

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts



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

ECoPESt - Evaluation and comparison of the environmental performances of innovative cropping systems designed to reduce the use of pesticides: relating agricultural practices to pesticides pressures and impacts

Programme Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des Pesticides
APR 2011 « Changer les pratiques agricoles pour préserver les services écosystémiques »
Rapport final - Janvier_2017

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts

Coordonnées du laboratoire

INRA - UMR 1402 ECOSYS – Pôle Sol (ex UR 251 PESSAC)
78850 Thiverval-Grignon

Identité et coordonnées de la coordinatrice du projet de recherche

Laure MAMY
INRA - UMR 1402 ECOSYS – Pôle Sol
Bâtiment EGER
78850 Thiverval-Grignon
Tel : 01 30 81 54 03
e-mail : laure.mamy@inra.fr

Date : 6 janvier 2017

N° de contrat INRA : 11000713

Date du contrat : 06/05/2013

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts

Action pilotée par le Ministère chargé du développement durable, avec l'appui financier de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques, par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du Plan Ecophyto

RAPPORT SCIENTIFIQUE

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

**Programme Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des Pesticides
APR 2011 « Changer les pratiques agricoles pour préserver les services écosystémiques »**

Responsable scientifique du projet :

Laure MAMY
INRA - UMR 1402 ECOSYS – Pôle Sol
Bâtiment EGER 78850 Thiverval-Grignon

Partenaires scientifiques bénéficiaires :

Eric JUSTES, Grégory VERICEL, Catherine BONNET
UMR 1248 INRA-INP Toulouse « Agrosystèmes, agricultures, Gestion des ressources, Innovations et Ruralités » (AGIR)
Chemin de Borde-Rouge, Auzeville, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex
Autres participants : Pierre PERRIN, Didier RAFAILLAC

Nicolas MUNIER-JOLAIN
UMR 1347 INRA « Agroécologie »
17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon Cedex
Autres participants : Marie-Hélène BERNICOT, Arnaud COFFIN, Pascal FARCY, Pascal MARGET, Eric PIMET

Bernard NICOLARDOT, Marjorie UBERTOSI
Université Bourgogne Franche-Comté, AgroSup Dijon, UMR Agroécologie
26 bd Dr Petitjean, 21079 Dijon
Autres participants : Romain DAIRON, Carolina UGARTE-NANO

Caroline COLNENNE, Thierry DORE, David MAKOWSKI
UMR 211 INRA-AgroParisTech « Agronomie »
78850 Thiverval-Grignon
Autres participants : Gilles GRANDEAU, Dominique LE FLOCH, Véronique TANNEAU

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

Enrique BARRIUSO, Carole BEDOS, Pierre BENOIT, Valérie POT,
Jesus MARIN-BENITO, Sabine-Karen LAMMOGLIA
UMR 1402 ECOSYS – Pôle Sol (ex UMR 1091 EGC)
78850 Thiverval-Grignon

Nathalie STREHL, Michel LELEU
INRA - UE 972 Grandes Cultures Innovation Environnement – Picardie (GCIE)
2 Chaussée Brunehaut Estrées-Mons BP50136 80203 Péronne Cedex
Autre participant : Sébastien DARRAS

Lionel ALLETTO
Université de Toulouse, INP-Ecole d'ingénieurs de Purpan, UMR
AGIR, 75 voie du TOEC, 31076 Toulouse
Autres participants : Simon GIULIANO, Gaël RAMETTI

François BRUN
ACTA, UMR 1248 AGIR, INRA
B.P. 52627, 31326 Castanet Tolosan
Autre participant : Thibaud Quemar

Julien MOEYS, Mats LARSBO, Nick JARVIS
Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences
750 07 Uppsala, Suède

Marc K KENNEDY, Andy DM HART
Fera Science Ltd. (FERA)
Sand Hutton, York, YO41 1LZ, Royaume-Uni

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

Coordinatrice : Laure Mamy (INRA, UMR ECOSYS, Thiverval-Grignon)

Introduction

Contexte et objectifs

Le défi du plan Ecophyto consiste à diminuer d'une manière significative le recours aux produits phytosanitaires, tout en continuant à assurer un niveau de production élevé en quantité et en qualité. Seule une combinaison de différentes techniques culturales peut remplacer au moins en partie la protection chimique et cette combinaison implique l'introduction de nouveaux systèmes de culture. La réduction de la dépendance aux pesticides peut ainsi reposer sur de nombreux leviers d'action : variétés résistantes, types de rotation, implantation de cultures intermédiaires, couverture végétale en inter-rang, plantes de service... Cependant, compte tenu de la diversité des contextes pédologiques, climatiques et agronomiques, un très grand nombre de systèmes de culture peut être conçu et il est impossible de réaliser des expérimentations en conditions réelles de plein champ pour étudier la durabilité de chacun de ces systèmes. Il est donc indispensable de développer des outils pour évaluer les impacts des pesticides utilisés dans les systèmes de culture.

Dans ce cadre, les objectifs du projet ECoPESt consistent à :

- (1) évaluer et comparer les performances environnementales et sanitaires de systèmes de culture conçus avec l'objectif de réduire l'usage des pesticides (systèmes basés notamment sur des rotations allongées et diversifiées, des cultures intermédiaires, des cultures associées...)
- (2) établir un lien entre pratiques, pressions et impacts des pesticides et identifier les systèmes présentant le moins d'impacts sur l'environnement et sur la santé afin de préserver les services écosystémiques (notamment services d'approvisionnement et de régulation).

Démarche

La démarche consiste à :

- (1) Tester plusieurs modèles numériques (MACRO, PEARL, PRZM et STICS-MACRO) décrivant le devenir des pesticides dans l'environnement en comparant les résultats des simulations à des mesures réalisées dans plusieurs sites expérimentaux pour identifier le ou les modèle(s) le(s) plus performant(s).
- (2) Etudier avec le(s) modèle(s) retenu(s) les effets de la variabilité des systèmes de culture et de la variabilité pédoclimatique sur les concentrations en pesticides dans l'environnement.
- (3) Relier la pression « pesticides » (caractérisée par l'indicateur de fréquence de traitements, IFT) à leurs impacts sur l'environnement (estimés par des niveaux de concentrations observés et simulés dans l'eau lixiviée) et la santé (estimés à l'aide d'un modèle d'exposition de la population aux pesticides) pour différents systèmes et différentes conditions pédoclimatiques. Le lien entre pratiques, pressions et impacts des pesticides sera ainsi établi.
- (4) Proposer une démarche de classement des systèmes de culture en identifiant les systèmes présentant le moins d'impacts sur l'environnement et la santé.

Le projet ECoPESt est résumé dans la Figure 1.

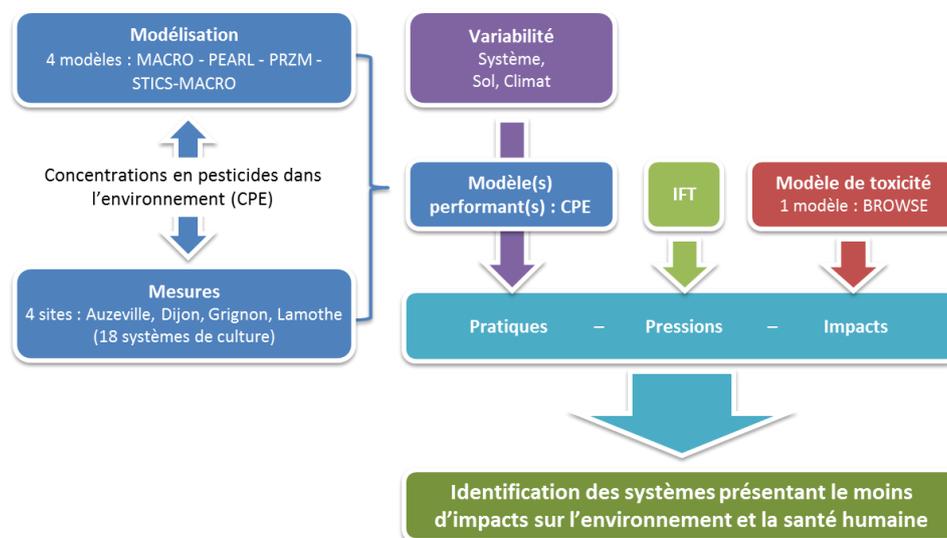


Figure 1. Représentation schématique de la démarche utilisée dans le projet ECoPESt [MACRO : *Macropore flow model* (Larsbo et Jarvis, 2003) ; PRZM : *Pesticide Root Zone Model* (Carsel et al., 1998) ; PEARL : *Pesticide Emission Assessment At Regional and Local scales* (Leistra et al., 2001) ; STICS-MACRO (Lammoglia et al., 2016a) ; IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements ; BROWSE : *Bystanders, Residents, Operators and WorkerS Exposure models for plant protection products* (Butler Ellis et al., 2016a)].

Complémentarité avec d'autres projets

Le projet ECoPESt exploite des interactions avec trois autres projets :

- 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 (SystemEco⁴) (APE Ecophyto 2011) (2012-2018) : « Evaluation et modélisation quantitative multicritère 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)
- Perform (APR PSPE1 2012) (2013-2016) : « 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 », coordonné par Laure Mamy (INRA, UMR ECOSYS, Thiverval-Grignon).

Grâce aux projets MicMac Design et SystemEco⁴, nous avons eu accès à des dispositifs agronomiques testant différents systèmes de culture innovants et aux premières mesures des concentrations en pesticides dans trois sites expérimentaux (Dijon, Auzeville et Lamothe), ainsi qu'aux données nécessaires pour caractériser les sites et paramétrer les modèles. D'autre part, ces deux projets réalisent une évaluation socio-économique des systèmes de culture qui vient en complément du projet ECoPESt. Le projet Perform, quant à lui, a pour objectifs d'évaluer les performances environnementales de systèmes de culture conçus pour réduire l'usage des pesticides en tenant compte de la variabilité spatio-temporelle des conditions agro-pédoclimatiques et des principales sources d'incertitudes liées aux milieux, molécules et modèles.

A. Présentation des sites expérimentaux et des systèmes de culture étudiés

Le projet ECoPESt reposait initialement sur 4 sites expérimentaux, contrastés du point de vue pédoclimatique et du contexte agricole : Dijon, Grignon, Auzeville et Lamothe. Cependant, les systèmes expérimentés à Grignon n'ont finalement pas pu être évalués dans le cadre de ce travail car aucune mesure de concentration en pesticide n'a été possible en raison d'aléas climatiques et de problèmes techniques liés aux lysimètres (non résolus). La diversité des systèmes et des contextes pédoclimatiques couverts par les sites de Dijon, Auzeville et Lamothe s'est néanmoins avérée suffisante pour explorer des stratégies contrastées pour la maîtrise des bioagresseurs et pour étudier les effets de la variabilité des systèmes, des sols et du climat (Tableau 1, Figure 2, Section B.2).

Tableau 1. Description générale des sites expérimentaux de Dijon, Auzeville et Lamothe

	Dijon	Auzeville	Lamothe
Responsable du site	Nicolas Munier-Jolain (INRA)	Eric Justes (INRA)	Lionel Alletto (INP - El Purpan)
Année de mise en place	2000	2011	2011
Objectifs	Réduire l'usage des pesticides	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 élémentaire (ha)	2	0.3	0.08
Système de référence	Colza - Blé - Orge	Blé dur - Tournesol (en sec)	Monoculture de maïs irrigué
Nombre de systèmes innovants	4	6	3
Mesure des transferts de pesticides	Lysimètres à mèche Lysimètres à plaque Bougies poreuses ➔ 50 cm de profondeur	Lysimètres à plaque ➔ 100 cm de profondeur	Lysimètres à plaque ➔ 100 cm de profondeur

A.1. Description des systèmes de culture

A.1.1 Dijon

Le système de référence est une rotation colza - blé d'hiver - orge d'hiver (**S1**) (Tableau 1).

Les quatre systèmes innovants expérimentés sont les suivants (Munier-Jolain et al., 2008 ; Chikowo et al., 2009) :

- **Système « Protection intégrée sans labour en semis direct sous couvert » (S2).** Rotation diversifiée sur 6 ans, à base de cultures semées au début de l'automne (colza), en fin d'automne (céréales, féverole), en début de printemps (orge) ou en fin de printemps (soja, sorgho). Adaptation des dates de semis, des densités, des variétés, de la fertilisation. Pas de désherbage mécanique, désherbage chimique raisonné.
- **Système « Protection intégrée sans désherbage mécanique » (S3).** Rotation diversifiée sur 6 ans, à base de cultures semées au début de l'automne (colza), en fin d'automne (céréales, féverole), en début de printemps (orge) ou en fin de printemps (tournesol, soja, maïs, sorgho). Labour un an sur deux, adaptation des dates de semis, des densités, des variétés, de la fertilisation, colza associé à une culture de service (lentille). Protection phytosanitaire raisonnée, avec un désherbage chimique uniquement. Pas de contrainte de travail du sol.

- **Système « Protection intégré typique » (S4).** Ce système mobilise l'ensemble des moyens agronomiques disponibles pour lutter contre les infestations adventices, y compris le désherbage mécanique et les herbicides en dernier recours. Il est basé sur une rotation diversifiée de 6 ans, à base de cultures semées au début de l'automne (colza), en fin d'automne (céréales, féverole), en début de printemps (orge, lupin) ou en fin de printemps (tournesol, soja, maïs, sorgho). Labour un an sur deux, adaptation des dates de semis, des densités, des variétés, de la fertilisation, mélange d'espèces.
- **Système « Sans herbicide » (S5).** Rotation diversifiée sur 9 ans, à base de cultures semées au début de l'automne (colza), en fin d'automne (céréales, féverole), en début de printemps (orge, lupin) ou en fin de printemps (tournesol, soja, maïs, sorgho), et introduction de luzerne pendant 3 ans. Labour un an sur deux, adaptation des dates de semis, des densités, des variétés, de la fertilisation. Désherbage mécanique.

A.1.2. Auzeville

Le système de référence est une rotation blé dur - tournesol, en sec (**Référence**, non équipé pour la mesure des concentrations en pesticides) (Tableau 1).

Le dispositif consiste en six systèmes de culture. Au total, il y a 18 parcelles de sorte que toutes les cultures des rotations soient présentes chaque année (Peyrard et al., 2016).

- **Systèmes « Bas intrants ».** Réduction de 50% de l'IFT de la rotation de référence blé dur-tournesol par l'introduction d'une culture à faible IFT dans la rotation, en privilégiant les techniques de désherbage mécanique et en déclenchant les traitements fongiques à partir de seuils d'intervention : (1) sorgho - tournesol - blé dur, sol nu en interculture (**BI**) ; (2) sorgho - tournesol +trèfle d'Alexandrie en implantation sous couvert - blé dur - phacélie+vesce (**BI-CI**).
- **Systèmes « Très bas intrants avec cultures monospécifiques ».** Réduction des apports d'azote et de 75% de l'IFT de la rotation de référence par l'introduction d'une légumineuse, en privilégiant les techniques de désherbage mécanique et en utilisant différentes variétés de blé dur pour résister aux maladies : (1) tournesol - féverole d'hiver - blé dur (mélange variétal), sol nu en interculture ; (2) tournesol - avoine - féverole d'hiver - moutarde+vesce - blé dur (mélange variétal).
- **Systèmes « Très bas intrants avec cultures associées ».** Réduction des apports d'azote et de 75% de l'IFT de la rotation de référence en utilisant la complémentarité de différentes espèces associées pour une meilleure utilisation des ressources azotées et pour limiter les impacts négatifs des bioagresseurs tout en privilégiant les techniques de désherbage mécanique : (1) soja+tournesol - féverole+triticale - blé dur+pois, sol nu en interculture (**TBI**) ; (2) soja+tournesol - féverole+triticale - moutarde+vesce - blé dur+pois - avoine fourragère+vesce (**TBI-CI**).

A cause des nombreuses maladies qui ont touché la féverole dans les systèmes « Très bas intrants avec cultures monospécifiques », les traitements pesticides ont été particulièrement importants et au final supérieurs à ceux des systèmes « Bas intrants ». Les objectifs de réduction de l'usage des pesticides n'ayant pas été atteints, ces systèmes n'ont pas été étudiés dans la suite de ce travail.

A.1.3. Lamothe

Le système de référence est une monoculture de maïs irrigué (**MM_{conv}**) (Tableau 1).

Initialement, cinq systèmes de culture innovants étaient expérimentés mais deux d'entre eux ont été abandonnés car les résultats n'étaient pas concluants (pas de différenciation marquée par rapport aux trois autres systèmes).

Les systèmes innovants testés consistent en (Giuliano et al., 2016) :

- **Monoculture de maïs « Bas intrants » avec désherbage mécanique (MM_{BI}),** semis de culture intermédiaire sous couvert et labour de printemps : maïs - trèfle violet+ray-grass hybride - maïs...

- **Monoculture de maïs avec semis de culture intermédiaire après récolte et implantation en strip-till dans le mulch (travail du sol simplifié, MM_{TS})** : maïs - mélange d'avoine fourragère+vesce+phacélie - maïs...
- **Système visant à réduire de 50% l'irrigation de la conduite de référence avec diverses espèces en rotation courte (RC)**, pour une réduction conjointe des flux de nitrates et de pesticides vers les eaux au moyen de cultures intermédiaires, de désherbage mécanique et de seuils d'intervention adaptés : maïs - avoine fourragère+vesce - orge - soja - blé tendre.

Au final, 11 systèmes de cultures innovants et 3 systèmes de référence ont été expérimentés. Ces trois sites sont présentés sur la Figure 2.



Figure 2. (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).

A.2. Caractérisation des systèmes de culture : « Pression » liée aux pesticides

La pression liée aux pesticides a été caractérisée en comparant le nombre de pesticides appliqués, les quantités moyennes annuelles appliquées et les IFT des différents systèmes (Tableau 3).

Les IFT ont été calculés pour chaque système et pour chaque saison culturale, puis la moyenne des IFT de l'ensemble des saisons culturales a été déterminée (Tableau 3). Les IFT comprennent les herbicides, fongicides, insecticides et molluscicides. Ils tiennent compte des traitements de semences mais n'intègrent que les pesticides organiques (par exemple, les traitements à base de phosphate ferrique ont été exclus des calculs).

Quantités de pesticides appliquées

Pour les sites de Dijon et Lamothe, les résultats montrent la réduction significative de l'usage des pesticides, en termes de nombre de pesticides différents utilisés et de quantités, dans les systèmes innovants par rapport aux systèmes de référence (Tableau 2). Dans le cas des systèmes basés sur la rotation colza-blé-orge (Dijon), c'est le système « Sans herbicide » qui permet la plus grande réduction des quantités et du nombre de pesticides appliqués tandis que pour les systèmes basés sur la monoculture de maïs (Lamothe), c'est le système « Rotation courte » qui permet de minimiser l'usage des pesticides. En revanche, les systèmes basés sur un travail du sol simplifié nécessitent notamment l'utilisation de glyphosate pour désherber avant le semis ce qui a tendance à augmenter les quantités de pesticides utilisées (Tableau 2). Pour le système blé dur-tournesol (Auzeville), ce sont les systèmes « Très bas intrants avec cultures associées » qui permettent la plus forte réduction des quantités appliquées (Tableau 2).

Tableau 2. Quantités moyennes annuelles de pesticides appliquées dans les différents systèmes des sites de Dijon, Auzeville et Lamothe ; nombre de pesticides appliqués et IFT. CI : culture intermédiaire, S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert, S3 : PI sans désherbage mécanique, S4 : PI typique, S5 : Sans herbicide, BI : Bas intrants, TBI : Très bas intrants, MM_{BI} : Bas intrants, MM_{TS} : Travail du sol simplifié, RC : Rotation courte.

Site	Système	Quantité moyenne annuelle de pesticides appliqués (g/ha)	Nombre de pesticides différents appliqués	IFT
Dijon	Référence S1	2846	58	8.1
	S2	1622	48	5.6
	S3	843	44	4.8
	S4	851	46	4.1
	S5	159	19	1.7
Auzeville	Référence	1295	13	5.1
	BI	698	10	2.6
	BI-CI	850	14	3.4
	TBI	329	8	3.1
	TBI-CI	329	7	3.1
Lamothe	Référence MM _{Conv}	2222	10	6.6
	MM _{BI}	1051	8	3.2
	MM _{TS}	2901	13	7.1
	RC	229	13	2.4

IFT

Sur le site de Dijon, les IFT des systèmes innovants diminuent graduellement par rapport à l'IFT du système de référence colza-blé-orge avec l'introduction des divers leviers d'action (Cf A.1). En particulier, c'est le système « Sans herbicide » qui permet d'obtenir la plus forte réduction de l'IFT par rapport au système de référence avec une diminution de 79% (réduction de 33% pour S2, 42% pour S3, 52% pour S4).

