec STICS-MACRO et d'identifier celles qui ont le plus d'influence sur les flux d'eau et de pesticides (Lammoglia et al., 2017b).

Quel que soit le scénario (combinaisons des sols, des climats ou des cultures), 8 paramètres d'entrée de STICS-MACRO se révèlent être « Très influents » dans la modélisation des quantités d'eau drainées : la quantité de résidus organiques apportés au sol (*qres*) et leurs teneurs en eau (*eaures*) (ces deux

paramètres sont corrélés), la profondeur d'incorporation de ces résidus (*proftrav*), la date d'apport des résidus (*julres*), la date de travail du sol (*jultrav*), la date (*iplt0*) et la profondeur (*profsem*) de semis et l'indice de stress hydrique (*ratiol*) (Tableau 2, Figure 7). Les paramètres « Influents » sont surtout liés au cultivar, aux résidus organiques (C/N, contenu en N), à la densité de semis et à la teneur en eau initiale des différents horizons de sol. Les paramètres « Non influents » sont relatifs à la teneur initiale en N des horizons de sol, à la plupart des paramètres reliés au fertilisant minéral et aux cumuls thermiques (*stlaxsen* et *stsenlan* en particulier) (Tableau 2 ; Lammoglia et al., 2017b).

Concernant les concentrations maximales en pesticide, les paramètres « Très influents » s'avèrent être les mêmes que ceux qui étaient très influents dans la modélisation de la percolation de l'eau (Figure 7). Les paramètres « Influents » sont relatifs à la fertilisation minérale ou au semis. Enfin, les paramètres « Non influents » sont dans l'ensemble ceux qui n'avaient que peu d'influence sur la modélisation des quantités d'eau drainées (Lammoglia et al., 2017b). Les résultats sont similaires pour les quantités totales de pesticide cumulées pendant l'année qui suit l'application (Lammoglia et al., 2017b).

Toutefois, le classement des paramètres d'entrée et l'intensité de leurs effets varient en fonction des conditions environnementales : en général, les indices de sensibilité sont plus élevés pour le sol de Lamothe que pour celui de Dijon et ils sont aussi plus élevés pour le blé que pour le maïs (Lammoglia et al., 2017b).
Par ailleurs, les valeurs de μ^* et σ indiquent qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les paramètres d'entrée du modèle et ses sorties et/ou qu'il y a des interactions entre les paramètres (Lammoglia et al., 2017b).

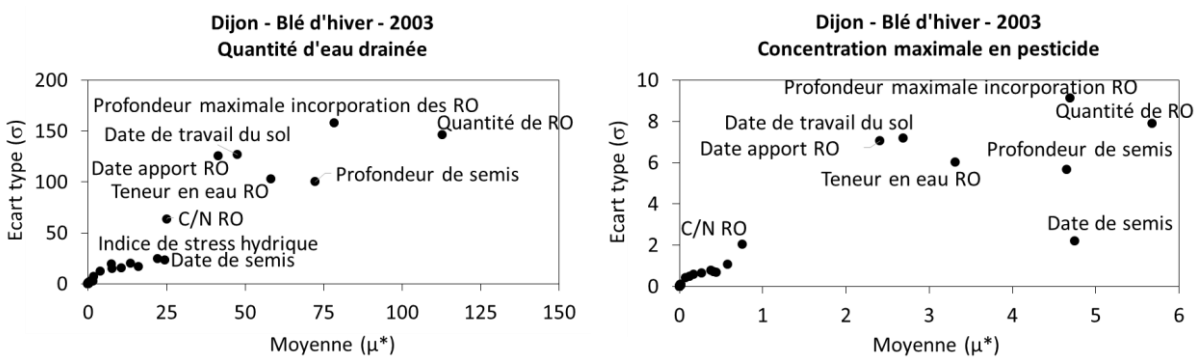

Figure 7. Représentation des résultats de l'analyse de sensibilité de Morris. Exemple du blé d'hiver, année sèche (2003), sol de Dijon. Quantité totale d'eau drainée à 1 m de profondeur (à gauche), concentration maximale en pesticide à 1 m de profondeur (à droite). μ^* : Moyenne des effets élémentaires, σ : Ecart type des effets élémentaires, RO : Résidus organiques (d'après Lammoglia et al., 2017b)

Les résultats de cette analyse de sensibilité ont ainsi montré que, d'après la modélisation, les pratiques agricoles qui ont le plus d'effet sur le transfert d'eau et la lixiviation des pesticides sont les suivantes : (1) la gestion des résidus organiques, (2) le travail du sol, (3) les pratiques agricoles liées au semis et (4) le niveau de satisfaction des besoins en eau de la culture (Figure 7 ; Lammoglia et al., 2017b).
A partir de ces résultats, un test de Kruskal-Wallis a permis de déterminer le sens de variation des concentrations sous l'effet de ces pratiques agricoles (Figure 8).

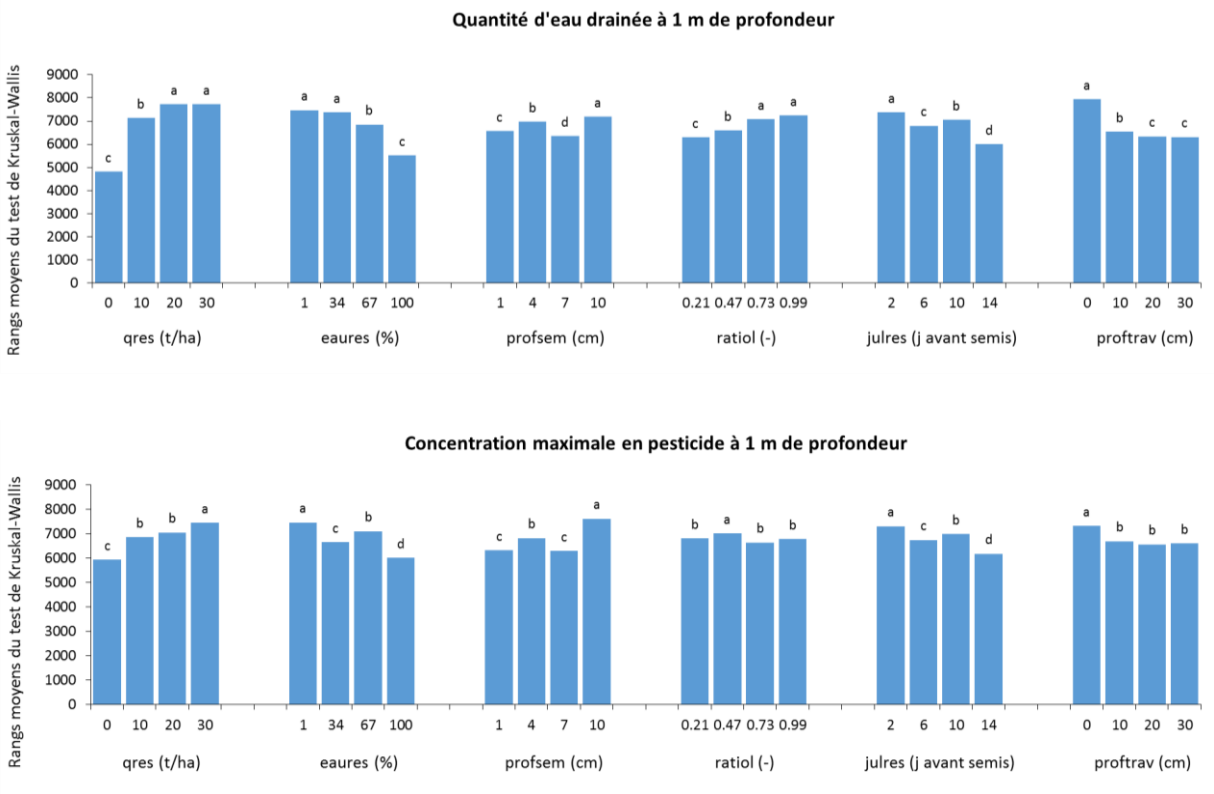

Figure 8. Effet des paramètres de STICS-MACRO liés à l'apport de résidus organiques, au travail du sol, au semis et aux besoins en eau de la culture sur les quantités d'eau drainées et la concentration maximale en pesticide à 1 m de profondeur (d'après Lammoglia et al., 2017b). *qres* : Quantité de résidus organiques apportée, *eaures* : Teneur en eau des résidus organiques, *profsem* : Profondeur de semis, *ratiol* : Indice de stress hydrique, *julres* : Date d'apport des résidus organiques, *proftrav* : Profondeur maximale d'incorporation des résidus organiques

Plus la quantité de résidus organiques apportée au sol (*qres*) augmente, plus les concentrations en pesticide augmentent (Figure 8 ; Lammoglia et al., 2017b). En effet, la présence de résidus à la surface du sol limite l'évapotranspiration et favorise le stockage de l'eau dans le sol (Scopel et al., 2013), ce qui engendre une augmentation de la percolation de l'eau et du transfert de pesticides. Ce résultat est cohérent avec ceux de Scopel et al. (2004) et de Shipitalo et al. (2016). Il faut cependant souligner que STICS-MACRO ne considère ni l'interception du pesticide par le mulch, ni l'augmentation de l'adsorption liée à l'augmentation de la teneur en matières organiques qui pourraient en conséquence réduire les quantités de substance qui atteignent le sol ou qui sont lixiviées, donc diminuer les concentrations (Alletto et al., 2010).

D'autre part, lorsque la profondeur d'incorporation des résidus (*proftrav*) est faible, ce qui correspond à un travail du sol réduit, les quantités d'eau drainées augmentent, de même que la lixiviation des pesticides. Inversement, lorsque la profondeur de travail du sol augmente, les transferts d'eau et de pesticides diminuent (Figure 8 ; Lammoglia et al., 2017b). Ce résultat de modélisation rejoint les observations de nombreux chercheurs qui ont montré que la lixiviation des pesticides augmente dans les systèmes de culture basés sur des techniques culturales sans labour car l'absence de labour provoque la formation de voies de transferts préférentiels (Alletto et al., 2010). Toutefois, dans le cas de STICS-MACRO, la susceptibilité du sol aux flux préférentiels n'est pas affectée par le couplage et les effets du labour ne sont pas directement modélisés dans MACRO. C'est donc *via* l'impact des

paramètres de STICS sur le LAI et l'évapotranspiration potentielle que les teneurs en eau du sol modélisées par MACRO sont modulées. Outres les transferts d'eau accrus dans la matrice, une augmentation de la teneur en eau du sol modélisée par MACRO peut résulter en une augmentation de la fréquence à laquelle les macropores sont « activés ». De plus, même si une augmentation des flux d'eau percolés à la base du profil de sol augmente les flux de pesticides lixiviés (masse par unité de surface), cela ne signifie pas automatiquement une augmentation des concentrations car un flux d'eau accru peut résulter en une dilution accrue du pesticide dans l'eau drainée.

Les résultats de l'analyse de sensibilité ont aussi montré que lorsque le semis (*profsem*) est profond, les flux d'eau et de pesticides tendent à augmenter (Figure 8 ; Lammoglia et al., 2017b). Un semis profond retarde la germination des graines, ce qui se traduit par une diminution de la densité de la culture donc de sa transpiration globale (Brisson et al., 2008). Ceci conduit à une augmentation de la teneur en eau du sol avec les mêmes conséquences que précédemment indiqué.
Le niveau de satisfaction en eau (*ratiol*) est également apparu comme un paramètre important (Lammoglia et al., 2017b). Un haut niveau de satisfaction en eau de la plante, donc une irrigation importante, entraîne une augmentation des transferts d'eau et de pesticides (Figure 8). En effet, de nombreux travaux ont montré que l'irrigation favorise le transport des pesticides (voir par exemple Flury, 1996). Toutefois, un niveau de satisfaction de 0.73 (73%) pourrait être un compromis acceptable entre les besoins de la plante et la limitation des transferts d'eau et de pesticides (Figure 8).
Enfin, les résultats ont montré que les effets des pratiques agricoles sont plus importants que ceux du sol et du type de culture (Lammoglia et al., 2017b).

En résumé, les pratiques agricoles qui permettraient de réduire la lixiviation des pesticides sont l'absence de mulch et le travail du sol. Il faut toutefois souligner que STICS-MACRO ne peut pas modéliser les changements de la structure du sol et des teneurs en eau après apport des résidus organiques, ni les effets de la modification des teneurs en carbone organique du sol sur la rétention et la dégradation du pesticide. La prise en compte de ces processus permettra d'améliorer l'évaluation du devenir des pesticides appliqués dans les systèmes de culture.

3.2.3 Effets des incertitudes liées au climat, aux pratiques agricoles et aux propriétés des sols et des pesticides sur la modélisation des concentrations en pesticides lixiviés

L'estimation par modélisation des flux et des concentrations en pesticides est assortie de nombreuses incertitudes (Vanderborght et al., 2011). Lorsqu'elles ne sont pas prises en compte, le risque est généralement sous-estimé (Vanderborght et al., 2011 ; van den Berg et al., 2012). Ainsi, l'analyse d'incertitudes, qui consiste à étudier l'impact de facteurs incertains sur les sorties d'un modèle, est une étape importante dans le processus de développement et d'utilisation d'un modèle, en particulier lorsque celui-ci est utilisé à des fins d'évaluation du risque (Sohrabi et al., 2002).
L'objectif de ce travail était donc d'étudier les effets des incertitudes liées au climat (précipitations en particulier), aux pratiques agricoles et aux caractéristiques du sol et des pesticides sur les concentrations en pesticides simulées par le modèle STICS-MACRO.