Sur le site de Lamothe, dans le cas de la monoculture de maïs, les systèmes MM_{BI} et RC permettent de réduire l'IFT de 51% et 63%, respectivement, tandis qu'inversement le système MM_{TS} conduit à une augmentation de 7% de l'IFT par rapport au système de référence MM_{Conv}. Ce résultat est essentiellement dû aux applications de glyphosate (Annexe C2 - Tableau AC2.1). Au regard de l'IFT, le système RC (introduction d'espèces en rotation courte) apparaît comme le plus prometteur pour diminuer le recours aux pesticides dans les systèmes de culture basés sur le maïs.

Enfin, sur le site d'Auzeville, les quatre systèmes innovants testés permettent de réduire l'IFT par rapport au système de référence blé-tournesol : réduction de 49% de l'IFT pour BI, 34% pour BI-CI et 39% pour les deux systèmes TBI. Toutefois, l'introduction d'une culture intermédiaire dans le système bas intrant (BI-CI) conduit à un IFT plus élevé que celui du système BI en raison de l'application du glyphosate avant l'implantation de la culture principale. Les IFT plus élevés des systèmes TBI par rapport au système BI sont dus, quant à eux, aux traitements de semences : lorsqu'il y a deux cultures associées, il y a deux fois plus de traitements de semences que dans le cas d'une seule culture (systèmes BI). L'IFT augmente mais les quantités totales de pesticides en traitement de semences sont néanmoins légèrement inférieures dans les systèmes TBI (145 g au total en 4 ans) que dans les systèmes BI (153 g). Cet exemple illustre une des limites de l'IFT : plusieurs applications à faibles doses peuvent paraître plus défavorables qu'une seule application à forte dose.

Il est aussi intéressant de souligner que les IFT ne sont pas systématiquement corrélés aux quantités de pesticides appliquées (Tableau 2).

B. Bilan des résultats obtenus par tâche

B.1. Tâche 1 : « Etude de la performance des modèles : comparaison des concentrations en pesticides mesurées dans des systèmes de culture innovants et des concentrations estimées par modélisation »

Responsable : L. Alletto (INP - EI Purpan)

Participants : INRA-ECOSYS (L Mamy, E Barriuso, C Bedos, P Benoit, V Pot, J Marín-Benito, SK Lammoglia), INRA-AGIR (E Justes, C Bonnet, P Perrin, D Rafailac, G Véricel), INRA-Agroécologie (N Munier-Jolain, MH Bernicot, A Coffin, P Farcy, P Marget, E Pimet), INRA-Agronomie (T Doré, C Colnenne, G Grandeau, D Le Floch, V Tanneau), INP - EI Purpan (L Alletto, S Giuliano, G Rametti), AgroSup Dijon (B Nicolardot, M Ubertosi, R Dairon, C Ugarte-Nano), SLU-Uppsala - Suède (J Moeys, M Larsbo, N Jarvis)

L'objectif de la tâche 1 est d'identifier le(s) modèle(s) le(s) plus performant(s) pour représenter les concentrations en pesticides observées in situ dans les systèmes de culture conventionnels et innovants.

B.1.1. Matériels et méthodes

B.1.1.1 Sites expérimentaux

Les sites ont été présentés dans la section A de ce rapport.

B.1.1.2 Mesure des concentrations en pesticides

Sur les sites de Lamothe et Auzeville, les pesticides ont été dosés dans les percolats récoltés dans les lysimètres à plaque à 1 m de profondeur. Sur le site de Dijon, les analyses ont été effectuées dans les échantillons récupérés dans les lysimètres à mèche placés à 50 cm de profondeur. Quelques résultats sont également disponibles à partir des mesures réalisées dans les lysimètres à plaques.

Les percolats étaient prélevés en moyenne toutes les semaines (parfois plus fréquemment selon la pluviométrie) et étaient ensuite stockés à 4°C jusqu'à ce qu'ils soient analysés. Lorsque les volumes d'eau étaient faibles, les échantillons ont été cumulés.

Les analyses ont été confiées au laboratoire inter-départemental de la Drôme.

Il faut souligner que la récolte des données mesurées dans les différents sites expérimentaux a rencontré plusieurs difficultés :

- **Dijon.** Les premières mesures de concentrations en pesticides ont été transmises en avril 2014, puis une deuxième série de données a été fournie en juillet 2014. Les résultats des mesures de flux hydriques ont été reçus en décembre 2014. Un grand nombre d'analyses a été effectué, mais seul 55% des données étaient exploitables pour calculer les flux d'eau et 47% pour le calcul des concentrations en pesticides. En effet, à cause d'une pluviométrie importante de 2012 à 2015, les lysimètres à mèche ont été régulièrement submergés et les mesures de concentrations en pesticides ne reflétaient donc plus des mesures à 50 cm de profondeur mais une mesure globale de la teneur en pesticide dans la nappe. Par ailleurs, les mesures réalisées avec les bougies poreuses se sont révélées inexploitable. Enfin, quelques résultats ont pu être obtenus dans les lysimètres à plaque installés dans le système de référence.
- **Auzeville.** Les premières mesures de concentrations en pesticides et de flux d'eau ont été fournies en juillet 2013. Malheureusement, le nombre de données était très faible en raison d'aléas climatiques (périodes de sécheresse et d'inondations). Une deuxième série de mesure a été fournie en août 2016.
- **Lamothe.** Les premières mesures de concentrations en pesticides et de flux d'eau ont été obtenues en 2013, puis des données complémentaires ont été fournies en octobre 2014. Ce jeu de données était initialement le plus complet, c'est pourquoi les premiers tests ont débuté à partir de ce site (Cf B.1.2.3.1).

B.1.1.3 Modèles numériques

Pour évaluer les risques de contamination de l'environnement (sol, eau, air) par les pesticides, l'EFSA recommande d'utiliser au moins deux des quatre modèles (MACRO, PEARL, PELMO, PRZM) retenus au niveau Européen dans le cadre de l'homologation des pesticides (EFSA, 2004). Dans ce projet, nous avons choisi d'utiliser MACRO (Larsbo et Jarvis, 2003), PEARL (Leistra et al., 2001) et PRZM (Carsel et al., 1998) qui sont complémentaires par les processus qu'ils décrivent (Tableau 3).

MACRO (Macropore flow model, Larsbo et Jarvis, 2003)

MACRO présente l'avantage de décrire le profil de sol avec deux porosités différentes. Ainsi, l'eau et les solutés sont distribués entre deux domaines : (1) les micropores où se produisent des flux à l'équilibre, et le transport, représentés par l'équation de Richards et l'équation de convection-dispersion ; (2) les macropores où les flux sont conditionnés par la gravité. 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 dans les autres directions sont modélisés comme des processus diffusifs contrôlés par une longueur de diffusion effective.

PEARL (Pesticide Emission Assessment at Regional and Local scales, Leistra et al., 2001)

Dans le modèle PEARL, la porosité du sol est considérée comme étant homogène. Le transport d'eau dans le sol est décrit de manière mécaniste par les équations de Richards et de Darcy. Le transport des pesticides en phase liquide est décrit par l'équation de convection-dispersion. La diffusion en phase gazeuse et la volatilisation sont également décrites. Les équations de conservation de la masse sont distinctes pour les domaines à l'équilibre ou en « non-équilibre » dans le sol.

PRZM (Pesticide Root Zone Model, Carsel et al., 1998)

PRZM simule les mouvements et les transformations des pesticides dans les sols aux alentours de la zone racinaire des plantes. Comme dans PEARL, la porosité du sol est considérée comme étant homogène. Le mouvement de l'eau est déterminé en assimilant chaque horizon du sol à un réservoir : lorsque le contenu en eau d'un horizon dépasse la teneur en eau à la capacité au champ, l'eau en excès percole dans l'horizon inférieur. Le contenu limite inférieur en eau correspond au point de flétrissement

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

permanent. Le modèle tient compte du ruissellement et de l'érosion mais ces processus ne seront pas considérés dans ce travail en raison de la configuration des sites.

Tableau 3. Synthèse des principaux processus décrits par les modèles MACRO, PEARL et PRZM

Processus	MACRO (Larsbo et Jarvis, 2003)	PEARL (Leistra et al., 2001)	PRZM (Carsel et al., 1998)
Hydrologie	Micropores : Equation de Richards Macropores : Gravité Capillarité, Flux préférentiels	Equation de Richards Capillarité	Réservoirs
Adsorption	Linéaire, Freundlich Instantanée ou cinétique	Linéaire, Freundlich Instantanée et non-équilibre	Linéaire, Freundlich Instantanée, réversible ou cinétique
Dégradation	Cinétique d'ordre 1	Cinétique d'ordre 1	Cinétique d'ordre 1 ou biphasique
Volatilisation	Relation empirique	A partir du sol et de la surface des feuilles	A partir du sol et de la surface des feuilles
Transport	Micropores : Convection-Dispersion Macropores : Convection	Convection-Dispersion	Convection et dispersion numérique
Erosion	-	-	Equation universelle modifiée de perte des sols
Ruissellement	-	-	Technique des « Curve numbers »
Croissance de la culture	Linéaire : hauteur, LAI et enracinement initiaux et maximaux	LAI et enracinement fonction du stade de développement	Linéaire : hauteur, taux de couverture et enracinement maximaux

B.1.1.4 Démarche

Le test de la performance des trois modèles MACRO, PEARL et PRZM est basé sur la comparaison des concentrations simulées et des concentrations observées. Ce test a été réalisé en 4 phases :

- **Phase 1.** Dans un premier temps, nous avons comparé rigoureusement les trois modèles en les paramétrant de manière identique et en autorisant une phase de calage si nécessaire. Pour ce test, nous nous sommes basés sur les mesures obtenues sur le site de Lamothe car elles correspondaient au jeu de données le plus complet dont nous disposions au début du projet (Cf B.1.1.2.). En particulier, nous avons focalisé ce test sur le cas de la monoculture de maïs irriguée de référence pour deux herbicides du maïs : le S-métolachlore et la mésotrione (Marín-Benito et al., 2014).
- **Phase 2.** Dans, la seconde phase de test, il s'est agi de paramétrer chacun des trois modèles en suivant les recommandations des guides d'utilisateurs, de la bibliographie et des documents guide existants, sans procéder à une phase de calage, afin de tester si une procédure de paramétrage « simplifiée » permettait d'aboutir à des résultats satisfaisants. Nous avons par ailleurs distingué deux cas : les systèmes sans mulch (Phase 2.1) et les systèmes avec mulch (Phase 2.2). En effet, les modèles MACRO, PEARL et PRZM ne disposant pas de module « mulch », il a fallu développer une méthode spécifique. Dans cette phase, tous les systèmes de culture pour lesquels nous avons pu disposer de mesures ont été étudiés.
- **Phase 3.** Une des limites des modèles MACRO, PEARL et PRZM est qu'ils ne permettent pas de décrire les pratiques agricoles complexes mises en place dans les systèmes innovants (i.e. présence d'un mulch, cultures associées, travail du sol (sauf dans PEARL)...). Ainsi, nous avons développé une nouvelle approche combinant l'utilisation d'un modèle de culture « STICS » et d'un modèle « pesticides » MACRO pour modéliser les flux de pesticides dans les systèmes de culture complexes. Cette étape s'est focalisée sur un système du site de Lamothe et un système du site de Dijon (Lammoglia et al., 2016a).

- **Phase 4.** Les modèles MACRO, PEARL et PRZM étant des modèles 1D, nous avons voulu tester un modèle 2D (Hydrus 2D, Simunek et al., 1999) afin de déterminer si la représentation des transferts d'eau, donc des transferts de pesticides, était améliorée. Cette étape s'est focalisée sur le site de Dijon (Dairon et al., en préparation).

Les données mesurées ayant été obtenues séquentiellement tout au long du projet, ceci explique que le test des modèles s'est basé dans certains cas sur un nombre limité de systèmes ou de sites.

B.1.1.4 Evaluation de la performance des modèles

La performance des modèles a été évaluée de manière quantitative à l'aide de plusieurs indices statistiques :

- Efficience (EF) (Nash et Sutcliffe, 1970) :

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

O_i et P_i correspondent aux valeurs observées et simulées, respectivement, \bar{O} correspond à la moyenne des valeurs observées et n au nombre de mesures. EF varie entre $-\infty$ et 1 et lorsque $EF = 1$, il y a une parfaite correspondance entre les valeurs observées et simulées.

- Coefficient de la masse résiduelle (CRM) (Smith et al., 1996) :

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

O_i et P_i correspondent aux valeurs observées et simulées et n au nombre de mesures. Le CRM varie entre $-\infty$ et $+\infty$. Une valeur négative (positive) de CRM indique que la majeure partie des valeurs simulées est supérieure (inférieure) aux valeurs mesurées. Lorsque $CRM = 0$, les valeurs simulées sont égales aux valeurs mesurées. Le CRM donne une indication sur l'erreur globale dans la distribution des valeurs simulées par rapport à la distribution des valeurs mesurées, mais sans considérer l'ordre des mesures.

- Erreur quadratique moyenne (RMSE) (Smith et al., 1996) :

$$RMSE (\%) = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

De même, O_i et P_i correspondent aux valeurs observées et simulées et n au nombre de mesures, \bar{O} correspond à la moyenne des observations. Lorsque $RMSE = 0$, il n'y a pas de différences entre simulations et observations.

- Coefficient de corrélation (r) (Smith et al., 1996) :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P})}{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]^{1/2} [\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2]^{1/2}}$$

O_i et P_i correspondent aux valeurs observées et simulées, \bar{O} et \bar{P} correspondent à la moyenne des valeurs observées et prédites et n au nombre de mesures. Lorsque $r = 1$, il y a une parfaite corrélation entre les valeurs observées et simulées.

B.1.2. Résultats et discussion

B.1.2.1 Mesure des concentrations en pesticides et comparaison des performances environnementales des systèmes de culture

Pesticides lixiviés et concentrations mesurées

D'une manière générale, les pesticides qui ont été appliqués sur les sites ont été recherchés (Tableau 4). Cependant, le nombre de pesticides détectés est parfois très faible (dans certains cas, peut-être en raison de problèmes liés aux mesures).

Ainsi, dans le cas des systèmes colza-blé-orge (Dijon), il est difficile de comparer les données observées dans les systèmes innovants par rapport à celles qui ont été observées dans le système de référence. Toutefois, deux systèmes se distinguent des autres et semblent limiter la lixiviation des pesticides : « Protection intégrée sans désherbage mécanique » (S3) et « Sans herbicide » (S5) (Tableau 4). Sur le site d'Auzeville, le système de référence blé dur-tournesol n'était pas équipé pour le prélèvement d'eau lixiviée, il n'est donc pas possible de comparer les systèmes innovants à leur référence. Néanmoins, le nombre de pesticides détectés dans les systèmes « Très bas intrants avec cultures associées » (TBI) est moins élevé que dans les systèmes « Bas intrants » (BI). Ce résultat est en accord avec les moindres quantités de pesticides appliquées dans ce système (Tableau 2). Dans le cas du site de Lamothe, les résultats montrent que le système « Rotation courte » (RC) est celui dans lequel le nombre de pesticides retrouvés dans l'eau lixiviée est le plus faible, ce qui correspond aussi à la plus faible application de pesticide (Tableau 2). En revanche, 6 pesticides différents sont détectés dans le système « Travail du sol simplifié » (MM_{TS}), comme dans le système de référence. En effet, les quantités et nombre de pesticides appliqués dans ces deux systèmes sont plus élevés et sont sensiblement les mêmes (Tableau 2).

En considérant l'ensemble des systèmes étudiés, parmi les 20 pesticides différents détectés, 13 sont des herbicides, 5 des fongicides, 2 des insecticides et, enfin, 1 est un molluscicide (Tableau 4). Ces résultats rejoignent les mesures réalisées au niveau national où environ 80% des pesticides retrouvés dans l'eau sont des herbicides (CGDD, 2016). Les pesticides détectés dans les trois sites figurent aussi parmi ceux qui sont les plus détectés en France métropolitaine : glyphosate et son métabolite l'AMPA, S-métolachlore, boscalide, isoproturon et imidaclopride (Tableau 4 ; CGDD, 2016). Treize des 20 molécules retrouvées ont en effet une mobilité élevée à très élevée (classification de Mc Call, 1980), soit un K_{foc} inférieur à 150 ; 4 pesticides ont une mobilité moyenne (150 < K_{foc} < 500) ; 3 ont une mobilité faible à très faible (500 < K_{foc} < 5000) et 1 pesticide, le glyphosate, est considéré comme immobile (K_{foc} > 5000) (Tableau 5). Malgré sa très faible mobilité, cet herbicide est le pesticide le plus fréquemment retrouvé dans les eaux en France (CGDD, 2016) et, dans le cadre de cette étude, il a en effet été détecté dans les lysimètres, de même que l'AMPA. D'une manière générale, le transfert des pesticides fortement adsorbés vers les eaux souterraines est dû à une combinaison de phénomènes de transports préférentiels consécutifs à des épisodes de précipitations intenses et à du transport particulaire (Vereecken, 2005).

Tableau 4. Nombre de pesticides appliqués et recherchés et pesticides détectés dans les différents systèmes des sites de Dijon, Auzeville et Lamothe. CI : culture intermédiaire, S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert, S3 : PI sans désherbage mécanique, S4 : PI typique, S5 : Sans herbicide, BI : Bas intrants, TBI : Très bas intrants, MM_{BI} : Bas intrants, MM_{TS} : Travail du sol simplifié, RC : Rotation courte. F : fongicide, H : herbicide, I : insecticide, M : molluscicide. AMPA : acide aminométhylphosphonique (métabolite du glyphosate).

Site	Système	Nombre de pesticides différents appliqués	Nombre de pesticides + métabolites recherchés	Pesticides + métabolites détectés
Dijon	Référence S1	58	50 + 2	Boscalide (F), Isoproturon (H), Quinmérac (H)
	S2	48	43 + 1	2,4-D (H), Azoxystrobine (F), Bentazone (H), Boscalide (F), Glyphosate (H)
	S3	44	38 + 1	Imazamox (H)
	S4	46	41 + 1	Azoxystrobine (F), Cyproconazole (F), Florasulame (H), Glyphosate (H)
	S5	19	17	Boscalide (F)
Auzeville	Référence	13		Non instrumenté
	BI	10	13 + 1	Flurochloridone (H), Prothioconazole (F), S-métolachlore (H)
	BI-CI	14	8	Imidaclopride (I), Prothioconazole (F), S-métolachlore (H)
	TBI	8	8 + 1	Métalaxyl M (F), Prothioconazole (F), S-métolachlore (H)
	TBI-CI	7	7	Prothioconazole (F), S-métolachlore (H)
Lamothe	Référence MM _{Conv}	10	11	Dicamba (H), Mésotrione (H), Métaldéhyde (M), Nicosulfuron (H), S-métolachlore (H), Thiaméthoxame (I)
	MM _{BI}	8	7 + 1	Glyphosate+AMPA (H), Mésotrione (H), Nicosulfuron (H), S-métolachlore (H), Thiaméthoxame (I)
	MM _{TS}	13	11 + 1	Glyphosate+AMPA (H), Mésotrione (H), Métaldéhyde (M), Nicosulfuron (H), S-métolachlore (H), Thiaméthoxame (I)
	RC	13	11	Mésotrione (H), S-métolachlore (H), Thiaméthoxame (I)

Les données présentées dans le Tableau 4 et les Tableaux AC4.1, AC4.2 et AC4.3 (Annexe confidentielle AC4) permettent de faire une première comparaison des performances environnementales des systèmes de culture.

Dans les systèmes expérimentés sur le site de Dijon, les pesticides pour lesquels les concentrations mesurées dépassent la limite réglementaire de 0.1 µg/l sont l'isoproturon (système de référence S1), le glyphosate (S2), l'imazamox (S3), l'azoxystrobine et le florasulame (S4) (Annexe AC4 - Tableau AC4.1). Sur le site d'Auzeville, les concentrations en S-métolachlore dépassent la norme de 0.1 µg/l dans les 4 systèmes expérimentés (Annexe AC4 - Tableau AC4.2). La concentration en métalaxyl M dépasse également cette valeur dans le système TBI (Annexe AC4 - Tableau AC4.2). Enfin, sur le site de Lamothe, tous les pesticides détectés dans les lysimètres installés dans les quatre systèmes (MM_{Conv}, MM_{BI}, MM_{TS}, RC) dépassent 0.1 µg/l (Annexe AC4 - Tableau AC4.3).