Effets de la variabilité climatique sur les concentrations en pesticides

La première étape a consisté à déterminer les effets de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations sur les concentrations en bentazone et en S-métolachlore simulées par STICS-MACRO. Les résultats des simulations ont montré un effet important de la variabilité des précipitations sur les concentrations en pesticides et une corrélation positive et significative entre les quantités annuelles de précipitations et les concentrations en pesticides, ce qui implique aussi que l'augmentation relative du flux de pesticide est supérieure à l'augmentation relative des flux d'eau (dans le cas contraire une dilution des concentrations serait observée) (Figure 9 ; Lammoglia, 2016). Ce résultat rejoint de nombreuses observations indiquant que la lixiviation des pesticides augmente avec la quantité annuelle de précipitations (Tiktak et al., 2004).

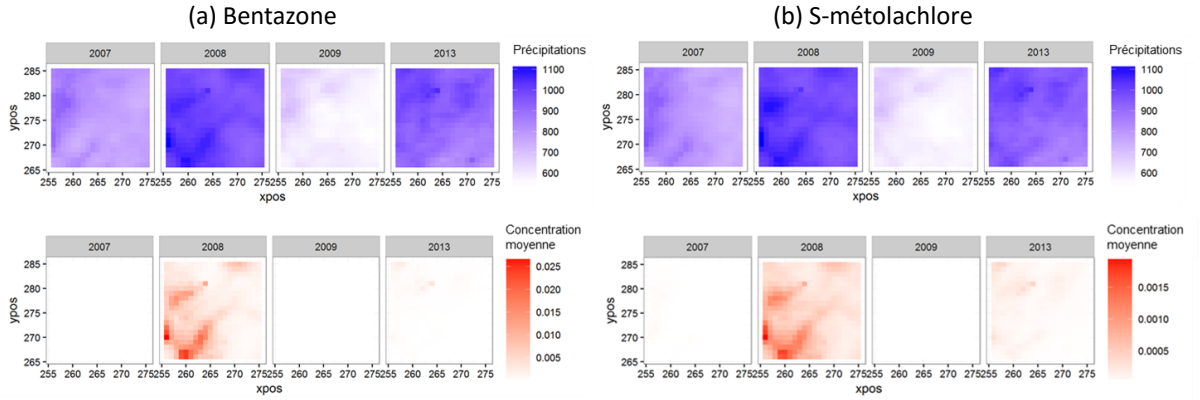

Figure 9. Variabilité spatiale des quantités annuelles de précipitations (en haut) et des concentrations moyennes annuelles à 1 m de profondeur (en bas) en bentazone (a) et S-métolachlore (b) pour 4 années climatiques contrastées (2007, 2008, 2009, 2013) à Auzeville. Précipitations : Quantité totale de précipitations (mm), Concentration moyenne : Concentrations moyennes annuelles en bentazone et S-métolachlore (µg/L), xpos et ypos : Coordonnées spatiales dans la zone 20 × 20 km (Lammoglia, 2016)

La variation spatiale des concentrations est deux fois plus élevée pour la bentazone (post-émergence) que pour le S-métolachlore (pré-émergence) : une variation spatiale des précipitations comprise entre 4 et 7% engendre une variation des concentrations en bentazone de 98 à 663%, tandis qu'elle engendre une variation des concentrations en S-métolachlore de 68 à 199%. La variabilité des résultats observée pour la bentazone est probablement due à l'interception de cet herbicide par le couvert végétal (Lammoglia, 2016).

Les effets de la variabilité des précipitations sur la lixiviation des deux herbicides ont été amplifiés dans STICS-MACRO, ce qui indique que l'hypothèse d'un transfert linéaire de la variabilité des précipitations dans le modèle pourrait conduire à une sous-estimation des concentrations en bentazone et S-métolachlore. Ainsi, cette étude a souligné l'importance de prendre en compte les incertitudes liées à la variation spatiale et temporelle des précipitations pour estimer les concentrations en pesticides dans les eaux souterraines.

Effets combinés des incertitudes liées au climat, aux pratiques agricoles et aux propriétés du sol et des pesticides sur les concentrations en pesticides

Dans la deuxième étape, les incertitudes liées au climat, aux pratiques agricoles, aux sols et aux pesticides ont été propagées dans STICS-MACRO.

Les concentrations moyennes annuelles issues des 112000 simulations (56000 par pesticide) sont très variables, comprises entre 0 ($6\ 10^{-28}$) et 570 µg/L pour la bentazone et entre 0 ($8\ 10^{-21}$) et 750 µg/L pour le S-métolachlore. Elles ne suivent pas une distribution normale. La moyenne de ces concentrations est égale à 0.287 µg/L pour la bentazone et à 1.55 µg/L pour le S-métolachlore. Ces valeurs sont supérieures au 90ème centile des concentrations, ce qui indique qu'il y a une probabilité élevée que STICS-MACRO simule des concentrations inférieures à celle de la moyenne de la distribution (Lammoglia, 2016). Les valeurs médianes sont, quant à elles, égales à $5.5\ 10^{-7}$ µg/L pour la bentazone et $3.3\ 10^{-6}$ µg/L pour le S-métolachlore.

Les moyennes des concentrations maximales simulées sont élevées : 16.6 pour la bentazone et 65.2 µg/L pour le S-métolachlore. Les valeurs médianes correspondantes sont en revanche faibles : $1.0\ 10^{-5}$ pour la bentazone et $5.7\ 10^{-5}$ µg/L pour le S-métolachlore (Lammoglia, 2016).
Bien que la bentazone soit plus mobile et plus persistante que le S-métolachlore (PPDB, 2016), ses concentrations sont inférieures à celles du S-métolachlore (Figure 9) car la bentazone est en partie interceptée par le couvert végétal.

Les résultats de l'analyse d'incertitudes ont également montré que les concentrations moyennes annuelles des deux herbicides simulées par STICS-MACRO pourraient dépasser la limite réglementaire de 0.1 µg/L dans 6% des cas pour la bentazone et dans 15% des cas pour le S-métolachlore. La concentration maximale en bentazone pourrait excéder 0.1µg/L dans 17% des cas, celle du S-métolachlore dans 24% des cas (Lammoglia, 2016).