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

A partir de ces résultats, lorsque les mêmes pesticides ont été détectés dans plusieurs parcelles et que les dates d'application et les dates de mesures sont cohérentes, les effets du type de sol sur la lixiviation des pesticides peuvent être analysés (Tableau 4).

Le S-métolachlore a été détecté aussi bien à Auzeville qu'à Lamothe, sites qui sont soumis à des climats similaires mais qui présentent des types de sol différents. Les concentrations maximales observées sont du même ordre de grandeur (Annexe AC4 - Tableaux AC4.1 et AC4.2), alors que les doses appliquées sont plus faibles sur le site d'Auzeville que sur le site de Lamothe (Annexe AC2 - Tableau AC2.1). En effet, les sols d'Auzeville contiennent moins de carbone organique que les sols de Lamothe et leurs pH sont plus alcalins, ce qui favorise la mobilité du S-métolachlore (Annexe AC1 - Tableau AC1.1) (Alletto et al., 2013). Ce résultat suggère que les sols argilo-calcaire, comme à Auzeville, sont plus susceptibles de conduire à des transferts du S-métolachlore que les sols limoneux-argileux comme ceux de Lamothe.

Concernant le nicosulfuron, contrairement à ce qui est généralement observé, les concentrations sont plus élevées dans le système MM_{BI} implanté sur un sol qui contient plus de carbone organique et d'argile que le sol sur lequel est implanté MM_{Conv} (Annexe AC1 - Tableau AC1.1) (Regitano et Koskinen, 2008 ; Azcarate et al., 2015). Cependant, ceci peut être dû à la présence de voies de transferts préférentiels, plus importantes dans le sol plus argileux de MM_{BI} que MM_{Conv}.

Enfin, pour le thiaméthoxame, bien que des quantités similaires aient été appliquées dans les systèmes MM_{Conv} et MM_{BI}, les concentrations sont trois fois plus élevées dans les eaux lixiviées du système MM_{Conv} (Annexe AC4 - Tableau AC4.3). Outre l'effet système de culture, ce résultat peut aussi s'expliquer par un contenu en sable plus important dans le sol correspondant au système MM_{Conv} que dans celui du système MM_{BI} (Annexe AC1 - Tableau AC1.1) (Moertl et al., 2016).

Tableau 5. Principales caractéristiques des pesticides et métabolite (AMPA) détectés et modélisés (PPDB, 2016, sauf indication contraire). H : herbicide, F : fongicide, I : insecticide, M : molluscicide.

Pesticide (fonction)	Masse molaire (g/mol)	Solubilité dans l'eau (mg/l)	Pression de vapeur (mPa)	Kf	Kfoc	nf	DT50 à 20°C (jours)
2,4-D (H)	221.0	24300	9.0 10 ⁻³	0.45	24	0.83	4
Azoxystrobine (F)	403.4	6.7	1.1 10 ⁻⁷	7.35	423	0.85	84
Bentazone (H)	240.3	570	1.7 10 ⁻¹	0.97	59.6	0.93	20
Boscalide (F)	343.2	4.6	7.2 10 ⁻⁴	12.6	772	0.86	246
Cyproconazole (F)	291.8	93	2.6 10 ⁻²	8.7	364	0.86	142
Dicamba (H)	221.0	250000	1.0 10 ⁻⁴	0.25	12.4	0.74	4
Florasulam (H)	359.3	6360	4.3 10 ⁻⁷	0.45	20.4	0.94	2
Flurochloridone (H)	312.1	21.9	2.7 10 ⁻¹	9.4	700	0.90	53
Glyphosate (H)	169.1	10500	1.3 10 ⁻²	226.3	16331	0.86	15
AMPA (Métabolite)	111.0	1466561	-	197.5	9664	0.81	121
Imazamox (H)	305.3	626000	1.3 10 ⁻²	0.14	11.6	0.94	200
Imidaclopride (I)	255.7	610	4.0 10 ⁻⁷	2.23	225	0.80	187
Isoproturon (H)	206.3	70.2	5.5 10 ⁻³	2.83	122	0.80	12
Mésotrione (H)	339.3	1500	5.7 10 ⁻³	0.89	83.3	0.94	20
Métaldéhyde (M)	176.2	188	6600	0.69	77	0.93	5
Métalaxyl M (F)	279.3	26000	3.3	1.63	78.9	0.95	6
Nicosulfuron (H)	410.4	7500	8.0 10 ⁻⁷	0.29	21	0.93	16
Prothioconazole (F)	344.3	300	4.0 10 ⁻⁴	44.2	2556	0.88	0.5
Quinmérac (H)	221.6	107000	1.0 10 ⁻⁷	0.59	86	0.88	17
S-métolachlore (H)	283.8	480	3.7	1.88	226.1	1.06	14
Thiaméthoxame (I)	291.7	4100	6.6 10 ⁻⁶	0.86	54.1	0.88*	121

* Thiamethoxam, Document MC-P, Section 9 (2015)

Pesticides appliqués mais non détectés

Au total, sur les trois sites, 106 pesticides différents ont été appliqués. Ainsi, si 20 pesticides différents ont été retrouvés dans les lysimètres, les 78 autres pesticides recherchés ne l'ont jamais été. Ce résultat peut s'expliquer en considérant les critères de mobilité de Mc Call (1980), la persistance des pesticides

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

(caractérisée par la DT50) et les années d'application des pesticides (Tableau 5 et Annexe AC3 – Tableau AC3.1). En effet, les pesticides à mobilité élevée à très élevée ($K_{foc} < 150$) ont également une faible persistance ($DT50 < 36$ j, Calvet et al., 2005) (sauf le méso-sulfuron-méthyl dont la vitesse de dégradation est néanmoins considérée comme moyenne : 43 j, Calvet et al., 2005) (Annexe AC3 - Tableau AC3.1). Comme ils sont très rapidement dégradés, les quantités susceptibles d'être lixiviées sont aussi très rapidement négligeables. Les autres pesticides ont une mobilité faible à très faible (Annexe AC3 - Tableau AC3.1) qui peut expliquer qu'ils ne soient pas retrouvés dans l'eau (du transport particulière est toutefois susceptible de se produire).

Une des propositions du conseil scientifique suite à la remise du rapport intermédiaire était de modéliser le devenir des pesticides appliqués mais non détectés (pour tous les systèmes) afin de vérifier si les résultats des simulations étaient cohérents avec les observations. Sur les 13 systèmes étudiés, ceci représente 298 applications de pesticides différents soit un total de 894 cas à simuler. Dans le temps imparti il n'a pas été possible de réaliser ces 894 simulations. Cependant, comme cela a été démontré lors du test de la performance des modèles (Cf B.1.2.2.2), ceux-ci simulent systématiquement des concentrations égales à zéro à 1 m de profondeur lorsque les pesticides ont une mobilité moyenne à très faible ($K_{foc} > 150$) et lorsque la DT50 est faible. Nous avons donc jugé que la modélisation des concentrations dans les eaux lixiviées à 1 m de profondeur de ces pesticides, qui représentent la quasi totalité des pesticides non détectés, peut s'avérer inutile.

Conclusion

L'analyse des résultats des mesures de concentrations en pesticides dans les sites et systèmes étudiés a montré que la majeure partie des pesticides détectés dans les eaux lixiviées sont des herbicides (ils ont par ailleurs une mobilité et une persistance élevées) et que les concentrations dépassent régulièrement le seuil réglementaire de 0.1 µg/l. Dans le cas des systèmes basés sur la rotation colza-blé-orge, c'est le système « Sans herbicide » qui permet la plus grande réduction du nombre de pesticides appliqués et détectés, donc qui présente les meilleures performances environnementales, tandis que pour les systèmes basés sur la monoculture de maïs, c'est le système « Rotation courte ». En revanche, les systèmes basés sur un travail du sol simplifié ont une plus faible performance environnementale vis-à-vis des impacts pesticides en raison de la multiplication du nombre de traitements herbicides, ce qui a tendance à augmenter les quantités de pesticides utilisées, les IFT et le nombre de pesticides susceptibles d'être retrouvés dans les eaux souterraines. Pour le système blé dur-tournesol, c'est le système « Très bas intrants avec cultures intermédiaires » qui semble avoir les meilleures performances environnementales (réduction du nombre de pesticides détectés).

B.1.2.3 Test des modèles

B.1.2.3.1 Phase 1 : Comparaison rigoureuse des modèles MACRO, PEARL et PRZM

Pour cette première phase de test, l'approche utilisée a consisté à paramétrer MACRO, PEARL et PRZM de manière rigoureusement identique et à mettre en place une phase de calage (Marín-Benito et al., 2014).

Matériels et méthodes

Paramétrage

Cette phase de test s'est basée sur le système de référence MM_{Conv} du site de Lamothe.

Les trois modèles ont été paramétrés avec toutes les données expérimentales disponibles spécifiques au site (Tableau 6). Les données manquantes ont été obtenues à partir de la littérature et de fonctions de pédo-transfert (FPT). Plusieurs FPT ont par ailleurs été testées (Rawls et al., 1982 ; HYPRES (Wösten et al., 1999) ; Rosetta (Šimůnek et al., 2008) et les FPT incluses dans MACRO). Les données climatiques proviennent d'une station météorologique située sur le site (Marín-Benito et al., 2014). Les détails du paramétrage sont disponibles dans l'article de Marín-Benito et al. (2014).

Tableau 6. Principaux paramètres d'entrée utilisés en entrée de MACRO, PEARL et PRZM pour les pesticides et le sol dans l'horizon de surface (0-10 cm) ainsi que pour les cultures. Système de référence « Monoculture de maïs irriguée » (MM_{Conv}), site de Lamothe.

Paramètre	Pesticide	
	S-métolachore	Mésotrione
Kd (l/kg)	0.80 (Alletto et al., 2013)	0.48 (Dyson et al., 2002)
DT50 (jour)	29	15.8 (Dyson et al., 2002)
Dose (g/ha) (année d'application)	1250 (2011), 1520 (2012)	152 et 150 (2012)
	Sol (0-10 cm)	
Argile - Limon - Sable (%)	32.2 - 45.2 - 22.6	
Carbone organique (%)	1.38	
pH (CaCl ₂)	6.68	
	Culture (maïs)	
Dates de semis - récolte	18 avril - 14 octobre 2011 / 6 avril - 8 octobre 2012	
Hauteur maximale (m)	2.5	
LAI (m ² /m ²)	3.29	

Evaluation de la performance des modèles

L'EF et le CRM (Cf B.1.1.4) ne peuvent être calculés que lorsqu'un grand nombre de données est disponible : ils ont donc été déterminés pour évaluer la performance des modèles à représenter le bilan hydrique, les quantités d'eau percolée et la température du sol pour lesquels nous disposons de chroniques journalières, mais pas pour les concentrations en pesticides pour lesquelles nous ne disposons que de quelques valeurs qui correspondent à des moyennes pour une période donnée (en général, plusieurs semaines).

Calage des modèles

Une phase de calage des modèles, réalisée en deux étapes, s'est avérée nécessaire car le paramétrage initial a conduit à des valeurs simulées parfois très différents des valeurs observées :

- (1) Calage de la dynamique de l'eau pour les modèles MACRO et PEARL : les paramètres hydrodynamiques issus des calculs réalisés avec les FPT et ceux qui ont le plus d'influence sur la prédiction de l'humidité du sol et sur le transfert de l'eau ont été étudiés en priorité. Les résultats ont montré que les FPT Rosetta et celles qui sont incluses dans MACRO fournissaient les meilleurs résultats (Marín-Benito et al., 2014).
- (2) Calage des paramètres relatifs au comportement de la mésotrione dans l'environnement (il n'a pas été nécessaire de caler ceux du S-métolachore) : les modèles sous-estimant la lixiviation de cet herbicide, la DT50 a dû être multipliée par deux (Dyson et al., 2002 ; Marín-Benito et al., 2014).

Résultats et discussion

Modélisation du bilan hydrique

Une étape fondamentale avant de comparer les concentrations en pesticides simulées aux concentrations observées consiste à tester la capacité des modèles à bien représenter le bilan hydrique. En effet, celui-ci va conditionner la modélisation des concentrations en pesticides.

La Figure 3 représente les teneurs en eau observées et simulées par les trois modèles et la Figure 4 montre le potentiel matriciel observé et simulé par MACRO et PEARL (PRZM étant un modèle capacitif, il ne représente pas ce potentiel).

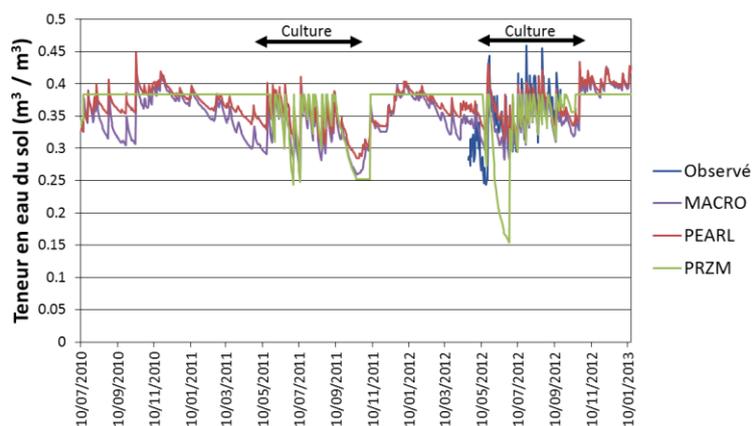


Figure 3. Teneur en eau du sol à 20 cm de profondeur, observée et simulée par MACRO, PEARL et PRZM. « Monoculture de maïs irriguée » (MM_{Conv}), site de Lamothe (Marín-Benito et al., 2014).

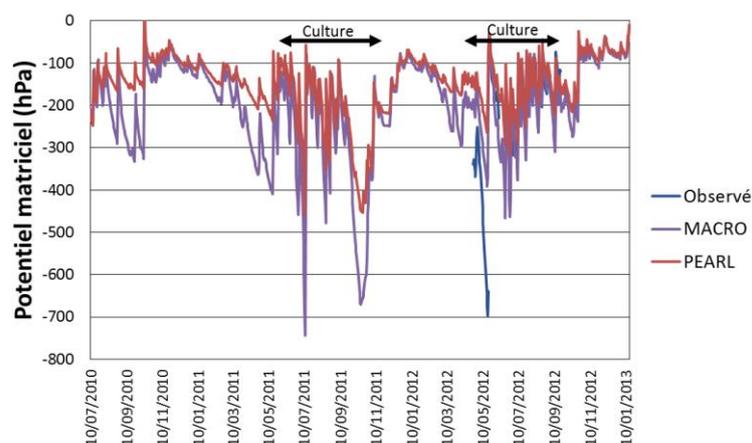


Figure 4. Potentiel matriciel à 20 cm de profondeur, observé et simulé par MACRO et PEARL. « Monoculture de maïs irriguée » (MM_{Conv}), site de Lamothe (Marín-Benito et al., 2014).

La simulation de la dynamique de l'eau est similaire pour les modèles MACRO et PEARL dans l'horizon 0-20 cm. En revanche, dans les horizons plus profonds (résultats non présentés ici), PEARL simule un degré de saturation du sol plus important que MACRO car l'évapotranspiration simulée par MACRO est supérieure à celle de PEARL (Marín-Benito et al., 2014). Pendant une saison culturale complète, les performances de MACRO et PEARL ne sont pas identiques pour les périodes correspondant à la croissance du maïs irrigué (humectation du profil) et à la période d'interculture en sol nu (dessèchement du profil). Les modèles simulent bien la dynamique hydrique en période d'humectation mais beaucoup moins bien en période d'interculture. En effet, aucun des modèles ne permet de considérer des propriétés hydrodynamiques variables au cours du temps et, notamment, différentes entre les périodes d'humectation et de dessiccation.

Inversement, PRZM ne simule pas correctement la dynamique de l'eau (Figure 3, Tableau 7) : il considère que la teneur en eau du sol reste à la capacité au champ pendant une grande partie de la période de simulation. Toutefois, en présence de la culture, PRZM reproduit les mêmes fluctuations de teneurs en eau que celles simulées par MACRO et PEARL (Figure 3).

Les valeurs d'EF et CRM obtenues (Tableau 7) montrent que la performance de MACRO et PEARL, après calage, est correcte.

Tableau 7. Efficience des modèles (EF) et coefficient de la masse résiduelle (CRM) après calage pour MACRO, PEARL et PRZM : cas de la simulation de la teneur en eau, du potentiel matriciel, des quantités d'eau percolées et de la température du sol, monoculture de maïs irriguée (MM_{Conv}) sur le site de Lamothe. Exemple à 20 cm de profondeur pour l'ensemble de la période de simulation (Marín-Benito et al., 2014).

	MACRO		PEARL		PRZM	
	EF	CRM	EF	CRM	EF	CRM
Teneur en eau	0.47	0.01	0.34	- 0.04	- 1.79	- 0.02
Potentiel matriciel	0.52	- 0.07	0.09	- 0.30	np*	np
Eau percolée	-14.07	-3.67	-13.80	-2.80	-55.09	-8.40
Température du sol	0.92	- 0.04	0.92	- 0.05	0.92	- 0.01

*np : Non pertinent

Modélisation des quantités d'eau percolées

Les lysimètres à plaque installés sur le site de Lamothe captent uniquement l'eau qui est à un potentiel matriciel supérieur à -100 cm. Ainsi, pour comparer rigoureusement les quantités d'eau simulées à celles qui sont mesurées, seules les quantités d'eau percolées simulées à un potentiel matriciel supérieur à -100 cm ont été considérées. Ce calcul est possible avec les modèles MACRO et PEARL qui sont basés sur l'équation de Richards, mais pas avec le modèle PRZM qui est un modèle capacitif (Tableau 2). Pour ce dernier, la capacité au champ a donc été considérée à pF 2, ce qui correspond à un potentiel de -100 cm.

Aucun des trois modèles n'a été capable de représenter correctement la dynamique des transferts d'eau et les quantités d'eau percolées (Figure 5, Tableau 7). D'autre part, les quantités totales percolées sont surestimées par les trois modèles (2.2 fois par MACRO, 2.5 fois par PEARL) et en particulier par PRZM (6.6 fois) car il n'est pas possible de représenter les conditions aux lysimètres avec ce modèle. L'élimination des quantités d'eau simulées à des potentiels inférieurs à -100 cm a permis d'améliorer la représentation des quantités totales percolées (elles étaient surestimées 6 fois par MACRO et 7.3 fois par PEARL lorsque les conditions de succion des lysimètres n'étaient pas prises en compte), justifiant ainsi l'hypothèse de calcul proposée.

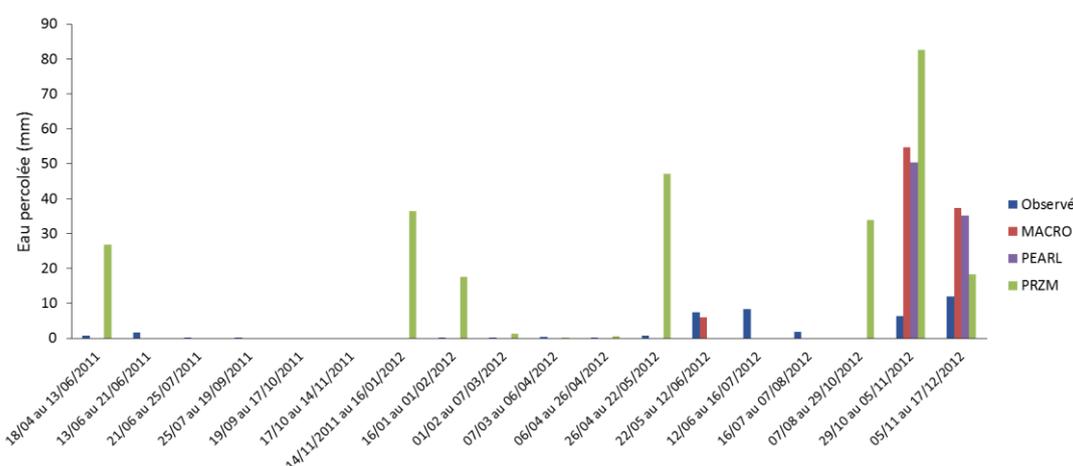


Figure 5. Quantités d'eau percolées observées et simulées par MACRO, PEARL et PRZM. « Monoculture de maïs irriguée » (MM_{Conv}), site de Lamothe (Marín-Benito et al., 2014).