Contribution des différentes sources d'incertitudes à la variabilité des concentrations simulées

Dans la troisième étape, la contribution des différentes sources d'incertitudes à la variabilité des sorties du modèle a été étudiée à partir d'une analyse de sensibilité du méta-modèle de STICS-MACRO et d'une ANOVA.
Les indices de sensibilité ont montré que les paramètres qui contribuent le plus à la variabilité des concentrations en bentazone et S-métolachlore sont la quantité annuelle de précipitations (*Pa*), le coefficient d'adsorption *Kf* et la conductivité hydraulique à la limite entre micropores et macropores (*KSM*) (Lammoglia, 2016). Dans le cas de la bentazone, herbicide le plus faiblement adsorbé (PPDB, 2016), *Pa* explique 50% de la variabilité des concentrations, *KSM* 16% et *Kf* 7%. Pour le S-métolachlore, *Kf* explique 27% de la variabilité des concentrations, *Pa* 25% et *KSM* 13% (Lammoglia, 2016). Ensuite, les deux autres facteurs influents sont la *DT50* et la variabilité spatiale des précipitations (Lammoglia, 2016). Cette dernière a un effet plus important sur les concentrations que la quantité de résidus organiques, la date de semis, la date et la dose d'application du pesticide. Ce résultat est en accord avec ceux de Steffens et al. (2014) qui ont observé que l'effet des incertitudes liées au climat peut être plus important que celui des incertitudes liées aux paramètres d'entrée des modèles.

Au final, les résultats de cette analyse ont montré que les incertitudes liées au climat, au coefficient d'adsorption et à certaines propriétés hydrodynamiques des sols sont les principaux facteurs impliqués dans la variabilité des concentrations simulées en pesticides. Cependant, il faut souligner que les résultats de cette étude sont valables pour les bornes définies pour chaque paramètre et sont spécifiques des conditions de sol, de culture et de climat de la zone étudiée.

3.2.4 Evaluation des risques pour la santé humaine des pesticides utilisés dans les systèmes de culture

L'évaluation des risques pour la santé humaine (opérateur, résidents adulte et enfant à court et long termes) liés à l'ensemble des pesticides utilisés dans chaque système de culture a été réalisée avec le modèle BROWSE. Les indices de risque pour la santé humaine, HR, obtenus pour tous les pesticides appliqués dans un même système sont représentés sous forme de « boxplots ».
La Figure 10 montre l'exemple du risque pour le résident adulte à court terme (24 h après l'application). Les tendances sont les mêmes pour l'opérateur et pour le résident enfant, mais les HR sont plus élevés. A long terme (7 jours), les HR sont en revanche plus faibles (Lammoglia et al., soumis).

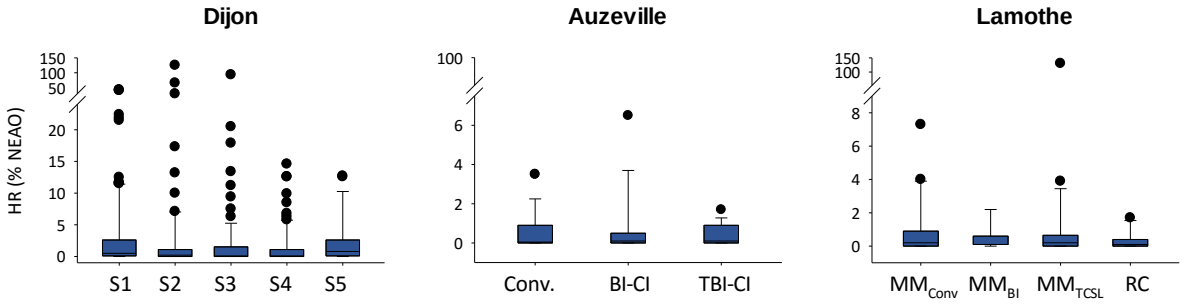

Figure 10. Distribution des indices de risque pour la santé humaine HR (en % NEAO) des pesticides appliqués dans les différents systèmes expérimentés sur les sites de Dijon (S1 : Rotation colza-blé-orge conventionnelle, S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert, S3 : PI sans désherbage mécanique, S4 : PI typique, S5 : Sans herbicide), Auzeville (Conv. : Rotation blé-dur tournesol conventionnelle, BI : Bas intrants, TBI : Très bas intrants, CI : Cultures intermédiaires) et Lamothe (MM_{Conv} : Monoculture de maïs irriguée conventionnelle ; MM_{BI} : Système bas intrants ; MM_{TCSL} : Techniques culturales sans labour ; RC : Système rotation courte). Exemples pour le résident adulte à court terme (d'après Lammoglia et al., soumis)

Cas des systèmes basés sur une rotation colza-blé-orge (site de Dijon)

Selon le modèle BROWSE, dans tous les systèmes basés sur la rotation colza-blé-orge, la plupart des applications de pesticides conduiraient à des risques acceptables pour le résident adulte (Figure 10) mais aussi pour le résident enfant et pour l'opérateur (Lammoglia et al., soumis). Cependant, quelques produits phytosanitaires pourraient néanmoins conduire à des risques inacceptables (Figure 10). Ceux-ci impliquent les substances actives suivantes : 4 fongicides (carbendazime, cymoxanil, époxiconazole, vinclozoline), 3 insecticides (alpha-cyperméthrine, isofenphos, lambda-cyhalothrine) et 2 herbicides (bromoxynil octanoate et isoproturon). Parmi ces pesticides, la carbendazime, l'époxiconazole, l'isoproturon et la lambda-cyhalothrine font partie des pesticides candidats au retrait (Commission Européenne, 2015). Les risques pour la santé les plus élevés seraient systématiquement associés à l'utilisation de l'isofenphos et la vinclozoline, mais ces deux pesticides ne disposent plus d'autorisation de mise sur le marché. Au final, le système qui présenterait le meilleur potentiel pour réduire les risques pour la santé humaine est le système « Sans herbicide » (S5) (Figure 10) (Lammoglia et al., soumis).

Cas des systèmes basés sur une rotation blé dur-tournesol en sec (site d'Auzeville)

Les résultats issus de BROWSE montrent qu'aucun des systèmes, y compris le système conventionnel blé dur-tournesol, ne présenterait de risque pour la santé du résident adulte (Figure 10) ni pour celle du résident enfant (Lammoglia et al., soumis). En revanche, pour l'opérateur, un risque potentiel pour la santé a été identifié à la suite de l'utilisation du fongicide cymoxanil en traitement de semences dans le système « Très bas intrants avec cultures associées et cultures intermédiaires » (TBI-CI) : en effet, la toxicité du cymoxanil est importante avec un NEAO égal à 0.01 mg/kg pc/j (PPDB, 2016 ; Lammoglia et al., soumis). Ces résultats montrent que le système TBI-CI pourrait néanmoins être une alternative intéressante à la rotation blé dur-tournesol si le cymoxanil n'est pas utilisé.

Cas des systèmes basés sur une monoculture de maïs irriguée (site de Lamothe)

Pour les résidents (adulte et enfant), aucun des pesticides appliqués sur les systèmes MM_{Conv}, MM_{BI} et RC ne présenterait de risque pour la santé humaine (Figure 10). En revanche, la tembotrione (herbicide) appliquée sur le système MM_{TCSL} pourrait entraîner un risque inacceptable pour les résidents car sa toxicité est très élevée (0.0007 mg/kg pc/j) (PPDB, 2016). Aucun des autres pesticides appliqués sur MM_{TCSL} ne conduirait à un risque inacceptable pour la santé du résident. Pour l'opérateur, les HR sont généralement inférieurs à 100% sauf dans trois cas : la lambda-cyalothrine (insecticide) dans le système MM_{Conv}, le cymoxanil (fongicide) et la tembotrione dans le système MM_{TCSL} (Lammoglia et al., soumis). En résumé, le système RC présente les risques les plus faibles pour la santé, suivi du système MM_{BI}. En revanche, le système MM_{TCSL} conduirait à des risques inacceptables, notamment à cause de l'herbicide tembotrione. Cependant, si cet herbicide et le cymoxanil ne sont pas utilisés, les risques pour la santé liés au système MM_{TCSL} deviennent acceptables.

Les résultats obtenus avec le modèle BROWSE ont montré que les systèmes de culture innovants tels que les systèmes bas ou très bas intrants et les systèmes privilégiant les techniques de désherbage mécanique (i.e. sans herbicide) permettraient de réduire de façon significative les risques pour la santé humaine liés à l'utilisation des pesticides. Inversement, les systèmes de culture impliquant les techniques culturales sans labour auraient tendance à entraîner une augmentation des impacts sur la santé à cause de la multiplication des traitements herbicides. Ces résultats ont aussi permis d'identifier les pesticides susceptibles d'entraîner un risque inacceptable pour la santé. Le remplacement de ces pesticides par d'autres pesticides moins toxiques pourrait améliorer les performances sanitaires des systèmes concernés.

3.2.5 Identification des systèmes les plus performants

Les résultats obtenus dans ce projet et ceux qui ont été obtenus dans le projet ECoPESt (Mamy et al., 2017a), permettent d'établir un classement des systèmes, du plus performant (aux points de vue environnement et santé) au moins performant :

- Cas des systèmes basés sur une rotation colza-blé-orge : « Sans herbicide » > « PI Typique » > « PI sans désherbage mécanique » > « Conventionnel », « PI sans labour ».
- Cas des systèmes basés sur une rotation blé dur-tournesol en sec : « Bas intrants » (avec ou sans CI), « Très bas intrants avec cultures associées » (avec ou sans CI) > « Conventionnel ».
- Cas des systèmes basés sur une monoculture de maïs irriguée : « Rotation courte » > « Bas intrants » > « Conventionnel » > « Techniques culturales sans labour ».

Il faut souligner que ces résultats sont valables dans les conditions de notre étude et que les impacts sur la santé mis en évidence pour les systèmes sans labour deviennent acceptables si les pesticides responsables de ce résultat sont remplacés par d'autres pesticides moins toxiques.

3.3 Conclusion

Afin de modéliser les flux de pesticides dans les systèmes de culture, une nouvelle approche de modélisation, basée sur l'utilisation séquentielle d'un modèle de cultures, STICS, et d'un modèle décrivant le devenir des pesticides dans l'environnement, MACRO, a été développée. La performance du modèle ainsi conçu, STICS-MACRO, a été testée et les résultats ont montré qu'elle était acceptable. Par rapport aux méthodes existantes, STICS-MACRO présente l'avantage de permettre de simuler un grand nombre de pratiques agricoles (mulch, travail du sol, fertilisation...), de reposer directement sur le calcul des flux de pesticides et de tenir compte des effets du climat et du sol qui influencent aussi bien la croissance des cultures que les flux de pesticides. De plus, la performance agronomique (rendement) des systèmes de culture peut aussi être évaluée afin d'identifier les systèmes qui aideront à la fois à diminuer les impacts sur l'environnement et à maintenir un niveau de production élevé.
Une analyse de sensibilité du modèle STICS-MACRO a ensuite permis d'identifier les pratiques agricoles qui permettent de réduire les transferts d'eau et de pesticides vers les eaux souterraines. Ceux-ci diminuent avec la quantité de résidus organiques apportée au sol et lorsqu'il y a un travail du sol. En effet, la présence de résidus organiques à la surface du sol limite l'évapotranspiration et favorise le stockage de l'eau dans le sol, ce qui engendre une augmentation de la percolation de l'eau et du transfert de pesticides. Par ailleurs, comme cela a souvent été observé, la lixiviation des pesticides augmente dans les systèmes de culture basés sur des techniques culturales sans labour car l'absence de labour provoque la formation de voies de transferts préférentiels.
Enfin, une analyse d'incertitudes a montré que la variabilité des concentrations simulées en pesticides est essentiellement due à la variabilité du climat (précipitations annuelles en particulier), du coefficient d'adsorption et de certaines propriétés hydrodynamiques des sols. Cette analyse d'incertitudes devra être élargie à d'autres types de sol, de pesticide et de culture afin d'identifier le comportement de ces facteurs incertains dans d'autres conditions.
Les risques pour la santé liés aux pesticides utilisés dans les systèmes de culture ont été évalués à l'aide du modèle BROWSE. Les résultats issus de BROWSE ont montré que, d'une manière générale, indépendamment du système de culture de référence, les systèmes basés sur un travail du sol simplifié tendraient à augmenter les impacts sur la santé en raison de la multiplication du nombre de traitements herbicides. En revanche, les systèmes innovants tels que les systèmes bas ou très bas intrants, basés notamment sur des rotations et non sur des monocultures, et les systèmes de culture privilégiant les techniques de désherbage mécanique (i.e. systèmes sans herbicide) permettraient de réduire de façon significative les impacts sur la santé. Les résultats ont aussi permis d'identifier les pesticides contribuant le plus au risque global du système de culture et susceptibles d'entraîner un risque inacceptable pour la santé humaine. Le remplacement de ces produits par d'autres produits moins toxiques améliorerait les performances sanitaires des systèmes concernés.
Le modèle STICS-MACRO pourrait constituer un outil intéressant pour la construction de scénarios de changements de pratiques agricoles selon des contraintes agronomiques et environnementales définies. Il peut ainsi permettre d'identifier des conditions favorables ou défavorables à la mise en place

de certains systèmes de culture. L'application de la démarche proposée dans ce projet au réseau FERME DEPHY aiderait à caractériser les performances environnementales des systèmes testés. Cependant, avant de généraliser l'utilisation de STICS-MACRO, il faut tester sa capacité à décrire correctement les flux de pesticide dans d'autres contextes agro-pédoclimatiques, ce qui nécessite des jeux de données de qualité, avec des chroniques de mesures suffisamment longues.
Nous avons étudié une large diversité de systèmes de grandes cultures, mais d'autres systèmes restent à explorer, en particulier des systèmes incluant des cultures pérennes. Afin d'approfondir l'évaluation des risques liés aux pesticides utilisés dans les systèmes de culture, les impacts sur d'autres compartiments de l'environnement (eau de surface, air, sol, biodiversité) devront être estimés. Enfin, la prise en compte plus large de la variabilité des sols et des climats pourra permettre d'étendre la démarche d'évaluation des risques aux Outre-Mer, par exemple.