Modélisation de la température du sol

La vitesse de dégradation des pesticides dans les sols dépend fortement de la température, il est donc essentiel que les modèles soient capables de reproduire correctement la température du sol observée in situ. Les résultats montrent que les trois modèles ont une performance élevée pour décrire les évolutions de la température du sol (Figure 6, Tableau 7). Toutefois, à 50 cm et à 1 m de profondeur

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

(résultats non présentés ici), PEARL simule moins bien la température que PRZM et MACRO. En effet, PEARL ne nécessite en entrée qu'une seule valeur de température en bas du profil de sol alors que PRZM est paramétré avec des valeurs mensuelles et que MACRO tient compte des variations annuelles de la température. PRZM et MACRO simulent la température à $\pm 3^{\circ}\text{C}$ par rapport aux observations et PEARL à $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Ces différences pourront jouer un rôle dans la simulation des concentrations en pesticides dans les lixiviats.

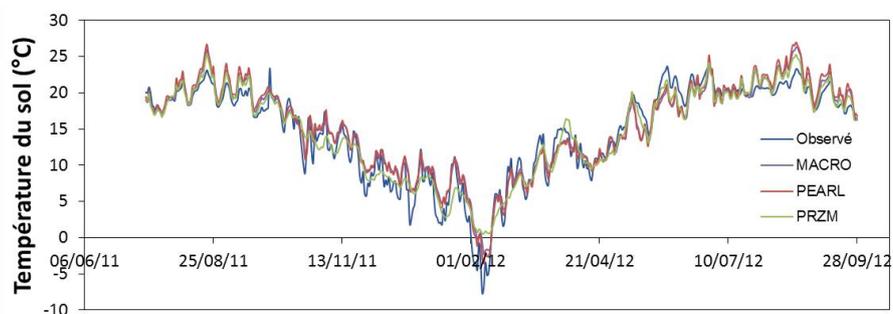


Figure 6. Température du sol observée et simulée par MACRO, PEARL et PRZM, exemple à 20 cm de profondeur. « Monoculture de maïs irriguée » (MM_{Conv}), site de Lamothe (Marín-Benito et al., 2014).

Modélisation des transferts de S-métolachlore et de mésotrione

Les observations in situ indiquent que le S-métolachlore est présent dans les lixiviats 404 jours après son application. Ensuite, la concentration diminue jusqu'à devenir égale à zéro. La mésotrione, quant à elle, est détectée 19 jours après son application à des concentrations similaires à celles du S-métolachlore bien que la dose soit dix fois inférieure (Tableau 6, Figure 7).

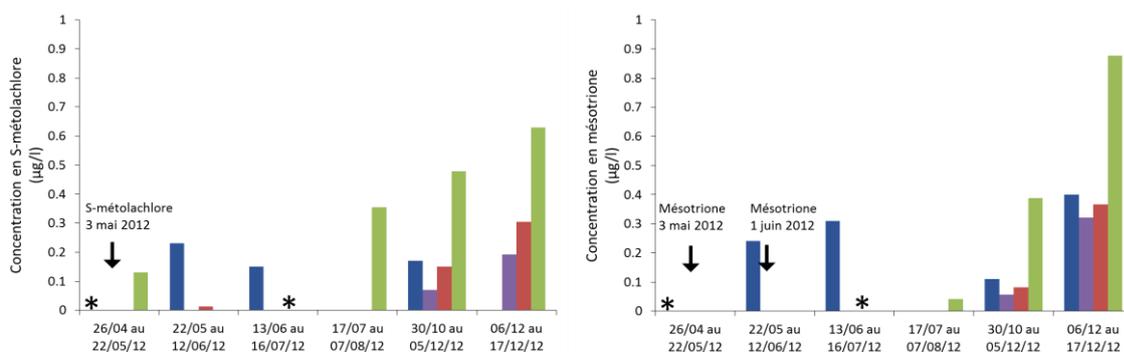


Figure 7. Concentrations moyennes en S-métolachlore et mésotrione dans les lixiviats, observées et simulées par les modèles MACRO, PEARL et PRZM. « Monoculture de maïs irriguée » (MM_{Conv}), site de Lamothe. Le symbole « ↓ » indique la date d'application de l'herbicide et le symbole « * » indique une absence de mesure (volumes d'eau dans les lysimètres trop faibles pour réaliser des analyses) (Marín-Benito et al., 2014). ■ Observations, ■ MACRO, ■ PEARL, ■ PRZM.

Aussi bien pour le S-métolachlore que pour la mésotrione, les modèles ont tendance à sous-estimer les concentrations par rapport aux données expérimentales. Toutefois, tous les modèles surestiment la concentration en S-métolachlore observée en décembre 2012 et PRZM surestime les concentrations en mésotrione observées en octobre et décembre 2012 (Figure 7). Dans tous les cas, les concentrations simulées restent du même ordre de grandeur que les observations (Marín-Benito et al., 2014). PRZM est le modèle qui prédit les concentrations en pesticides les plus élevées, probablement car il surestime les flux d'eau verticaux. Ceci est souvent observé pour les modèles capacitifs (Armstrong et al., 2000 ; Beulke et al., 2001).

Conclusion

Ces résultats montrent que les modèles sont capables de reproduire correctement la lixiviation observée des herbicides à 1 m de profondeur mais après une phase de calage de certains paramètres d'entrée. MACRO et PEARL sont les modèles les plus performants pour simuler les flux de pesticides dans les systèmes de cultures testés sur le site de Lamothe. En cas de transfert préférentiel, le choix du modèle MACRO devra toutefois être privilégié.

B.1.2.3.2. Phase 2 : Test des modèles avec un paramétrage « simplifié » et sans calage

Dans cette deuxième phase de test, les modèles ont été paramétrés en utilisant des données directement accessibles dans des bases de données (Agritox, 2016 ; PPDB, 2016), les guides d'utilisateurs et les documents guides existants (Beulke et al., 2002 ; FOCUS, 2000 ; Jarvis et al., 2007). Cette approche permet d'optimiser l'utilisation des modèles en conservant les valeurs par défaut de certains paramètres selon les recommandations des concepteurs des modèles et des documents guides. En effet, les utilisateurs des modèles disposent rarement de l'ensemble des données mesurées correspondant aux situations qu'ils veulent modéliser. Par ailleurs, lorsque les modèles sont utilisés pour évaluer les risques a priori dans des contextes nouveaux, il n'y a généralement pas de mesures disponibles.

Difficultés rencontrées

Au cours de cette deuxième phase de test, nous avons mis en évidence (dès avril 2014) un bug dans le modèle MACRO 5.2 lié à la représentation des rotations. Bien qu'il soit possible de paramétrer des successions de cultures, le modèle ne prend finalement en compte que les caractéristiques de la première culture de la série et simule donc uniquement des monocultures. Il était donc impossible de modéliser les systèmes autres que la monoculture de maïs conventionnelle expérimentée sur le site de Lamothe.

Pour résoudre ce problème, nous avons simultanément exploré trois pistes :

1. Nous avons contacté les concepteurs du modèle (Mats Larsbo, Nick Jarvis et Julien Moeys, Université d'Uppsala, Suède), partenaires du projet Perform en interaction avec ce projet (Cf Introduction). Après de multiples échanges et phases de test, une nouvelle version de MACRO a été disponible en janvier 2016.
2. Nous avons développé une méthode pour utiliser de manière séquentielle le modèle de culture STICS (Brisson et al., 1998) et MACRO. En effet, STICS permet de représenter un grand nombre de pratiques agricoles, dont les rotations.
3. Nous avons mis en place une collaboration avec Bruno Cheviron (IRSTEA, Montpellier) et Nadia Carluier (IRSTEA, Lyon) qui ont développé un outil (CEMAFOR) permettant de faire fonctionner MACRO avec des rotations (Cheviron et al., soumis). Cette option n'a finalement pas été retenue.

Au final, nous avons utilisé une nouvelle version de MACRO (version non officielle MACRO 5.3 qui remplacera à terme l'actuel MACRO 5.2) qui permet de simuler des rotations de culture variées ainsi que le modèle STICS-MACRO développé.

Description des cas testés

Dans cette phase de test des modèles, tous les systèmes pour lesquels nous disposions de mesures ont été étudiés. Nous avons par ailleurs distingué le cas du système de culture impliquant un mulch (MM_{TS} du site de Lamothe) de ceux des systèmes n'impliquant pas de mulch. En effet, les modèles MACRO, PEARL et PRZM ne comprennent pas de module « mulch », il a donc été nécessaire de développer une approche spécifique.

- Phase 2.1. Cas des systèmes sans mulch

Matériels et méthodes

Comme indiqué dans la section précédente, la première étape fondamentale dans le test de la performance des modèles à simuler les concentrations en pesticides observées consiste à tester leur capacité à reproduire le transfert d'eau. Ensuite, leur capacité à représenter les concentrations peut être évaluée.

Pour les transferts d'eau, nous disposons de 12 jeux de données : 1 pour chacun des 5 systèmes expérimentés à Dijon, 4 pour Auzeville et 3 pour Lamothe. Le nombre de jeux de données « pesticides » était, quant à lui, plus restreint (Cf ci-dessous et Annexe AC4).

Paramétrage des modèles

Les modèles ont été paramétrés de la façon suivante :

- **Sols.** La granulométrie, les teneurs en carbone organique, les densités et le pH ont été mesurés (Annexe AC1 - Tableau AC1.1). Les propriétés hydrodynamiques des sols (teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, conductivités hydrauliques, paramètres de van Genuchten) ont été estimées avec RETC (van Genuchten et al., 1991) et en se basant sur les travaux de Beulke et al. (2002) (Annexe A1 - Tableau A1.1)
- **Cultures.** MACRO et PRZM requièrent en entrée le LAI maximal (ou le taux de couverture maximal dans le cas de PRZM), la hauteur maximale du couvert et la profondeur d'enracinement maximale. Ces caractéristiques ont été extraites des documents guide FOCUS (2000) et Jarvis et al. (2007), de la littérature, de mesures et des valeurs par défaut programmées dans le modèle de culture STICS (Brisson et al., 1998) (Annexe A2 - Tableau A2.1). Dans le cas de PEARL, les LAI et les profondeurs racinaires ont été laissés par défaut. Seule la hauteur des cultures (qui n'est pas prédéfinie) a été entrée.
- **Itinéraires techniques.** Les dates de semis et récolte des cultures, l'irrigation, le travail du sol, les dates et doses d'application de pesticides ont été fournies par les responsables des trois sites (Annexes AC1 et AC2 - Tableaux AC1.2, AC1.3, AC1.4 et AC2.1).
- **Pesticides.** Les caractéristiques des pesticides sont issues de la base de données PPDB (2016) ou des dossiers Européens quand certaines données étaient manquantes (Tableau 4).
- **Interception des pesticides par la culture.** Les fractions de pesticides interceptées par les cultures, à spécifier dans MACRO et PEARL, ont été extraites de FOCUS (2000) (Annexe AC2 - Tableau AC2.1)
- **Climat.** Les données météorologiques proviennent de Climatik (INRA) dont les stations d'Époisses et d'Auzeville sont situées sur les sites correspondants. Dans le cas de Lamothe, les données climatiques ont été fournies par une station météorologique localisée sur le site. A Dijon, la température moyenne annuelle est 11.06°C et les précipitations moyennes annuelles sont égales à 756 mm. A Auzeville, elles sont respectivement égales à 13.87°C et 655 mm et à Lamothe, à 13.98°C et 627 mm.

Evaluation de la performance des modèles

Afin d'évaluer la performance des modèles, l'EF, le CRM et le RMSE (Cf B.1.1.4) ont été calculés pour le transfert d'eau, mais rarement pour les pesticides (manque de données).

Résultats et discussion

Evaluation de la performance des modèles à simuler le transfert d'eau

Les quantités totales d'eau percolées mesurées varient d'un système à l'autre pour chacun des sites : entre 195 mm (S1) et 399 mm (S2) à Dijon (période de mesure allant de novembre 2012 à mai 2014) ; 47 mm (BI) à 279 mm (BI-CI) à Auzeville (février 2013 à mai 2015) et 215 mm (MM_{conv}) à 311 mm (RC) à Lamothe (juin 2011 à octobre 2014) (Tableau 8).

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

De même que précédemment (B.1.2.2.1), les quantités d'eau simulées n'ont été prises en compte que lorsque le potentiel matriciel (ψ) est supérieur à -100 cm à Auzeville et Lamothe et supérieur à -70 cm à Dijon (la longueur de la mèche des lysimètres étant égale à 70 cm). D'une manière générale, MACRO et PEARL sous-estiment les quantités d'eau percolées, comme le montrent les valeurs de CRM positives (Tableau 9), sauf dans le cas du système BI à Auzeville où il les surestime (Tableau 8). Contrairement à ce qu'avaient observé Marín-Benito et al. (2014), cette sous-estimation des quantités d'eau percolées ne semble pas être due à une surestimation de l'évapotranspiration (Tableau 8). PRZM tend au contraire à surestimer les quantités d'eau car il n'est pas possible de prendre en compte les conditions de succion des lysimètres (Tableau 8). Par ailleurs, les modèles ne représentent pas bien la dynamique des transferts d'eau (Annexe A3 - Figures A3.1, A3.2 et A3.3).

Il est intéressant de noter que les trois modèles, pourtant différents dans leurs formalismes, conduisent à des résultats similaires dans plusieurs cas : ils sous-estiment les quantités d'eau dans les cas de S3, BI-CI, MM_{BI} et RC, ils surestiment ces quantités dans le cas du système BI et ils fournissent des résultats proches des observations dans le cas de MM_{Conv} (Tableau 8).

Tableau 8. Précipitations et irrigation totale correspondant aux périodes de mesure, quantités d'eau totales percolées observées et simulées et évapotranspirations réelles simulées (ETR) à Dijon, Auzeville et Lamothe. S1 : Système de référence ; S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert ; S3 : PI sans désherbage mécanique ; S4 : PI typique ; S5 : Sans herbicide ; BI : Bas intrants ; BI-CI : Bas intrants, culture intermédiaires ; TBI : Très bas intrants ; TBI-CI : Très bas intrants, cultures intermédiaires ; MM_{Conv} : Système de référence ; MM_{BI} : Bas intrants ; MM_{TS} : Travail du sol simplifié ; RC : Rotation courte.

Système	Observations		Simulations					
	Précipitations + Irrigation (mm)	Eau percolée (mm)	Eau percolée (mm)			ETR (mm)		
			MACRO	PEARL	PRZM	MACRO	PEARL	PRZM
Dijon								
S1	811 + 0	195	23	30	327	498	474	517
S2	1006 + 0	399	286	370	456	666	691	646
S3	462 + 40	253	161	154	133	498	461	454
S4	1245 + 0	358	89	95	547	663	742	754
S5	739 + 30	219	0	33	395	430	565	396
Auzeville								
BI	1127 + 0	47 - 54	211	181	141	980	1100	1085
BI-CI	1538.5 + 0	279 - 277	69	37	163	1391	1427	1491
TBI*	1539 + 0 / 1429.5 + 0	120 - 82	0	21	215	1088/915	1271/1085	1417/1184
TBI-CI	1127 + 0	102 - 97	0	20	152	766	937	982
Lamothe								
MM _{Conv}	1682 + 785	215	247	236	192	2175	2282	2226
MM _{BI}	1447 + 610	262	15	11	29	1825	1953	1847
RC	1397 + 275	311	73	68	50	1601	1685	1546

* Les mesures réalisées dans les 2 lysimètres à plaque ne couvrent pas les mêmes périodes.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer que les modèles sous-estiment les quantités d'eau observées : (1) les flux latéraux susceptibles d'avoir alimenté les lysimètres ne sont pas simulés par ces modèles 1D (Marín-Benito et al. 2014) ; (2) les lysimètres peuvent avoir capturé plus d'eau qu'attendu, en particulier lorsque les conditions sont très humides, ce qui a été le cas à plusieurs reprises dans les trois sites (Louie et al., 2000 ; Cattani et al., 2007) ; (3) dans le modèle MACRO, les précipitations journalières sont converties en précipitations horaires à partir d'un facteur égal à 2 mm/h, or ce facteur peut être inapproprié lors d'événements pluvieux intenses qui peuvent entraîner des flux préférentiels (McGrath et al., 2009; Moeys et al., 2012); (4) les lysimètres à plaque et à mèche vont commencer à percoler à des potentiels plus faibles qu'en drainage libre tel que simulé par MACRO où l'eau ne commence à percoler que lorsque le sol est quasiment saturé. Par conséquent les lysimètres collectent plus d'eau que ce qui est simulé par les modèles.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

Tableau 9. Indices statistiques permettant d'évaluer la performance de MACRO, PEARL et PRZM à simuler la percolation observée de l'eau dans les différents systèmes de culture expérimentés à Dijon, Lamothe et Auzeville : efficacité (EF), coefficient de la masse résiduelle (CRM) et erreur quadratique moyenne (RMSE). S1 : Système de référence ; S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert ; S3 : PI sans désherbage mécanique ; S4 : PI typique ; S5 : Sans herbicide ; BI : Bas intrants ; BI-CI : Bas intrants, culture intermédiaires ; TBI : Très bas intrants ; TBI-CI : Très bas intrants, cultures intermédiaires ; MM_{Conv} : Système de référence ; MM_{BI} : Bas intrants ; RC : Rotation courte.

Site	Système	Indice statistique	MACRO	PEARL	PRZM	
Dijon	S1	EF	-0.55	-0.56	-4.05	
		CRM	0.88	0.85	-0.68	
		RMSE	182	183	329	
	S2	EF	-0.74	-1.48	-2.67	
		CRM	0.28	0.07	-0.14	
		RMSE	163	195	237	
	S3	EF	0.06	0.02	0.052	
		CRM	0.36	0.39	0.48	
		RMSE	116	118	116	
	S4	EF	-0.75	-0.68	-3.83	
		CRM	0.75	0.73	-0.53	
		RMSE	142	139	235	
	S5	EF	nd	-0.37	-1.01	
		CRM	nd	0.85	-0.80	
		RMSE	nd	181	219	
Auzeville*	BI	EF	-23.4 / -19.2	-10.6 / -8.9	-10.9 / -8.6	
		CRM	-3.45 / -2.93	-2.82 / -2.37	-1.98 / -1.62	
		RMSE	534 / 467	369 / 328	374 / 323	
	BI-CI	EF	-5.82 / -5.83	-5.91 / -5.89	-2.29 / -2.14	
		CRM	0.75 / 0.75	0.87 / 0.87	0.32 / 0.32	
		RMSE	84 / 89	85 / 89	58 / 60	
	TBI	EF	nd	-0.73 / -0.35	-1.58 / -4.01	
		CRM	nd	0.83 / 0.74	-0.79 / -1.63	
		RMSE	nd	157 / 161	192 / 314	
	TBI-CI	EF	nd	-0.63 / -0.16	-4.50 / -1.16	
		CRM	nd	0.80 / 0.79	-0.49 / -0.57	
		RMSE	nd	130 / 126	240 / 171	
	Lamothe	MM _{Conv}	EF	-2.27	-2.23	-4.03
			CRM	-0.15	-0.09	0.11
			RMSE	208	207	258
		MM _{BI}	EF	-0.55	-0.59	-0.66
			CRM	0.94	0.96	0.89
			RMSE	165	168	171
RC		EF	-0.51	-0.79	-0.46	
		CRM	0.76	0.78	0.83	
		RMSE	140	153	137	

nd : non déterminé (pas de percolation de l'eau simulée à 1 m de profondeur)

* Dans le cas du site d'Auzeville, deux lysimètres à plaque ayant été installés dans chaque système, les indices statistiques ont été calculés distinctement pour chacune des plaques : Plaque 1 / Plaque 2.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

Le calcul des indices statistiques a montré que la performance des trois modèles, utilisés sans calage, est faible ($EF < 0$, $CRM \neq 0$ et $RMSE > 100$ dans la plupart des cas) et en particulier à Auzeville (Tableau 8). Les meilleurs résultats sont obtenus dans le cas du site de Dijon (Tableau 9), mais ils restent cependant peu satisfaisants. MACRO et PEARL présentent les meilleures performances, le modèle PRZM étant systématiquement le moins bon des trois modèles. En effet, dans PRZM, la description du transfert d'eau est basée sur une approche capacitive alors que MACRO et PEARL sont basés sur l'équation de Richards (Tableau 2). Ces résultats rejoignent ceux de Marín-Benito et al. (2014) (Cf B.1.2.2.1)

Cependant, il faut souligner que (1) les modèles ont été utilisés sans calage, (2) les données mesurées sont entachées d'incertitudes (Cf ci-dessus), (3) nous avons fait l'hypothèse de ne retenir que les valeurs simulées correspondant à certains potentiels matriciels.