Remerciements

Action pilotée par le ministère chargé de l'agriculture, avec l'appui financier de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto, dans le cadre de l'APR « Pour et Sur le Plan Ecophyto » (PSPE1). La thèse de Sabine-Karen Yemadje-Lammoglia a été cofinancée par le métaprogramme SMaCH de l'INRA et l'APR PSPE1. Les auteurs remercient vivement Dr Robert Faivre (INRA) pour son aide dans la construction du méta-modèle de STICS-MACRO.

Références

Agritox, 2016. Base de données sur les substances actives phytopharmaceutiques. http://www.agritox.anses.fr/

Alletto L., Coquet Y., Benoit P., Heddadj D., Barriuso E., 2010. Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review. Agronomy for Sustainable Development 30, 367-400.

Alletto L., Benoit P., Bolognési B., Couffignal M., Bergheaud V., Dumény V., Longueval C., Barriuso E., 2013. Sorption and mineralisation of S-metolachlor in soils from fields cultivated with different conservation tillage systems. Soil and Tillage Research 128, 97-103.

Beltman W.H.J., Boesten J.J.T.I., van der Zee S.E.A.T.M., 2008. Spatial moment analysis of transport of nonlinearly adsorbing pesticides using analytical approximations. Water Resources Research 44, W05417.

van den Berg E., Tiktak A., Heuvelink G.B.M., Burgers S.L.G.E., Brus D.J., de Vries F., Stolte J., Kroes J.G., 2012. Propagation of uncertainties in soil and pesticide properties to pesticide leaching. Journal of Environmental Quality 41, 253-261.

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model. Quæ, Versailles.

Brown C.D., Dubus I.G., Fogg P., Spirlet M., Gustin C., 2004. Exposure to sulfosulfuron in agricultural drainage ditches: field monitoring and scenario-based modelling. Pest Management Science 60, 765-776.

Butler Ellis M.C., van de Zande J.C., van den Berg F., Kennedy M.C., O'Sullivan C.M., Jacobs C.M., Fragkoulis G., Spanoghe P., Gerritsen-Ebben R., Frewer L.J., Charistou A., 2017a. The BROWSE model for predicting exposures of residents and bystanders to agricultural use of plant protection products: An overview. Biosystems Engineering 154, 92-104.

Butler Ellis M.C., van den Berg F., van de Zande J.C., Kennedy M.C., Charistou A.N., Arapaki N.S., Butler A.H., Machera K.A., Jacobs C.M., 2017b. The BROWSE model for predicting exposures of residents and bystanders to agricultural use of pesticides: Comparison with experimental data and other exposure models. Biosystems Engineering 154, 122-136.

Cariboni J., Gatelli D., Liska R., Saltelli A., 2007. The role of sensitivity analysis in ecological modelling. Ecological Modelling, 203, 167-182.

Chaubey C., Haan T., Salisbury J.M., Grunwald S., 1999. Quantifying model output uncertainty due to spatial variability of rainfall. Journal of the American Water Resources Association 35, 1113-1123.

Chikowo R., Faloya V., Petit S., Munier-Jolain N.M., 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. Agriculture Ecosystems and Environment 132, 237-242.
Climatik, 2016. https://internet.inra.fr/climatik/
Commission Européenne, 2015. List of candidates for substitution (January 2015). http://ec.europa.eu/food/plant/docs/pesticides_ppp_app-proc_cfs_draft-list.pdf
Coucheney E., Buis S., Launay M., Constantin J., Mary B., García de Cortázar-Atauri I., Ripoche D., Beaudoin N., Ruget F., Andrianarisoa K.S., Le Bas C., Justes E., Léonard J., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. Environmental Modelling and Software 64, 177-190.
Devillers J., Farret R., Girardin P., Riviere J.-L., Soulas G., 2005. Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
Dubus I.G., Brown C.D., Beulke S., 2003. Sensitivity analyses for four pesticide leaching models. Pest Management Science 59, 962-982.
Ecophyto II, 2015. Plan Ecophyto II. http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/151022_ecophyto.pdf.
ECRIN, Club CRIN « Environnement et Société », Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2002. Modélisation des transferts de pesticides dans l'environnement, ECRIN, Paris, 207 p.
EFSA, 2012. Guidance on dermal absorption. EFSA Journal 10, 2665.
Faivre R., Iooss B., Mahévas S., Makowski D., Monod H. (Editeurs), 2013. Analyse de Sensibilité et Exploration de Modèles. Application aux Sciences de la Nature et de l'Environnement. Editions Quae, Versailles.
Flury M., 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils-a review. Journal of Environmental Quality 25, 25-45.
FOCUS, 2000. Groundwater scenarios in the EU review of active substances. Report of the FOCUS Groundwater Scenarios Workgroup, EC document reference Sanco/321/ 2000 rev.2, 202 p.
van Genuchten M.T., Leij F.J., Yates S.R., 1991. The RETC code for quantifying hydraulic functions of unsaturated soils. Technical Report IAG-DW 12933934, US Salinity Laboratory, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Riverside, CA.
Giuliano S., Ryan M.R., Véricel G., Rametti G., Perdrieux F., Justes E., Alletto L., 2016. Low-input cropping systems to reduce input dependency and environmental impacts in maize production: A multi-criteria assessment. European Journal of Agronomy 76, 160-175.
van Hemmen J.J., 2001. EUROPOEM, A predictive occupational exposure database for registration purposes of pesticides. Applied Occupational and Environmental Hygiene 16, 246-250.
Hossard L., Archer D.W., Bertrand M., Colnenne-David C., Debaeke P., Ernfors M., Jeuffroy M.H., Munier-Jolain N., Nilsson C., Sanford G.R., Snapp S.S., Jensen E.S., Makowski D., 2016. A meta-analysis of maize and wheat yields in low-inputs vs conventional organic systems. Agronomy Journal 108, 1155-1167.
Kennedy, M.C., Butler Ellis, M.C., Miller, P.C.H., 2012. BREAM: A probabilistic bystander and resident exposure assessment model of spray drift from an agricultural boom sprayer. Computers and Electronics in Agriculture 88, 63-71.
Kennedy M.C., Butler Ellis M.C., 2017. Probabilistic modelling for bystander and resident exposure to pesticides using the Browse software. Biosystems Engineering 154, 105-121.
Lammoglia S.K., 2016. Approches de modélisation pour évaluer et comparer les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine des pesticides utilisés dans des systèmes de culture conçus pour réduire l'usage des pesticides. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, France.
Lammoglia S.K, Moeys J., Barriuso E., Larsbo M., Marin-Benito J.M., Justes E., Alletto L., Ubertosi M., Nicolardot B., Munier-Jolain N., Mamy L., 2017a. Sequential use of the STICS crop model and of the MACRO pesticide fate model to simulate pesticides leaching in cropping systems. Environmental Science and Pollution Research 24, 6895-6909.
Lammoglia S.K., Makowski D., Moeys J., Justes E., Barriuso E., Mamy L., 2017b. Sensitivity analysis of the STICS-MACRO model to identify cropping practices reducing pesticides losses. Science of the Total Environment 580, 117-129.
Lammoglia SK, Kennedy MC, Barriuso E, Alletto L, Justes E, Munier-Jolain N, Mamy L (soumis). Assessing human health risks from pesticide use in conventional and innovative cropping systems with the BROWSE model.
Larsbo M., Jarvis N.J., 2003. MACRO 5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description. Rep EmergoUppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, 49 p.
Lewan E., Kreuger J., Jarvis N., 2009. Implications of precipitation patterns and antecedent soil water content for leaching of pesticides from arable land. Agricultural Water Management 96, 1633-1640.
Mckay M.D., Beckman R.J., Conover W.J., 2000. A Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. Technometrics 42, 55-61.

Malone R.W., Ahuja L.R., Ma L., Wauchope D.R., Ma Q., Rojas K.W., 2004. Application of the Root Zone Water Quality Model (RZWQM) to pesticide fate and transport: an overview. Pest Management Science 60, 205-221.

Mamy L., Alletto L., Bedos C., Benoit P., Justes E., Lammoglia S.K., Marín-Benito J.M, Munier-Jolain N., Nicolardot B., Pot V., Ubertosi M., Barriuso E., 2017a. Evaluation et comparaison des impacts sur l'environnement et la santé des pesticides utilisés dans des systèmes de culture conventionnels et innovants : synthèse des résultats du projet ECoPESt. Innovations Agronomiques.

Mamy L., Lammoglia S.K., Alletto L., Bedos C., Benoit P., Brun F., Gabrielle B., Justes E., Makowski D., Marín-Benito J.M., Moeys J., Munier-Jolain N., Nicolardot B., Pot V., Quemar T., Ubertosi M., Barriuso E., 2017b. Modélisation des flux de pesticides dans les systèmes de culture : effets de la variabilité du climat, des pratiques agricoles et des propriétés des sols et des pesticides Synthèse des résultats du projet Perform. Innovations Agronomiques.

Marín-Benito J.M., Pot V., Alletto L., Mamy L., Bedos C., Barriuso E., Benoit P., 2014. Comparison of three pesticide fate models with respect to the leaching of two herbicides under field conditions in an irrigated maize cropping system. Science of the Total Environment 499, 533-545.

Morris M.D., 1991. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. Technometrics 33, 161-174.

Mortensen D.A., Bastiaans L., Sattin M., 2000. The role of ecology in the development of weed management systems: an outlook, Weed Research 40, 49-62.

Mottes C., Lesueur-Jannoyer M., Bail M., Malézieux E., 2014. Pesticide transfer models in crop and watershed systems: a review. Agronomy for Sustainable Development 34, 229-250.

Munier-Jolain N., Deytieux V., Guillemin J.P., Granger S., Gaba S., 2008. Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. Innovations Agronomiques 3, 75-88.

Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I: a discussion of principles. Journal of Hydrology 10, 282-290.

PPDB, 2016. The FOOTPRINT pesticide properties database. UK: University of Hertfordshire http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/es/index2.htm.

Peyrard C., Mary B., Perrin P., Véricel G., Gréhan E., Justes E., Léonard J., 2016. N2O emissions of low input cropping systems as affected by legume and cover crops use. Agriculture Ecosystems and Environment 224, 145-156.

Queyrel W., Habets F., Blanchoud H., Ripoche D., Launay M., 2016. Pesticide fate modeling in soils with the crop model STICS: Feasibility for assessment of agricultural practices. Science of the Total Environment 542, 787-802.

R Development Core Team, 2016. https://www.r-project.org/

Règlement 1107/2009 CE, 2009. Regulation of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing Council Directives 79/117/EEC and 91/414/EEC. Official Journal of European Union, L 309.

Rosenbom A.E., Kjaer E., Henriksen T., Ullum M., Olsen P., 2009. Ability of the MACRO model to predict long-term leaching of metribuzin and diketometribuzin. Environmental Science and Technology 43, 3221-3226.

Ruget F., Brisson N., Delécolle R. Faivre, R., 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose themain parameters to be estimated. Agronomie 22, 133-158.

Scopel E., Da Silva F.A., Corbeels M., Affholder F., Maraux F., 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. Agronomie 24, 383-395.

Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F.,Macena Da Silva, F.A., Corbeels,M., Valadares Xavier, J.H., Lahmar R., Recous S., Bernoux M., Blanchart E., de Carvalho Mendes I., de Tourdonnet S., 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. Agronomy for Sustainable Development 33, 113-130.

Shipitalo M.J., Malone R.W., Ma L., Nolan B.T., Kanwar R.S., Shaner D.L., Pederson C.H., 2016. Corn stover harvest increases herbicide movement to subsurface drains - Root Zone Water Quality Model simulations: Simulated effect of stover harvest on herbicide movement to tile drains. Pest Management Science 72, 1124-1132.

Smith J., Smith P., Addiscott T., 1996. Quantitative methods to evaluate and compare soil organic matter (SOM) models. NATO ASI Series 38, 181-199.

Sohrabi T.M., Shirmohammadi A., Montas H., 2002. Uncertainty in nonpoint source pollution models and associated risks. Environmental Forensics 3, 179-189.

Steffens K., Larsbo M., Moeys J., Jarvis N., Lewan E., 2013. Predicting pesticide leaching under climate change: Importance of model structure and parameter uncertainty. Agriculture, Ecosystems and Environment 172, 24-34.

Steffens K., Larsbo M., Moeys J., Kjellström E., Jarvis N., Lewan E., 2014. Modelling pesticide leaching under climate change: parameter vs. climate input uncertainty. Hydrology and Earth System Science 18, 479-491.