Afin de tester la validité de cette troisième hypothèse, les calculs des indices statistiques ont aussi été réalisés en considérant les quantités totales d'eau percolée sans sélection des données correspondant à un certain potentiel matriciel. Les quantités d'eau correspondantes et les indices statistiques sont présentés dans les Annexes A3 et A4 (Tableaux A3.1 et A4.1). Pour le site de Dijon, les indices statistiques sont meilleurs lorsque les teneurs en eau correspondant à $\psi > -70$ cm sont uniquement prises en compte (Annexe A4 - Tableau A4.1). A Auzeville, ils sont meilleurs pour MACRO en considérant la totalité des valeurs (sauf pour BI) mais dans le cas de PEARL, les résultats sont plus satisfaisants en sélectionnant les données (Annexe A4 - Tableau A4.1). Enfin, à Lamothe, les résultats semblent meilleurs lorsque la totalité des quantités d'eau simulées est considérée (Annexe A4 - Tableau A4.1). Cependant, pour ce dernier site, il faut souligner que même dans ce cas, les quantités simulées restent très inférieures aux quantités observées pour MM_{BI} et RC (Annexe A3 - Tableau A3.1).

Ainsi, en considérant ces résultats et sachant qu'il est plus rigoureux de ne prendre en compte les quantités d'eau percolées que lorsqu'elles correspondent à un certain potentiel matriciel, nous avons conservé cette hypothèse pour le calcul des concentrations en pesticides.

Evaluation de la performance des modèles à simuler les concentrations en pesticides

Les résultats d'analyse de concentrations en pesticides sont très hétérogènes en raison des aléas climatiques (Cf B.1.1.3). Au final, il y a très peu de chroniques de concentrations suffisamment conséquentes bien que les suivis aient été réalisés pendant plusieurs années. Ainsi, seules les 3 chroniques les plus complètes (2 à Dijon et 1 à Lamothe) sont représentées graphiquement dans les Figures 8 et 9. Les autres résultats sont synthétisés dans les tableaux présentés en Annexe AC4.

Dans le cas du site de Dijon, les trois modèles sous-estiment les concentrations observées présentées dans le Tableau AC4.1 (Annexe AC4). Ces pesticides ont soit des K_{foc} élevés (azoxystrobine, boscalide, cyproconazole, glyphosate) ce qui laisse supposer un transport particulaire non décrit par les modèles, soit des DT_{50} faibles (florasulame, isoproturon, quinmérac) qui entraînent une dégradation rapide donc des quantités de pesticides susceptibles d'être entraînées vers les eaux souterraines très rapidement négligeables (Tableau 5). En effet, comme l'illustre le cas de la bentazone dans la Figure 9, les modèles ne sont pas capables de représenter le transfert d'un pesticide juste après son application : la bentazone a été appliquée le 1^{er} juillet 2013 et le pic de concentration observé avant le 25 juillet, consécutif à un épisode pluvieux intense, n'a pas été reproduit. La faible performance des modèles à représenter des concentrations en pesticides peu de temps après leur application a par ailleurs été fréquemment démontrée (par exemple, Brown et al., 2004 ; Marín-Benito et al., 2014). Ce résultat explique que le transfert vertical des pesticides peu persistants n'est généralement pas simulé. Pour la bentazone, MACRO simule des concentrations du même ordre de grandeur que les observations (sauf pour les pics de concentrations observés), alors que PEARL surestime les concentrations et PRZM les sous-estime (Figure 8). Enfin, concernant l'imazamox, tous les modèles surestiment les concentrations (Figure 8).

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

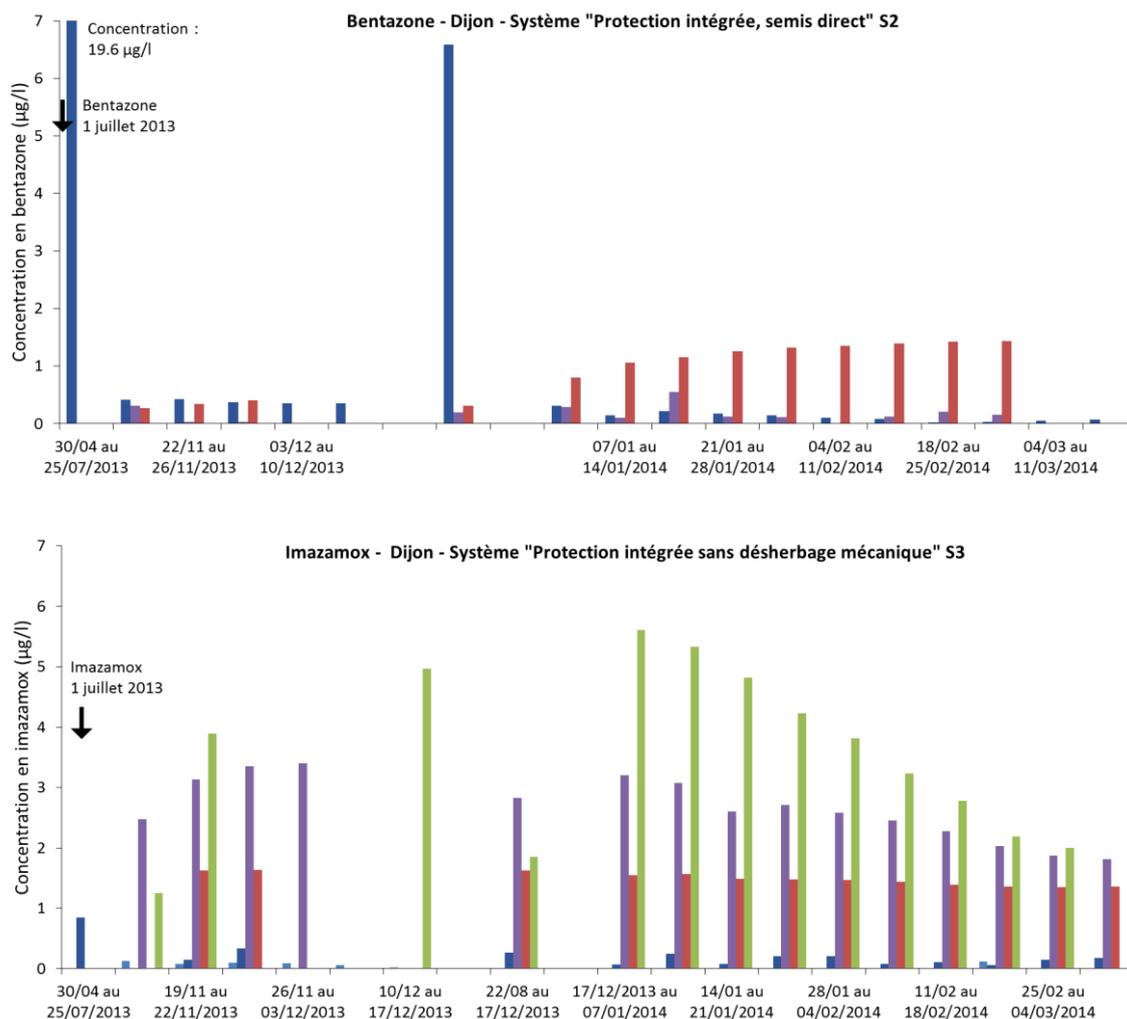


Figure 8. Concentrations en bentazone et imazamox dans les systèmes « Protection intégrée, semis direct » (S2) et « Protection intégrée sans désherbage mécanique » (S3) expérimentés à Dijon, basés sur une rotation « colza-blé-orge ». Le symbole « ↓ » indique la date d'application de l'herbicide. ■ Observations, ■ MACRO, ■ PEARL, ■ PRZM.

Sur le site d'Auzeville, le plus souvent, une seule mesure de concentration était disponible par pesticide (Annexe AC4 - Tableau AC4.2), il n'a donc pas été possible de calculer les indices statistiques et une représentation graphique des résultats n'était pas non plus pertinente. D'une manière générale, les trois modèles sous-estiment fortement les concentrations observées (Annexe AC4 - Tableau AC4.2), en majeure partie parce qu'ils ne simulent pas correctement la dynamique de l'eau (Cf ci-dessus).

Enfin, sur le site de Lamothe, les modèles ont aussi tendance à sous-estimer les concentrations, sauf dans certains cas : par exemple, MACRO et PEARL pour le thiaméthoxame appliqué dans MM_{Conv}, PRZM pour le nicosulfuron appliqué dans MM_{Conv}, ou encore MACRO pour la mésotrione appliquée dans RC (Annexe AC4 - Tableau AC4.3). Par ailleurs, la Figure 9 montre que MACRO et PEARL sous-estiment les concentrations en mésotrione dans le système MM_{Conv}, tandis que PRZM simule ponctuellement des concentrations très élevées. Ces résultats confirment que, sans calage, les modèles ont une moins bonne performance que celle obtenue qui avait été obtenue par Marín-Benito et al. (2014) après une phase de calage.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

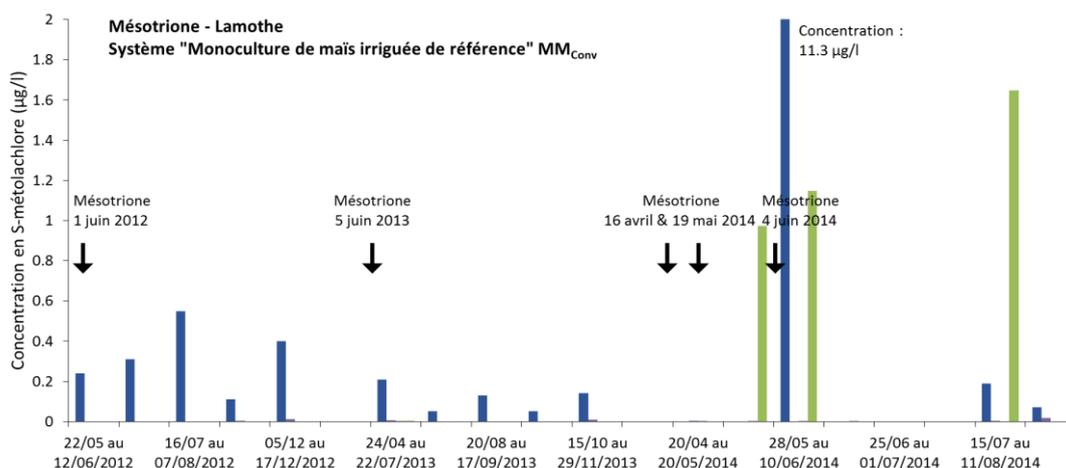


Figure 9. Concentrations en mésotrione dans le système de référence « Monoculture de maïs irriguée » (MM_{Conv}) expérimenté à Lamothe. Le symbole « ↓ » indique la date d'application de l'herbicide. ■ Observations, ■ MACRO, ■ PEARL, ■ PRZM.

Malgré le faible nombre de mesure exploitables, les indices statistiques ont été calculés pour certains pesticides. Les valeurs obtenues montrent une faible performance des modèles (Tableau 10).

Tableau 10. Indices statistiques permettant d'évaluer la performance de MACRO, PEARL et PRZM à simuler les concentrations observées en pesticides dans les systèmes de culture S1 : Système de référence ; S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert et S3 : PI sans désherbage mécanique, expérimentés sur le site de Dijon et conventionnel MM_{Conv} expérimenté sur le site de Lamothe. EF : efficacité, CRM : coefficient de la masse résiduelle, RMSE : erreur quadratique moyenne.

Site	Système	Pesticide	Indice statistique	MACRO	PEARL	PRZM
Dijon						
S1		Isoproturon	EF	-8.08	-7.79	-8.08
			CRM	1.00	0.98	1.00
			RMSE	106	104	106
S2		Bentazone	EF	-0.12	-0.14	-0.13
			CRM	0.92	0.57	0.99
			RMSE	298	301	298
S3		Imazamox	EF	-152	-43	-283
			CRM	-10.3	-5.46	-12.3
			RMSE	1127	607	1534
Lamothe						
MM_{Conv}		S-métolachlore	EF	-0.21	-0.21	-0.01
			CRM	0.99	0.99	0.85
			RMSE	239	239	219
		Mésotrione	EF	-0.09	-0.09	0.09
			CRM	0.99	0.99	0.72
			RMSE	350	350	319
		Nicosulfuron	EF	-0.43	-0.44	-3.40
			CRM	0.99	0.99	-0.14
			RMSE	181	181	318

Dans l'ensemble, les modèles ne décrivent pas bien la dynamique observée des concentrations et ils ont tendance à sous-estimer les concentrations des pesticides peu mobiles ou peu persistants (Figures 8 et 9, Tableau 4, Annexe AC4 - Tableaux AC4.1, AC4.2 et AC4.3). Inversement, ils tendent à surestimer les concentrations en pesticides très mobiles et persistants tels que l'imazamox, comme le montrent les valeurs négatives des CRM (Figure 8, Tableau 10). Ils simulent par ailleurs des concentrations systématiquement égales à 0 pour les pesticides ayant des $K_{foc} > 150$ (i.e. azoxystrobine, glyphosate, prothiconazole...) car ceux-ci sont majoritairement sujets au transport particulaire qui n'est pas représenté dans les modèles (Tableau 4, Annexe AC4 - Tableaux AC4.1, AC4.2 et AC4.3). Sans calage, ces modèles sont probablement plus adaptés pour estimer des concentrations moyennes sur des pas de temps longs que pour estimer des concentrations sur des pas de temps courts. Ce résultat a été également observé par Lammoglia et al. (2016a).

Au regard des résultats obtenus pour l'eau et les pesticides, MACRO est plus performant que les autres modèles dans un plus grand nombre de cas, suivi de PEARL et enfin de PRZM.

Conclusion

Lorsque les modèles sont utilisés dans l'objectif de réaliser une évaluation des risques a priori, des données mesurées (rétention et dégradation des pesticides dans les sols testés, propriétés hydrodynamiques des sols, caractéristiques des cultures...) ne sont généralement pas disponibles. Ainsi, l'objectif de cette phase de test a consisté à évaluer la performance des trois modèles sans calage et en utilisant les documents guides existants, dans le cas des systèmes sans mulch. Les résultats ont montré que la performance de MACRO, PEARL et PRZM à représenter le transfert d'eau et les concentrations en pesticides était généralement faible. Toutefois, MACRO et PEARL apparaissent comme étant les modèles les plus performants. Pour améliorer leur performance, il faudrait donc procéder à une phase de calage, focalisée en particulier sur les paramètres impliqués dans la description des transferts hydriques (teneurs en eau, propriétés hydrodynamiques des sols) (Dubus et al., 2003). Une autre possibilité consiste à améliorer la représentation des cultures dans les modèles, simplement décrites par le LAI, la profondeur d'enracinement et la hauteur, mais aussi des pratiques agricoles. En effet, elles sont susceptibles de jouer un rôle important dans la simulation du bilan hydrique (via notamment l'évapotranspiration). Cet aspect est abordé dans la section B.1.2.2.3. La section suivante (Phase 2.2) expose la méthode que nous avons développée pour représenter le mulch dans les modèles « pesticides » et la performance des modèles lorsque cette méthode est utilisée.

- Phase 2.2. Cas des systèmes avec mulch

Parmi les 11 systèmes innovants étudiés dans ce travail, le système « Travail simplifié du sol » (MM_{TS}) expérimenté sur le site de Lamothe induit la présence d'un mulch à la surface du sol. Cependant, MACRO, PEARL et PRZM ne disposant de module décrivant un mulch, il a été nécessaire de développer une méthode spécifique pour qu'il soit pris en compte dans ces modèles.

Les résultats obtenus précédemment ont montré que MACRO était le modèle le plus performant pour décrire les transferts d'eau et de pesticides dans les sols. Ce modèle a donc été retenu pour développer une approche permettant de décrire le mulch ainsi que ses effets sur le bilan hydrique et les transferts de pesticides.

Matériels et méthodes

Le système MM_{TS} est basé sur une monoculture de maïs et des cultures intermédiaires (Tableau 1). Les résidus de maïs sont laissés à la surface du sol après récolte du maïs et ceux des cultures intermédiaires après destruction de ces cultures. Six pesticides ont été détectés dans les lysimètres implantés dans ce système : S-métolachlore, mésotrione, glyphosate (et AMPA), métaldéhyde, nicosulfuron et thiaméthoxame (Tableau 4). Ce travail s'est focalisé sur le S-métolachlore pour lequel la série de données était la plus complète.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

Pour représenter le mulch dans MACRO, un horizon de sol fictif de 5 cm d'épaisseur contenant 43% de carbone organique a été défini (Cassigneul et al., 2016). Les valeurs des paramètres caractérisant les propriétés hydrodynamiques de cet horizon ont ensuite été obtenues à partir de Wösten et al. (1999). La DT50 et le Koc du S-métolachlore dans le mulch ont été caractérisés au laboratoire.

Puis, pour modéliser les effets du mulch sur le bilan hydrique, nous avons dû procéder au calage de l'ETP. L'effet d'un mulch sur la dynamique de l'eau étant principalement contrôlé par l'ETP (Findeling et al., 2007), l'ETP correspondante, ETP_{Mulch} , a été estimée à partir de l'ETP de référence ETP_0 et d'un facteur correctif, km, selon l'équation suivante (avec kc : facteur cultural) (Marín-Benito et al., en préparation) :

$$ETP_{Mulch} = (ETP_0 \times kc) \times km$$

Les valeurs de kc ont été extraites de FOCUS (2000). Les valeurs de km, quant à elles, ont été déterminées en calant les volumes d'eau percolés simulés sur les volumes mesurés. L' ETP_{Mulch} ainsi calculée a ensuite été utilisée en entrée dans le fichier climatique de MACRO.

Résultats et discussion

Comme indiqué précédemment, la première étape dans le test du modèle consiste à vérifier que le modèle simule correctement le bilan hydrique.

Le calage de l'ETP, en introduisant le facteur km, a permis une forte amélioration de la représentation des volumes d'eau percolée par MACRO (Figure 10). Plusieurs valeurs de km ont dû être déterminées car de nombreux facteurs peuvent modifier les effets du mulch sur l'ETP : stade de développement de la culture, saison, quantité de mulch, degré de décomposition du mulch, irrigation (Lascano et Baumhardt, 1996 ; Abu-Awwad, 1999 ; Chen et al., 2007 ; Li et al., 2008 ; Alletto et al., 2011).

En présence du mulch et de la culture, $km < 1$ ce qui implique une diminution de l'ETP, comme cela a été fréquemment observé (Huang et al., 2005 ; Khaledian et al., 2012 ; Sun et al., 2012). Quatre valeurs de km différentes ont dû être ensuite définies en 2011 et en 2012 pendant la période de culture du maïs afin de tenir compte de la décomposition du mulch et des différents taux de couverture de la surface du sol par le mulch, différents en 2011 (25 à 35%) et 2012 (50%) (Figure 11). Pendant les deux premiers cycles de cultures intermédiaires, il n'a pas été nécessaire de corriger l'ETP, notamment parce qu'elle tend à être faible en hiver. En revanche, la valeur élevée de km pendant la période de cultures intermédiaires fin 2012 peut s'expliquer par une irrigation et des précipitations plus élevées à cette période que fin 2011. Au total, l'introduction du facteur correctif km (donc la présence d'un mulch) a entraîné une réduction globale de l'ETP de 18.5% par rapport à l' ETP_0 de référence.

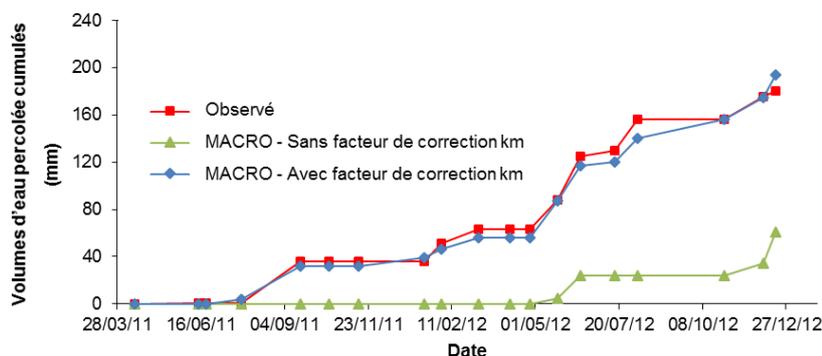


Figure 10. Volumes d'eau percolée cumulés en fonction du temps, observés et simulés avec MACRO dans le système « Travail du sol simplifié » MM_{TS} du site de Lamothe (Marín-Benito et al., en préparation)

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

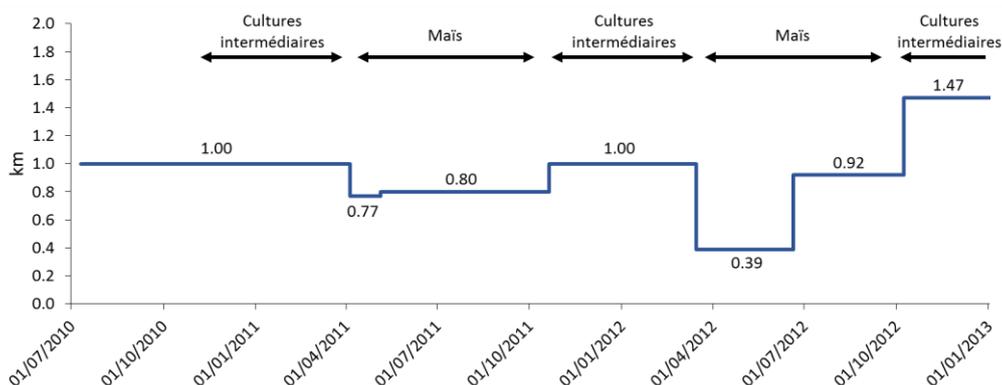


Figure 11. Evolution de la valeur du facteur de correction km en fonction des différentes périodes de culture dans le système « Travail du sol simplifié » MM_{TS} du site de Lamothe (Marín-Benito et al., en préparation).

Après calage de l'ETP, MACRO simule correctement les quantités d'eau percolées (Figure 10) : EF = 0.83, CRM = 0.05 et r = 0.91. En revanche, sans calage de l'ETP, le modèle sous-estime très fortement les quantités d'eau (Figure 10) (Marín-Benito et al., en préparation).

Concernant le S-métolachlore, d'une manière générale, le modèle MACRO représente correctement les concentrations observées (Tableau 11) : EF = 0.62, CRM = -0.20 et r = 0.82. La valeur négative du CRM montre que MACRO a tendance à surestimer les concentrations, mais ce résultat est surtout dû à la surestimation de la concentration observée en décembre 2012 (Tableau 11). Il faut par ailleurs souligner que les concentrations observées sont supérieures au seuil réglementaire de 0.1 µg/l jusqu'au 6 décembre 2012 soit plus de 6 mois après l'application de l'herbicide (Marín-Benito et al., en préparation).

Tableau 11. Concentrations en S-métolachlore observées et simulées par MACRO dans le système « Travail du sol simplifié » MM_{TS} du site de Lamothe (Marín-Benito et al., en préparation)

Date	Concentration moyenne (µg L ⁻¹)	
	Observé	MACRO
26/04 au 22/05/2012	7.10	5.14
23/05 au 12/06/2012	5.20	6.48
13/06 au 16/07/2012	2.30	4.80
30/10 au 05/12/2012	0.64	0.37
06/12 au 17/12/2012	0.08	1.52

Conclusion

Les résultats obtenus montrent que, dans les modèles « pesticides » tels que MACRO, le mulch peut être assimilé à un horizon de sol contenant une teneur en carbone organique fonction de la nature du mulch et ayant des propriétés particulières, et que l'introduction d'un facteur correctif de l'ETP pour tenir compte de l'effet du mulch sur le bilan hydrique est une méthode efficace pour modéliser les flux de pesticides dans les systèmes de culture basés sur un travail du sol simplifié.

Cette approche doit maintenant être appliquée aux autres pesticides détectés dans les lysimètres implantés dans ce système : mésotrione, glyphosate (et AMPA), métaldéhyde, nicosulfuron et thiaméthoxame.

Enfin, il faut aussi signaler que nous avons mis en place une collaboration avec les concepteurs du modèle PEARL afin qu'ils développent un module « mulch » dans ce modèle, mais celui-ci n'était pas encore disponible au moment de la rédaction de ce rapport.

B.1.2.3.3 Phase 3 : Utilisation séquentielle d'un modèle de culture STICS et du modèle pesticides MACRO

Les modèles MACRO, PEARL et PRZM ne permettent pas de décrire des pratiques agricoles complexes et, dans MACRO et PRZM, la plante est simplement représentée par sa hauteur maximale, son LAI maximum et sa profondeur d'enracinement maximale. Par ailleurs, il existe des modèles de culture qui sont des outils performants pour représenter la diversité de ces pratiques agricoles et la croissance des cultures. Ainsi, l'utilisation séquentielle d'un modèle de culture et d'un modèle « pesticides » nous a semblé être une approche pertinente pour modéliser les flux de pesticides dans les systèmes de culture. Ce travail a été réalisé en partie dans le cadre du projet Perform (Cf Introduction).

Matériels et méthodes

Parmi les modèles de culture existants, STICS (Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standard) (Brisson et al., 2008) est un modèle générique et modulaire qui simule la croissance et le développement d'un grand nombre de cultures (blé, maïs, orge, soja, sorgho...) sous l'effet de différentes pratiques agricoles telles que des rotations de cultures, des cultures associées, des apports de résidus organiques, le travail du sol, la fertilisation... STICS a été largement testé en Europe dans différentes conditions pédoclimatiques et il a démontré sa capacité à prédire sans calage les performances agronomiques d'un grand nombre de systèmes de cultures, dans des conditions agro-pédoclimatiques variées (Coucheney et al., 2015).

Ainsi, nous avons développé une nouvelle approche de modélisation basée sur une utilisation séquentielle de STICS (notamment pour estimer les variables décrivant le développement des cultures) et du modèle MACRO (forcé avec des variables « culture » provenant de STICS). Nous avons ensuite testé la performance du modèle résultant, STICS-MACRO à partir des cas suivants (jeux de données les plus complets au moment de ce travail) :

- Site de Lamothe - Système MM_{Conv} : S-métolachlore (herbicide du maïs)
- Site de Dijon - Système S3 : Imazamox (herbicide du soja).

Les caractéristiques des sols, des pesticides (propriétés physico-chimiques, doses, dates d'application), des cultures, etc. sont présentées dans les Tableau 4, et Tableaux AC1.1, AC1.2, AC1.3 et AC1.4 en annexe.

Résultats et discussion

Dans un premier temps, la capacité de STICS-MACRO à reproduire les rendements des cultures (blé, maïs, orge, colza et soja) observés sur ces sites a été testée. Les résultats ont montré que les rendements simulés par STICS-MACRO sont très proches des rendements mesurés (Figure 12).

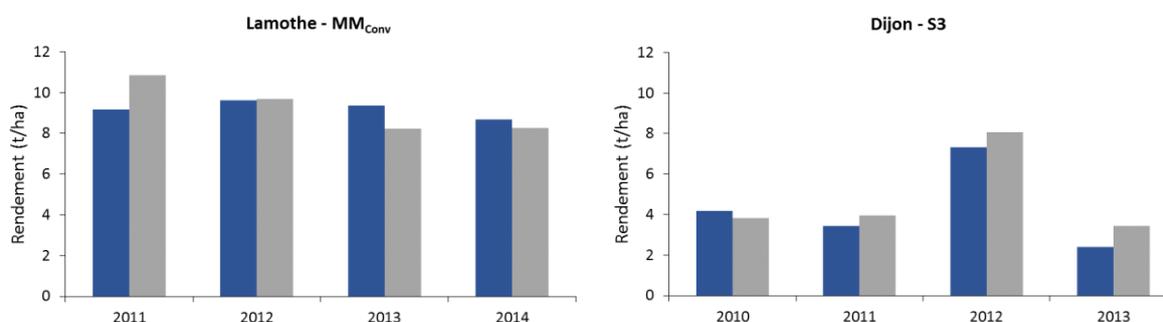


Figure 12. Rendements en maïs (Lamothe, « Monoculture de maïs irriguée » MM_{Conv}) et en orge, blé, colza et soja (Dijon, « Protection intégrée sans désherbage mécanique » S3) observés (■) et simulés (■) par STICS-MACRO (Lammoglia et al., 2016a)

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

Dans un second temps, la performance de STICS-MACRO à représenter les quantités d'eau percolées (Figure 13, Tableau 12) et les concentrations en S-métolachlore et imazamox dans les eaux percolées (Figure 14, Tableau 12) a été étudiée.

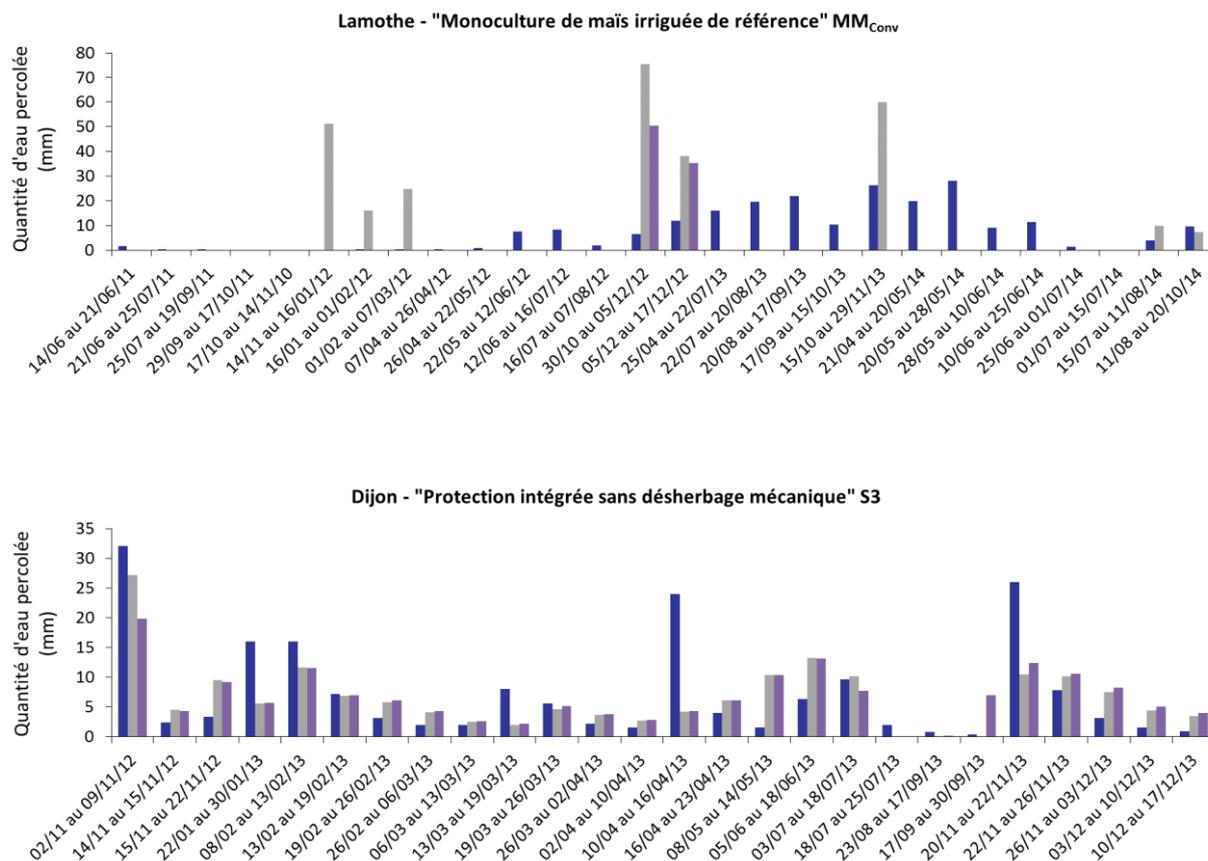


Figure 13. Quantités d'eau percolée à Lamothe (« Monoculture de maïs irriguée » MM_{Conv}) et à Dijon (« Protection intégrée sans désherbage mécanique » S3) observées (■) et simulées (■) par STICS-MACRO et par MACRO (■) (Lammoglia et al., 2016a)

De façon générale, STICS-MACRO, utilisé sans calage, reproduit aussi bien, voire mieux, les flux d'eau et de pesticides que le modèle MACRO qui a été calé (Figures 13 et 14, Tableau 12). Les résultats suggèrent toutefois que les performances de STICS-MACRO sont améliorées lorsque les flux d'eau et de pesticides sont cumulés sur de longues périodes (plusieurs mois plutôt que plusieurs jours) (Figure 14).

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

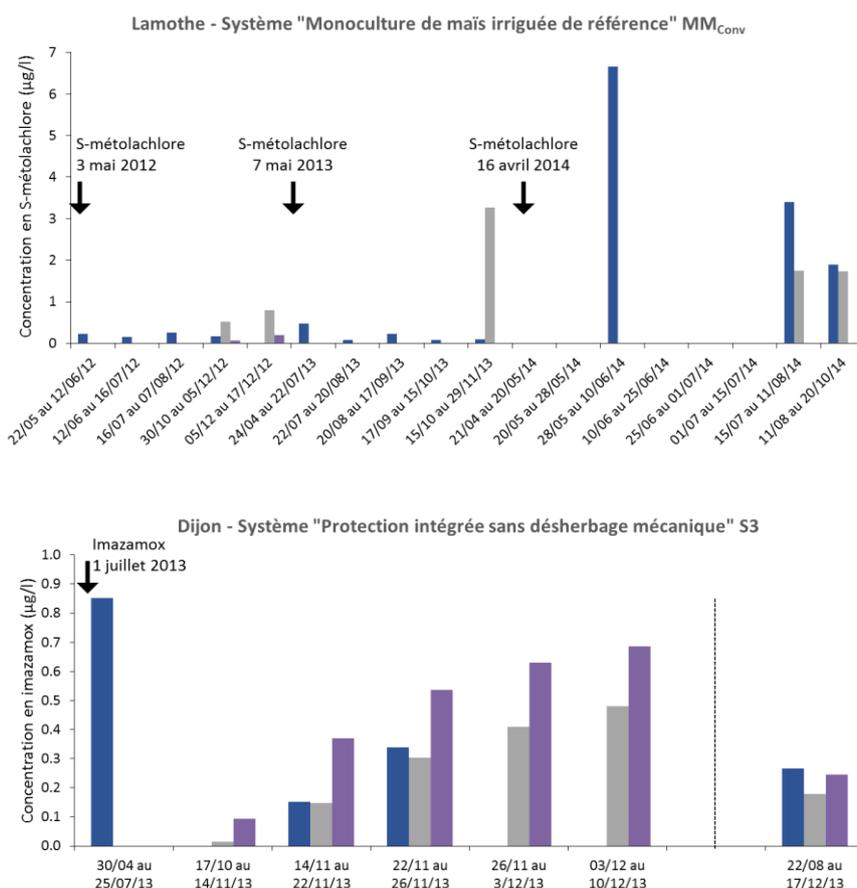


Figure 14. Concentrations en S-métolachlore (mesurées sur le site de Lamothe, « Monoculture de maïs conventionnelle » MM_{Conv}) et en imazamox (mesurées sur le site de Dijon, « Protection intégrée sans désherbage mécanique » S3) observées (■) et simulées (■) par STICS-MACRO et par MACRO (■) (Lammoglia et al., 2016a). Le symbole « ↓ » indique la date d'application de l'herbicide.

Tableau 12. Indices statistiques permettant d'évaluer la performance de STICS-MACRO et MACRO à simuler le transfert d'eau et les concentrations observées en pesticides dans le système de culture S3 « Protection intégrée sans désherbage mécanique » S3 expérimenté à Dijon et le système de référence « Monoculture de maïs irriguée » MM_{Conv} expérimenté à Lamothe. EF : efficacité, r : coefficient de corrélation, RMSE : erreur quadratique moyenne.

	Dijon (S3)		Lamothe (MM _{Conv})	
	STICS-MACRO	MACRO	STICS-MACRO	MACRO
Transfert de l'eau				
EF	0.42	0.35	-5.22	-1.9
r	0.66	0.61	0.09	0.03
RMSE (%)	87	92	279	191
Transfert des pesticides				
EF	-1.00	-1.19	-0.18	-0.21
r	-0.52	-0.58	0.13	-0.14
RMSE (%)	175	214	236	>1000

Les résultats obtenus avec STICS-MACRO sont différents de ceux de MACRO car la croissance des plantes est mieux simulée par STICS-MACRO que par MACRO. D'une part, cela influence le bilan hydrique à travers l'évapotranspiration des cultures, d'autre part, le bilan de soluté est influencé par l'interception des pesticides par le couvert végétal. Ces résultats ont également montré que la performance de STICS-MACRO dépend des conditions agro-pédoclimatiques (la performance de STICS-MACRO est plus élevée dans le cas du site de Dijon que dans celui de Lamothe). Dans le futur, STICS-MACRO pourrait être utilisé pour modéliser les flux de pesticides dans les systèmes de culture complexes car il intègre un grand nombre de pratiques agricoles qui ne peuvent pas être décrites dans des modèles comme MACRO, PEARL ou PRZM. Il permet, en outre, d'accéder à d'autres sorties d'intérêt environnemental (dynamique des composés azotés) et agronomique (rendements).

B.1.2.3.4 Phase 4 : Modélisation des transferts d'eau et de pesticides avec Hydrus 2D

Les premiers résultats obtenus avec MACRO, PEARL et PRZM montraient une faible performance de ces modèles en 1D pour décrire les flux d'eau et de pesticides observés sur le site Dijon. Un travail de post-doctorat sous financement de la Région Bourgogne a permis d'utiliser Hydrus 2D afin de déterminer si un modèle 2D permettait d'améliorer la représentation des observations. Les résultats sont en cours d'exploitation, une publication est également en cours de rédaction (Dairon et al., en préparation).

Conclusion de la Tâche 1

L'analyse des résultats de mesure des concentrations en pesticides dans les eaux lixiviées prélevées dans les sites et systèmes étudiés a montré que la majeure partie des pesticides détectés sont des herbicides (ils ont par ailleurs une mobilité et une persistance élevées) et que les concentrations dépassent régulièrement le seuil réglementaire de 0.1 µg/l. Dans le cas des systèmes basés sur la rotation colza-blé-orge, c'est le système « Sans herbicide » qui présente les meilleures performances environnementales (nombre de pesticides détectés dans l'eau lixiviée faible), tandis que pour les systèmes basés sur la monoculture de maïs, c'est le système « Rotation courte » qui permet de minimiser les impacts des pesticides sur l'environnement. En revanche, les systèmes basés sur un travail du sol simplifié ont une plus faible performance environnementale en raison de la multiplication du nombre de traitements herbicides, ce qui a tendance à augmenter les quantités de pesticides utilisées, les IFT et le nombre de pesticides susceptibles d'être retrouvés dans les eaux souterraines. Pour le système blé dur-tournesol, c'est le système « Très bas intrants avec cultures intermédiaires » qui semble avoir les meilleures performances environnementales (réduction du nombre de pesticides détectés).

Dans l'ensemble, MACRO, PEARL et PRZM ne décrivent pas bien la dynamique observée des quantités d'eau percolée et des concentrations et ils ont tendance à sous-estimer les concentrations des pesticides peu mobiles ou peu persistants. Inversement, ils tendent à surestimer les concentrations en pesticides très mobiles et persistants. Ils ne sont par ailleurs pas capables de représenter les concentrations observées des pesticides très peu mobiles, car le transport particulaire n'est pas représenté dans ces modèles. Au final, MACRO s'avère être le modèle le plus performant, suivi de PEARL puis de PRZM. Cependant, ces modèles sont probablement plus adaptés pour estimer des concentrations moyennes sur des pas de temps longs que pour estimer des concentrations sur des pas de temps courts et, de plus, une phase de calage est nécessaire.

MACRO, PEARL et PRZM ne permettant pas de représenter des pratiques agricoles complexes (mulch, travail du sol, cultures associées, fertilisation...), deux nouvelles approches ont été développées :

- (1) La première approche a consisté à représenter le mulch comme un horizon de sol ayant des propriétés spécifiques et à caler l'ETP pour tenir compte des effets du mulch sur le bilan hydrique. Cette approche a permis de reproduire correctement les concentrations observées en pesticides.

(2) La seconde approche a été basée sur l'utilisation séquentielle d'un modèle de culture STICS et du modèle « pesticides » MACRO. Les résultats ont montré que STICS-MACRO reproduit mieux, sans calage, les flux d'eau et de pesticides que le modèle MACRO calé. Dans le futur, STICS-MACRO pourrait être utilisé pour modéliser les flux de pesticides dans des systèmes de culture complexes dont les pratiques agricoles ne peuvent être décrites dans des modèles comme MACRO, PEARL ou PRZM. STICS-MACRO permet, en outre, d'accéder à d'autres sorties d'intérêt environnemental (dynamique des composés azotés) et agronomique (rendements).