Tiktak A., de Nie D., Piñeros Garcet J., Jones A., Vanclooster M., 2004. Assessment of the pesticide leaching risk at the Pan-European level. The EuroPEARL approach. Journal of Hydrology 289, 222-238.
Ugarte-Nano C.C., Nicolardot B., Ubertosi M., 2015. Near-saturated hydraulic conductivity measured on a swelling silty clay loam for three integrated weed management based cropping systems. Soil and Tillage Research 150, 192-200.
Ugarte-Nano C.C., Nicolardot B., Quinche M., Munier-Jolain N., Ubertosi M., 2016. Effects of integrated weed management based cropping systems on the water retention of a silty clay loam soil. Soil and Tillage Research 156, 74-82.
Vanderborght J., Tiktak A., Boesten J.J.T.I., Vereecken H., 2011. Effect of pesticide fate parameters and their uncertainty on the selection of 'worst-case' scenarios of pesticide leaching to groundwater. Pest Management Science 67, 294-306.
Wallach D., Nissanka S.P., Karunaratne A.S., Weerakoon W.M.W., Thorburn P.J., Boote K.J., Jones, J.W. 2016. Accounting for both parameter and model structure uncertainty incrop model predictions of phenology: A case study on rice. European Journal of Agronomy (en ligne). DOI 10.1016/j.eja.2016.05.013.

4. Contribution au plan Ecophyto (et à l'agroécologie)

▪ *Produits transférés*

Le projet Perform a permis de développer une méthode d'évaluation quantitative des performances environnementales des systèmes de culture, STICS-MACRO, et une méthode quantitative d'évaluation des performances sanitaires de ces systèmes, basée sur le modèle BROWSE.

Les résultats obtenus, complétés par ceux qui sont issus du projet ECoPESt, ont permis d'identifier parmi 14 systèmes de culture étudiés (11 systèmes innovants et 3 systèmes conventionnels) ceux qui présentent, dans les conditions de notre étude, les meilleures performances environnementales et sanitaires et inversement ceux qui présentent les moins bonnes performances.

La démarche proposée, basée sur la modélisation, aide au choix des systèmes de culture en identifiant ceux qui permettent d'atteindre les objectifs du plan Ecophyto, donc qui aident à réduire l'exposition de la population et du milieu aux pesticides et à préserver la qualité de l'eau, des sols et de l'air.

Une formation à l'utilisation de STICS-MACRO a été réalisée en novembre 2016 auprès de chercheurs de l'INRA. Cette formation et les discussions qui ont eu lieu à cette occasion ont souligné l'intérêt de l'outil développé et ont permis de mettre en évidence les difficultés qui pouvaient être rencontrées lors de son utilisation. Un support avait été préparé en appui à la formation, il constitue une première version d'un guide d'utilisation.

D'autre part, la méthode que nous avons développée pour évaluer les risques pour la santé liés à l'utilisation des pesticides dans les systèmes de culture, basée sur le modèle BROWSE, est présentée dans un article soumis.

Enfin, les résultats issus de ce projet ont fait l'objet de plusieurs articles en français et en anglais, de rapports, de communications ainsi que d'une formation (Cf 2.5).

▪ *Sorties identifiées, produites à l'état de prototypes, ayant fait l'objet de discussion avec des utilisateurs potentiels*

Comme indiqué ci-dessus, les discussions ayant eu lieu au cours de la formation STICS-MACRO, mais aussi au cours des divers séminaires et congrès où l'outil a été présenté, ont permis de mettre en évidence l'intérêt de STICS-MACRO mais aussi les difficultés liées à son utilisation. Un guide d'utilisation sera disponible.

▪ *Sorties projetées ou envisageables*

Les méthodes développées dans le cadre de ce projet sont complexes et nécessitent non seulement un temps de formation important mais aussi un grand nombre de données pour paramétrer les différents modèles. De plus, les durées des simulations sont longues.

Ainsi, plutôt que de former les professionnels à l'utilisation de ces outils, ce qui est néanmoins possible pour ceux qui le souhaiteraient, il faudrait pouvoir disposer de temps (et de financements) d'ingénieurs ou de post-doctorants (par exemple) qui évalueraient, à l'aide des outils mis ou point, un grand nombre de systèmes de culture en faisant varier les conditions pédoclimatiques. Les résultats disponibles seront ensuite diffusés et directement utilisables par les acteurs concernés. Ce travail inclura aussi les cultures pérennes et les conditions agro-pédoclimatiques spécifiques aux Outre-Mer.

▪ *Connaissances, informations et/ou recommandations que des acteurs pourront exploiter, par exemple pour faire évoluer les dispositifs*

Les résultats obtenus dans le projet Perform sont directement exploitables par les différents acteurs concernés. Parmi les systèmes étudiés, basés sur une monoculture de maïs, une rotation colza-blé-orge et une rotation tournesol-blé dur, les systèmes innovants les plus adaptés pour répondre aux objectifs de protection de l'environnement -eaux souterraines en particulier- et de la santé du plan Ecophyto ont été identifiés. Ils concernent les systèmes bas et très bas intrants et les systèmes sans herbicide.

Nos résultats ont également permis d'identifier les pesticides qu'il serait judicieux de remplacer ou dont il faudrait diminuer les doses pour réduire les risques d'exposition de l'homme (opérateur et résidents) aux pesticides.

Ainsi, ces résultats pourront aider à faire évoluer les dispositifs (i.e. systèmes de culture) en fonction des objectifs recherchés.

Cependant, comme indiqué précédemment, d'autres systèmes de culture restent à étudier, tels que les systèmes incluant des cultures pérennes par exemple, vignobles et vergers en particulier. Des collaborations avec les unités INRA concernées, l'IFV, les chambres d'agriculture et les agriculteurs impliqués dans le réseau FERME DEPHY seront à mettre en place.

Les méthodes développées doivent aussi être adaptées aux Outre-Mer afin de pouvoir étudier les systèmes mis en place dans ces conditions spécifiques. Des collaborations devront être mises en place avec l'INRA Centre Antilles-Guyane, le CIRAD, l'IRD ainsi qu'avec les acteurs locaux des chambres d'agriculture et du réseau FERME DEPHY. Au cours du colloque Ecophyto qui s'est déroulé du 22 au 24 mars 2017, où le projet Perform a été présenté, les représentants des Outre-Mer présents ont souligné l'intérêt qu'il porte à l'adaptation de ce type d'outil à leur contexte agro-pédoclimatique.

Ainsi, les suites du projet Perform devraient permettre d'identifier, en fonction du contexte agro-pédoclimatique, les systèmes présentant le moins d'impacts sur l'environnement et de faire des recommandations au niveau national.