B.2. Tâche 2 : « Modélisation des concentrations en pesticides dans les systèmes de culture : effets de la variabilité des systèmes et de la variabilité pédoclimatique »

Responsable : N. Munier-Jolain (INRA - Agroécologie)

Participants : INRA-ECOSYS (L Mamy, E Barriuso, C Bedos, P Benoit, V Pot, JM Marín-Benito, SK Lammoglia), INRA-AGIR (E Justes, C Bonnet, P Perrin, D Raffaillac, G Véricel), INRA-Agroécologie (N Munier-Jolain, MH Bernicot, A Coffin, P Farcy, P Marget, E Pimet), INRA-Agronomie (D Makowski, T Doré, C Colnenne, G Grandeau, D Le Floch, V Tanneau), INRA-GCIE (N Strehl, M Leleu, S Darras), INP - EI Purpan (L Alletto, S Giuliano, G Rametti), ACTA (F Brun), AgroSup Dijon (B Nicolardot, M Ubertosi), SLU-Uppsala - Suède (J Moeys)

L'estimation par modélisation des concentrations en pesticides dépend des propriétés des sols et des pesticides, du climat et des pratiques agricoles. Ainsi, l'objectif de cette tâche est d'étudier les effets de la variabilité de ces facteurs sur les concentrations en pesticides. Contrairement à MACRO, PEARL et PRZM, STICS-MACRO permet de décrire la plupart des pratiques agricoles et nous avons montré que sa performance était correcte. Ce modèle a donc été retenu dans cette tâche.

B.2.1 Variabilité des systèmes

Dans la Tâche 1 de ce projet, la performance des modèles MACRO, PEARL, PRZM et STICS-MACRO à simuler les flux de pesticides dans 13 systèmes de culture différents a été étudiée. L'ambition du projet étant d'explorer les capacités des modèles à évaluer la diversité des systèmes de grandes cultures dans la diversité des contextes agricoles français, nous avons initialement prévu de simuler les pertes de pesticides par lixiviation dans un échantillon de systèmes de culture extraits d'une base de données nationale (base de données du réseau DEPHY). Cependant, en raison du retard pris dans la mise en place de cette base de données et du temps requis pour paramétrer les modèles pour de nouvelles molécules, de nouveaux sols, de nouvelles cultures, etc., il nous est apparu plus raisonnable de limiter les simulations aux systèmes de culture testés sur les 3 sites expérimentaux instrumentés pour la mesure des transferts de pesticides (Dijon, Auzeville et Lamothe).

En nous limitant à ces trois sites et aux systèmes qui y sont testés, nous ne prétendons pas couvrir la totalité de la gamme de milieux et de pratiques agricoles, mais nous explorons cependant une diversité très large :

- Nous explorons les systèmes de culture des zones du sud de la France à climat tempéré chaud, plutôt à base de maïs et d'autres cultures d'été (soja, tournesol), éventuellement en

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

combinaison avec des céréales d'hiver (blé dur), et des systèmes plutôt céréaliers des zones du nord de la France (Section A1).

- Nous explorons des successions culturales simples (monoculture de maïs, rotation colza-blé-orge) et des successions très diversifiées comprenant des cultures d'hiver, des cultures de printemps et d'été, voire des cultures en associations et mélanges d'espèces (systèmes de « Protection intégrée » du site de Dijon et système « Très bas intrants » du site d'Auzeville). Nous explorons également un système intégrant une prairie temporaire de 3 ans dans une succession de cultures annuelles (système « Sans herbicide » de Dijon) (Section A1).
- Nous pouvons comparer des systèmes avec sol nu pendant les intercultures longues et des systèmes avec semis de cultures intermédiaires, en particulier avec les systèmes du site d'Auzeville (Section A1).
- Nous explorons des systèmes de culture intégrant du labour systématique (systèmes de référence des sites de Dijon et Lamothe, systèmes d'Auzeville), des systèmes avec labour occasionnel (systèmes de protection intégrée à Dijon), des systèmes avec travail du sol limité au rang (strip-till) avec mulch (site de Lamothe) et sans aucun travail du sol, en semis direct sous couvert (site de Dijon) (Section A1).
- Les traitements considérés intègrent toutes les familles de pesticides (herbicides, fongicides, insecticides en particulier), appliqués à des périodes variées de l'année du fait de la diversité des cultures et des périodes de semis.
- Enfin, les systèmes considérés couvrent une très large gamme de niveau d'usage de pesticides, avec des IFT variant de 1.7 à 8.3 (Section A.2). Cette gamme de variabilité est largement suffisante pour étudier les relations entre usage et impact (i.e. entre IFT et concentration de pesticides transférées dans les eaux par lixiviation).

B.2.2 Variabilité des pratiques agricoles

Indépendamment de la variabilité des systèmes de culture, nous avons étudié les effets de certaines pratiques agricoles sur les flux d'eau et de pesticides vers les eaux souterraines (Lammoglia et al., 2016b). Ce travail a été réalisé en partie en collaboration avec le projet Perform (Cf Introduction).

Matériels et méthodes

Afin d'étudier les effets des pratiques agricoles sur les flux d'eau et de pesticides vers les eaux souterraines, nous avons réalisé une analyse de sensibilité de STICS-MACRO. Il s'est agi de générer un grand nombre de combinaisons de pratiques agricoles à l'aide de la méthode d'analyse de sensibilité de Morris (Morris, 1991), de simuler ces pratiques avec STICS-MACRO et d'identifier celles qui avaient le plus d'influence sur les flux d'eau et de pesticides. La méthode d'analyse de sensibilité globale de Morris (1991) a été retenue parce qu'elle est adaptée à des modèles complexes, avec un grand nombre de variables, et qu'elle permet de classer leurs variables d'entrée selon leur importance. Dans ce travail, cette analyse est appliquée aux 33 paramètres de STICS-MACRO relatifs aux pratiques agricoles (Annexe A5 - Tableau A5.1).

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

- 2 cultures : une culture de printemps, le maïs, et une culture d'hiver, le blé
- 2 sols : calcic Cambisol (Dijon) et stagnic Luvisol (Lamothe) (FAO, 2014)
- 2 climats : une année humide avec 940 mm de précipitations et une année sèche avec 623 mm.

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 ($K_{oc} = 17$ l/kg) et de sa persistance moyenne ($DT_{50} = 20$ j).

Résultats et discussion

Les résultats de ce travail ont montré que, d'après la modélisation, l'apport de résidus organiques au sol et le travail du sol sont les pratiques agricoles qui influencent le plus les flux d'eau et de pesticides vers les eaux souterraines (Figure 15). En effet, la présence de résidus augmente fortement la teneur en eau du sol, ce qui engendre une augmentation de la percolation de l'eau et du transfert de pesticides. En comparaison au non-labour, le travail du sol conventionnel permet de réduire le transfert d'eau et donc les flux des pesticides vers les eaux souterraines. Ce résultat de modélisation rejoint les observations de nombreux chercheurs (Alletto et al., 2010).

Par ailleurs, les résultats ont montré que dans certaines conditions agropédoclimatiques, les effets du sol, du type de culture et du climat seraient moins importants que ceux des pratiques agricoles (Lammoglia et al., 2016b).

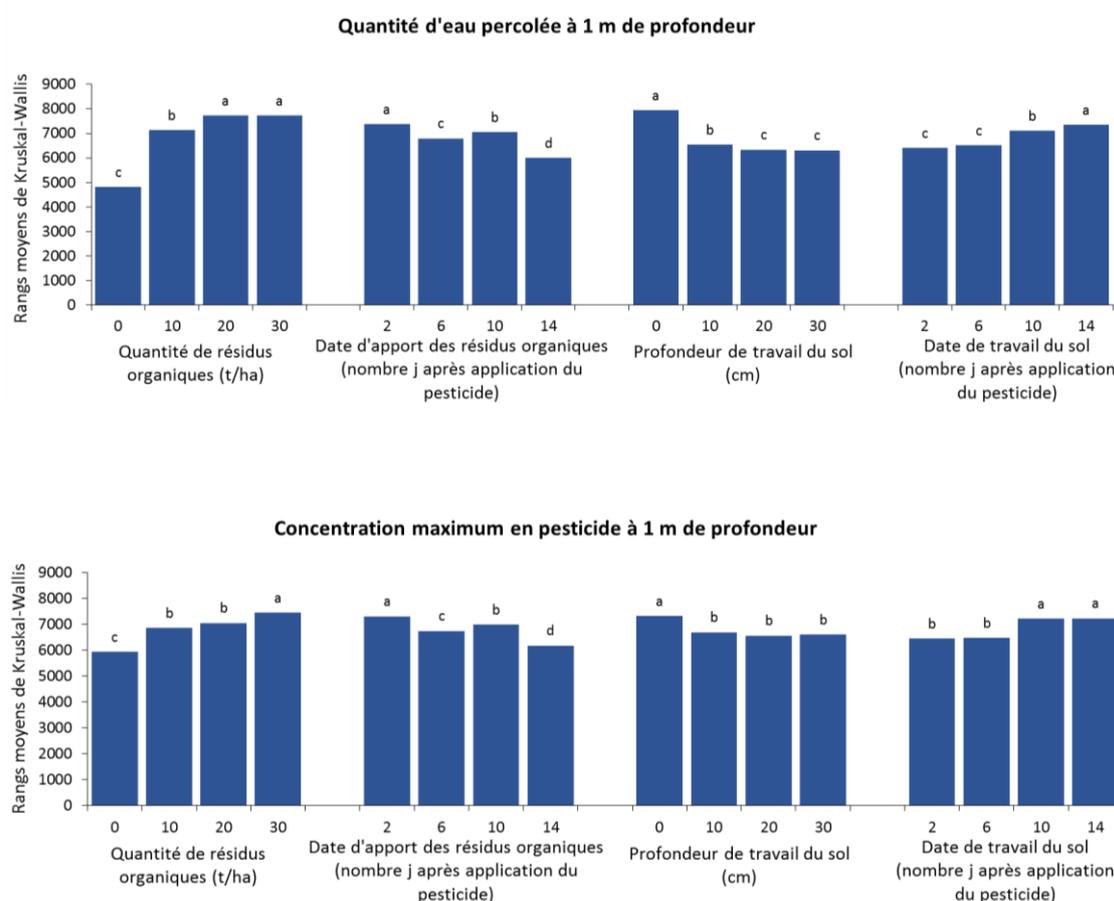


Figure 15. Effet des paramètres de STICS-MACRO reliés à l'apport de résidus organiques et au travail du sol sur les quantités d'eau percolées et la concentration maximum en pesticide à 1 m de profondeur (Lammoglia et al., 2016b).

B.2.3 Variabilité des sols

Les trois sites couvrent une large diversité de types de sol, avec des sols argileux à Dijon, argilo-limoneux à Auzeville, argilo-limoneux à limono-argileux à Lamothe (Annexe AC1 - Tableau AC1.1). Les propriétés hydrodynamiques de ces sols sont également très variables et couvrent une gamme étendue de comportements hydriques (Annexe A1 - Tableau A1.1).

Comme nous l'avons indiqué dans la section B.1.2.1, des différences ont été observées dans les transferts de pesticides permettant de mettre en évidence l'effet du type de sol sur la lixiviation des pesticides (teneurs en carbone organique, argile et sable, pH).

Les sols des sites étudiés correspondent cependant essentiellement à des sols profonds et nous n'explorons donc pas les sols superficiels, les sols acides et les sols sableux. Une des perspectives de ce projet consistera à réaliser des simulations pour ces types de sols en utilisant par exemple les classes de sols définies dans le cadre des scénarios FROGS (2011).

B.2.4 Variabilité du climat

Matériels et méthodes

Les effets de la variabilité du climat sur les concentrations en pesticides ont été étudiés, avec STICS-MACRO, à partir des données radar de Météo France : l'effet de la variabilité spatiale a été pris en compte en utilisant 400 séries climatiques réparties sur une zone de 400 km² et l'effet de la variabilité temporelle en simulant ces 400 séries climatiques pendant 7 années différentes (2007 à 2014) (Lammoglia et al., en préparation (a)).

Pour réaliser cette étude, nous avons sélectionné la culture de maïs (une des principales cultures en France) et une zone climatique qui couvre les sites d'Auzeville et de Lamothe. Deux herbicides du maïs parmi les plus utilisés ont été sélectionnés : le S-métolachlore et la bentazone.

Les caractéristiques du sol d'Auzeville, des pesticides (propriétés physico-chimiques, doses, dates d'application), etc. sont présentées dans les Tableaux 4, A1.1 et AC1.1 en annexes. La date de semis du maïs a été fixée au 1^{er} mai.

Résultats et discussion

Les résultats des simulations ont montré un effet important de la variabilité des données climatiques sur les concentrations en pesticides simulées par STICS-MACRO (Tableau 12). Les résultats révèlent aussi un effet non linéaire des précipitations sur la modélisation des concentrations en pesticides et l'importance de prendre en compte les incertitudes relatives à la variabilité spatiale et temporelle des précipitations pour estimer les concentrations en pesticides dans les eaux souterraines.

Les effets sont cependant différents selon que le pesticide est appliqué en pré- ou post-émergence. 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 allant de 4.1% à 6.9% engendre une variation des concentrations en bentazone de 98% à 663% tandis qu'une variation des précipitations de 3.9% à 7.4% engendre une variation des concentrations en S-métolachlore de 68% to 199% (Tableau 13, Figure 16). L'interception de la bentazone par le couvert végétal peut expliquer ce résultat.

Tableau 13. Coefficients de variation (CV) des précipitations annuelles et des concentrations moyennes annuelles en bentazone et S-métolachlore sur le site d'Auzeville (Lammoglia et al., en préparation (a))

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Bentazone							
CV précipitations annuelles (%)	5.75	4.14	6.41	6.90	4.87	5.57	5.63
CV concentrations moyennes annuelles (%)	306	98	663	226	544	194	164
S-métolachlore							
CV précipitations annuelles (%)	7.38	3.90	6.18	6.84	6.46	5.22	5.25
CV concentrations moyennes annuelles (%)	199	68	347	140	207	95	78

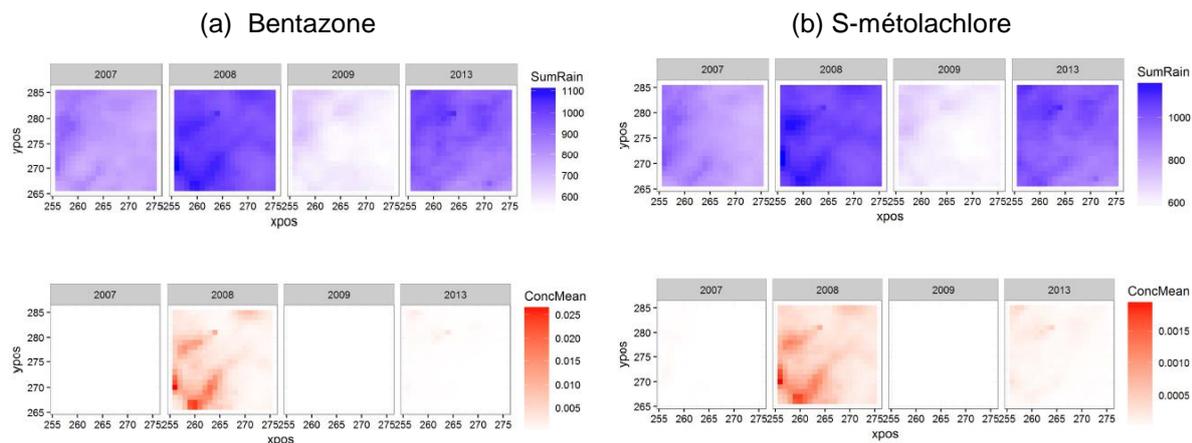


Figure 16. Variabilité spatiale des quantités annuelles de précipitations et concentrations moyennes annuelles à 1 m de profondeur en bentazone (a) et S-métolachlore (b) pour 4 années climatiques contrastées (2007, 2008, 2009, 2013) à Auzeville. SumRain : quantité totale de précipitations (mm), ConcMean : concentrations moyennes annuelles en bentazone et S-métolachlore ($\mu\text{g/l}$), xpos et ypos : coordonnées spatiales sur la zone 20 * 20 km (Lammoglia et al., en préparation (a)).

Conclusion de la Tâche 2

L'analyse des effets de la variabilité des pratiques agricoles et du climat sur les flux d'eau et de pesticides a montré que l'apport de résidus organiques au sol et le travail du sol sont les pratiques agricoles les plus influentes.

Par ailleurs, la variabilité spatiale et temporelle des précipitations a également un effet très important sur les concentrations en pesticides.

Pour approfondir cette analyse, une plus large gamme de la variabilité pédoclimatique pourra être prise en compte en construisant des scénarios basés sur le travail réalisé par l'INRA, l'ANSES et l'UIPP pour améliorer l'évaluation des concentrations en pesticides dans les eaux souterraines dans le cadre de leur mise sur le marché en France (FROGS, 2011). Ce travail était initialement prévu dans le cadre de ce projet mais n'a pu être réalisé compte tenu des difficultés rencontrées.

B.3. Tâche 3 « Classement des systèmes de culture en fonction du lien entre pratiques, pressions et impacts »

Responsable : P. Benoit (INRA - ECOSYS)

Participants : INRA-ECOSYS (L Mamy, E Barriuso, C Bedos, P Benoit, V Pot, SK Lammoglia), INRA-AGIR (E Justes, C Bonnet, P Perrin, D Raffillac, G Véricel), INRA-Agroécologie (N Munier-Jolain, MH Bernicot, A Coffin, P Farcy, P Marget, E Pimet), INP - El Purpan (L Alletto), FERA - Royaume-Uni (M Kennedy, A Hart)

Les impacts sur l'environnement des pesticides utilisés dans les systèmes de culture ont été évalués à partir du nombre de pesticides détectés dans les eaux lixiviées et de leurs concentrations observées et simulées (Cf B.1.2.1).

Mais les pesticides peuvent aussi avoir des effets sur la santé à cause d'une exposition de courte ou longue durée au cours du mélange/chargement des pesticides, de la pulvérisation, etc.

Au niveau réglementaire, la prédiction de l'exposition humaine et l'évaluation des risques pour la santé reposent notamment sur l'utilisation de modèles numériques tels que les modèles EUROPOEM (van Hemmen, 2001), BREAM (Kennedy et al., 2012) ou BROWSE (Butler Ellis et al., 2016a ; Butler Ellis et al., 2016b ; Kennedy et Butler Ellis, 2016). Il existe également d'autres méthodes, qui ne sont pas utilisées dans le cadre de la réglementation, telles que des méthodes basées sur l'utilisation du modèle USES (RIVM et al., 1998 ; Huijbregts et al., 2000 ; Mamy et al., 2010). Initialement, c'est cette dernière méthode que nous avons proposée de retenir pour évaluer les impacts des pesticides sur la santé humaine. Toutefois, le modèle BROWSE (Bystanders, Residents, Operators and WorkerS Exposure models for plant protection products), qui a été récemment développé au cours d'un projet Européen (Butler Ellis et al., 2016a ; Butler Ellis et al., 2016b ; Kennedy et Butler Ellis, 2016), nous est au final apparu plus pertinent et il a été utilisé dans ce travail.

B.3.1 Evaluation des impacts des pesticides sur la santé humaine

B.3.1.1 Matériels et méthodes

B.3.1.1.1 Description du modèle BROWSE

BROWSE est un modèle mécaniste développé pour évaluer l'exposition des opérateurs, des travailleurs, des résidents et des passants aux produits phytosanitaires (Butler Ellis et al., 2016a ; Butler Ellis et al., 2016b ; Kennedy et Butler Ellis, 2016). Ce modèle s'appuie sur les informations contenues dans les modèles existants et dans des bases de données et constitue une méthodologie qui fournit une évaluation des risques aussi réaliste et complète que possible. 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 de façon réaliste différents scénarios d'évaluation des risques pour la santé humaine.

Dans ce projet, nous avons évalué les risques pour les opérateurs et les résidents (qui représentent les résidents proprement dits et les passants). Les travailleurs ne sont pas pris en compte car, dans BROWSE, ils sont paramétrés uniquement pour les vignes et les vergers. Les opérateurs sont les personnes impliquées dans les activités relatives à l'application du produit phytosanitaire : mélange/chargement, vidange et nettoyage du matériel après application... (EFSA Journal, 2014). Les résidents sont considérés comme une catégorie regroupant les personnes qui se trouvent dans une zone située entre 2 et 20 m de l'espace où un produit phytosanitaire est appliqué ou a été appliqué. L'exposition des opérateurs est évaluée à court terme tandis que l'exposition des résidents est évaluée à court terme (24h) et long terme (au-delà de 24h). Dans ce travail, l'exposition à long terme correspond à une exposition pendant 7 jours. Le modèle BROWSE permet aussi de faire la distinction entre les adultes et les enfants (Butler Ellis et al., 2016a).

Pour les opérateurs, BROWSE considère trois voies d'exposition : l'inhalation, l'absorption dermale et l'ingestion. Pour les résidents, BROWSE quantifie l'exposition aux produits phytosanitaires, soit au moment de la pulvérisation par dérive, soit en post-application par volatilisation, en supposant que les résidents sont situés à l'opposé du sens du vent. Pendant l'application des produits phytosanitaires, ils sont exposés aux quantités qui entrent directement en contact avec leur peau (exposition cutanée directe) et aux quantités inhalées (exposition par inhalation directe). En post-application, les voies d'exposition des passants et des résidents sont la respiration de produits phytosanitaires volatilisés émis par les cultures traitées (exposition par inhalation indirecte) et le contact entre la peau et des particules contaminées provenant du sol (exposition cutanée indirecte). Les produits phytosanitaires peuvent aussi être absorbés par voie orale, par un contact entre la bouche et des mains contaminées.

Dans un premier temps, le modèle BROWSE permet d'estimer l'exposition des opérateurs et des résidents aux pesticides. Dans un deuxième temps, BROWSE estime les quantités de pesticides absorbés par inhalation, par ingestion et/ou par voie cutanée. Enfin, dans un troisième temps, ces quantités absorbées sont rapportées à l'AOEL (Acceptable operator exposure level ou niveau d'application acceptable pour l'opérateur (NEAO)) afin d'estimer le risque pour la santé humaine (HR).

B.3.1.1.2 Description des systèmes de culture évalués

Nous avons évalué les 5 systèmes mis en place sur le site de Dijon, les 4 systèmes du site de Lamothe et 3 systèmes mis en place sur le site d'Auzeville : le système de référence et les systèmes impliquant des cultures intermédiaires (les systèmes correspondants avec sol nu en interculture ont reçu les mêmes traitements pesticides, hormis des traitements avec du glyphosate).

Les systèmes de culture sont comparés à leur système 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, 123 produits phytosanitaires contenant 96 pesticides différents ont été étudiés.

B.3.1.1.3 Paramétrage du modèle BROWSE

Les données nécessaires au paramétrage du modèle BROWSE comprennent les données techniques, les propriétés physico-chimiques des pesticides, les caractéristiques du matériel agricole (volume pulvérisé, vitesse du tracteur...), les caractéristiques des résidents (telles que le poids) et l'utilisation d'équipement de protection individuelle (EPI) (Annexes AC5 et AC6).

Les propriétés des pesticides ont été extraites de 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 Journal, 2012) : l'EFSA recommande un coefficient d'absorption dermale de 25% pour les produits concentrés et de 75% pour des produits dilués. Quand il n'y avait pas de données pour l'absorption orale et par inhalation, une valeur de 100% par défaut a été retenue.

Pour toutes les simulations, les opérateurs ont été supposés porter les EPI suivants : gants en nitrile, combinaison certifiée, capuchon, visière et masque.

Le modèle nécessite aussi la DT50 à la surface des végétaux : lorsque les valeurs n'étaient pas disponibles, elles ont été déterminées à partir de la relation de Juraske et al. (2008) :

$$DT50_{\text{Surface des végétaux}} = DT50_{\text{Sol}} / 4$$

Les paramètres relatifs aux méthodes de mélanges, aux caractéristiques du pulvérisateur, aux méthodes d'application et aux caractéristiques des EPI ont été considérés comme constants.

B.3.1.2 Résultats et discussion

Comme indiqué précédemment, pour chaque application de produit phytosanitaire, BROWSE estime la quantité de pesticide susceptible d'être absorbée par l'opérateur et le résident (adulte ou enfant) et rapporte cette quantité à l'AOEL. Lorsque le ratio ainsi obtenu, l'indice de risque HR, est inférieur à 100%, le risque pour la santé de l'opérateur ou du résident est acceptable ; en revanche, lorsque HR est supérieur à 100%, le risque est inacceptable.

BROWSE fournit un résultat pour chaque pesticide utilisé. Afin de comparer les systèmes innovants aux systèmes de référence correspondants, il était donc nécessaire d'agrégier les résultats obtenus pour l'ensemble des pesticides appliqués sur un même système.

Ainsi, nous avons choisi de représenter les résultats sous forme de « boxplots » pour chaque système (Figures 17, 18 et 19). Cette représentation permet notamment de visualiser la distribution des résultats obtenus (HR) et les valeurs extrêmes correspondant aux pesticides qui présentent les risques les plus élevés (Lammoglia et al., en préparation (b)).

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

Dans tous les systèmes, selon le modèle BROWSE, plusieurs applications de produits phytosanitaires peuvent conduire à des risques inacceptables pour la santé humaine (Figure 17). Ces produits impliquent essentiellement 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, il faut souligner que 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 ont été systématiquement trouvés pour l'isofenphos et la vinclozoline, mais ces deux pesticides ne disposent plus d'autorisation de mise sur le marché depuis plusieurs années. L'isofenphos a été utilisé en traitement de semences dans les systèmes S1, S2 et S3 et excède l'AOEL pour l'opérateur (1365 à 1806 %) et à court terme et long terme pour l'enfant (104 à 368 %). La vinclozoline appliquée le 29 mars 2004 (S2) excède l'AOEL pour l'adulte à court terme (125%) et pour l'enfant à court et long terme (506 et 269%) (Figure 17, Annexes AC5 et AC6 - Tableaux AC5.1 et AC6.1). L'isoproturon figure également parmi les pesticides qui présentent un risque pour la santé. Il a été appliqué plusieurs fois sur le blé d'hiver et sur l'orge d'hiver dans le système S1 (Annexe AC2 - Tableau AC2.1) et il excède l'AOEL pour l'opérateur (139 à 141%) et pour l'enfant à court terme (102 à 166 %) (Figure 17). En conclusion, le système qui présente le meilleur potentiel pour réduire les risques pour la santé humaine serait le système « Sans herbicide » S5 (Lammoglia et al., en préparation (b)).

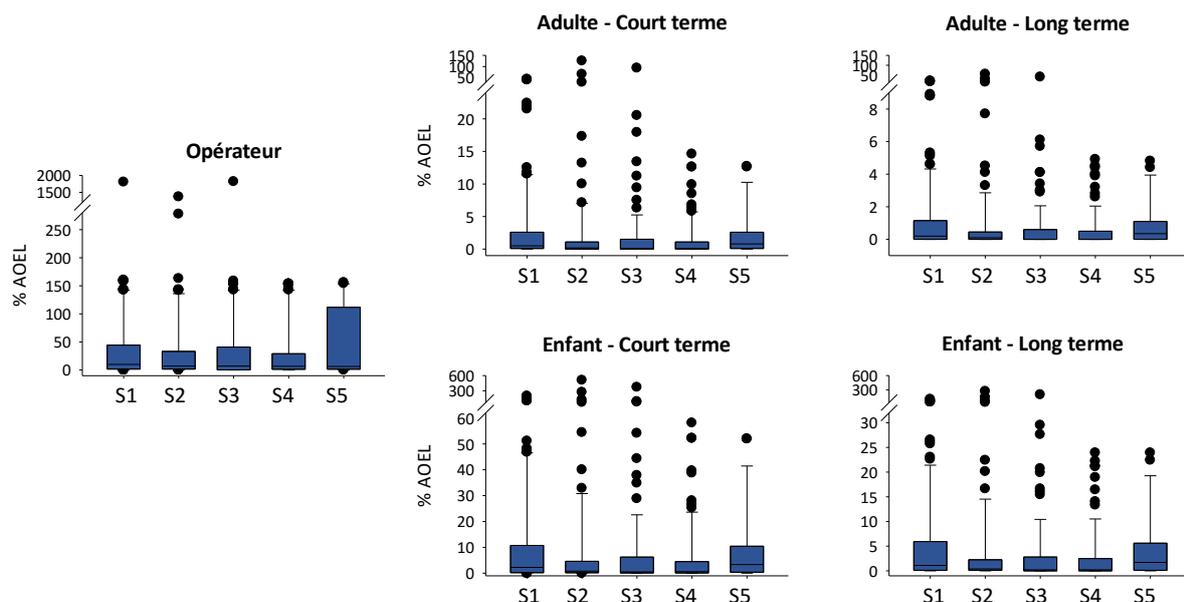


Figure 17. Distribution des indices de risque (en % AOEL) pour chaque pesticide appliqué dans les différents systèmes expérimentés sur le site de Dijon (Lammoglia et al., en préparation (b)). S1 : Système de référence (colza-blé-orge) ; S2 : Protection intégrée sans labour en semis direct sous couvert ; S3 : Protection intégrée sans désherbage mécanique ; S4 : Protection intégrée typique ; S5 : Sans herbicide.

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

Sur le site d'Auzeville, selon BROWSE, seulement deux applications de produits phytosanitaires réalisées dans le système TBI-CI en novembre 2011 et novembre 2012 pourraient conduire à un risque inacceptable pour l'opérateur (Figure 18). Ce risque élevé est dû à un traitement de semences à base du fongicide cymoxanil (Annexes AC2 et AC6 - Tableaux AC2.1 et AC6.1). En effet, la toxicité du cymoxanil est importante avec une AOEL égale à 0.01 mg/kg pc/jour (Annexe AC6 - Tableau AC6.1). Toutes les autres applications de produits phytosanitaires ont conduit à un risque acceptable pour la santé humaine quel que soit le système de culture (Figure 18). Ces résultats montrent que le système TBI-CI peut être une alternative intéressante à la rotation blé dur-tournesol si le cymoxanil n'est pas utilisé (Lammoglia et al., en préparation (b)).

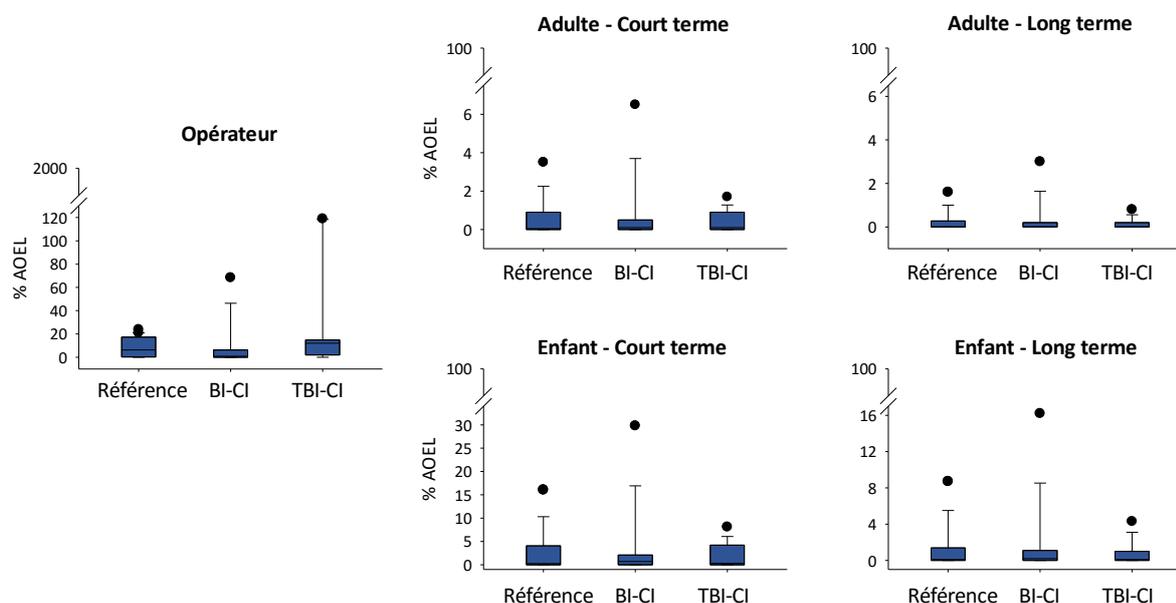


Figure 18. Distribution des indices de risque (en % AOEL) pour chaque pesticide appliqué dans les différents systèmes expérimentés sur le site d'Auzeville (Lammoglia et al., en préparation (b)). Référence (blé dur-tournesol), BI-CI : Système bas intrants avec cultures intermédiaires, TBI-CI : Système très bas intrants avec cultures associées et cultures intermédiaires.

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

Pour l'opérateur, les HR varient entre 0 et 145% pour le système de référence MM_{Conv} , entre 0 et 23% pour le système bas intrants MM_{BI} , entre 0 et 1820% pour le système travail du sol simplifié et entre 0 et 18% pour le système rotation courte (Figure 19). Dans le système MM_{Conv} , la lambda-cyhalothrine, insecticide appliqué le 13 juin 2014, est le seul pesticide qui pourrait entraîner une quantité absorbée supérieure à l'AOEL (145%) (Figure 19, Annexe AC6 - Tableau AC6.1). Dans le système MM_{TS} , la valeur la plus élevée de HR de 1820% est due à la tembotrione, herbicide appliqué le 20 juin 2014, qui a une toxicité très élevée (Annexes AC2, AC5 et AC6 - Tableaux AC2.1, AC5.1 et AC6.1). Le HR de 120% est dû, quant à lui, au cymoxanil appliqué le 15 octobre 2014 (Figure 19, Annexes AC2 et AC5 - Tableaux AC2.1 et AC5.1). Les résultats issus de BROWSE ont aussi montré que la préparation Mercantor Gold contenant 960 g/l de S-métolachlore et appliquée à 1344 g/ha présenterait plus de risque pour l'opérateur que la préparation Calibra qui contient 400 g/l de S-métolachlore et était appliquée à 1520 g/ha (Annexe AC5 - Tableau AC5.1). En effet, une concentration élevée en substance active dans un produit phytosanitaire génère un risque plus élevé pour l'opérateur (Wester et Maibach, 1985). Pour les résidents, aucun des produits phytosanitaires appliqués sur les systèmes MM_{Conv} , MM_{BI}

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

et RC ne présentent de risque pour la santé humaine. En revanche, la tembotrione appliquée le 20 juin 2014 sur MM_{TS} pourrait conduire à des risques inacceptables : les HR sont égaux à 130%, 527% et 229% pour l'adulte à court terme, l'enfant à court et à long terme (Figure 19). Aucun des autres produits phytosanitaires appliqués sur MM_{TS} ne conduit à un risque inacceptable pour la santé du résident. En résumé, le système RC conduit aux risques les plus faibles, suivi du système MM_{BI}. En général, selon le modèle BROWSE, le système MM_{TS} conduirait systématiquement à des risques inacceptables pour la santé (sauf pour le résident adulte à long terme), mais à cause de l'herbicide tembotrione (Annexe AC6 - Tableau AC6.1) (Lammoglia et al., en préparation (b)).

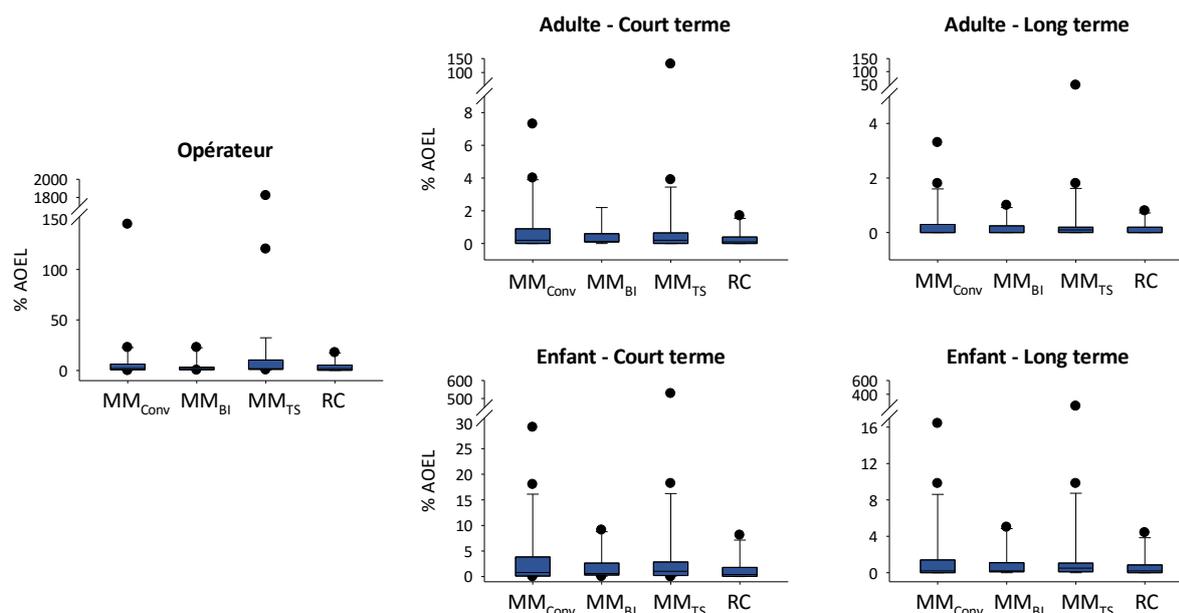


Figure 19. Distribution des indices de risque (en % AOEL) pour chaque pesticide appliqué dans les différents systèmes expérimentés sur le site de Lamothe (Lammoglia et al., en préparation (b)). MM_{Conv} : Système de référence (monoculture de maïs irriguée) ; MM_{BI} : Système bas intrants ; MM_{TS} : Travail du sol simplifié ; RC : Système rotation courte.

B.3.1.3. Conclusion

Les résultats issus du modèle BROWSE ont montré que les systèmes de culture innovants tels que les systèmes visant une réduction de 50% de l'IFT par rapport au système conventionnel et privilégiant les techniques de désherbage mécanique (i.e. sans herbicide) permettent de réduire de façon significative les risques pour la santé humaine liés à l'utilisation des pesticides. Inversement, les systèmes de culture impliquant un travail simplifié du sol auraient tendance à entraîner une augmentation des impacts sur la santé humaine à cause de la multiplication des traitements herbicides. Ces résultats ont aussi permis d'identifier les produits phytosanitaires susceptibles d'entraîner un risque inacceptable pour la santé. Le remplacement de ces produits par d'autres produits moins toxiques pourrait améliorer les performances sanitaires des systèmes concernés.

B.3.2. Lien entre pratiques, pressions et impacts et classement des systèmes de culture

Afin d'établir le lien entre pratiques agricoles, pressions et impacts liés aux pesticides, nous avons tenu compte : (1) des pratiques agricoles mises en place dans les différents systèmes de culture expérimentés (pratiques), (2) des IFT (pression), (3) du nombre de pesticides détectés dans les lysimètres et de leurs concentrations observées et simulées avec MACRO, PEARL et PRZM (impact sur l'environnement), et de l'évaluation des risques pour la santé humaine réalisée avec le modèle BROWSE (impact sur la santé) (Tableau 14).

En considérant le nombre de pesticides détectés, il apparaît que les systèmes « Protection intégrée (PI) sans désherbage mécanique » et « Sans herbicide » expérimentés sur le site de Dijon présentent une meilleure performance environnementale que le système de référence colza-blé-orge, le système « PI sans labour » et le système « PI typique ». Par ailleurs, c'est le système « Sans herbicide » qui conduit à la plus faible pression « pesticides » (Tableau 14). Sur le site de Lamothe, le système « Rotation courte » et le système « Bas intrants » permettent également de réduire la pression liée aux pesticides et leurs impacts sur l'environnement par rapport au système de référence et au système « Travail du sol simplifié ». Ce résultat rejoint ceux qui sont observés sur le site de Dijon où le système sans labour conduit aussi à une augmentation de la pression « pesticides » et à un nombre élevé de pesticides détectés dans les eaux. Ceci est dû à l'usage d'herbicides supplémentaires (glyphosate notamment, Tableau AC2.1) et à l'absence de labour qui conduit à la formation de voies de transferts préférentiels favorisant la lixiviation des pesticides (Alletto et al., 2010). Sur le site d'Auzeville, la pression liée aux pesticides et le nombre de pesticides détectés sont plus faibles dans les systèmes « Très bas intrants » que dans les systèmes « Bas intrants » (Tableau 14). D'une manière générale, la pression liée aux pesticides (IFT) et les impacts sur l'environnement (nombre de pesticides détectés, concentrations) sont corrélés : plus l'IFT est élevé, plus le nombre de pesticides détectés est élevé. Sur le site de Dijon, cette relation est moins évidente, mais elle est probablement une conséquence du nombre réduit d'observations.

En considérant les impacts sur la santé humaine des pesticides utilisés dans les systèmes, il apparaît que la plupart des systèmes présentent un risque pour l'opérateur, tandis que les risques semblent plus limités pour les résidents adultes et enfants à court et long termes. Par ailleurs, les systèmes innovants permettent généralement de réduire les impacts potentiels sur la santé, sauf les systèmes basés sur un travail du sol simplifié à cause de la multiplication des traitements herbicides. Au final, des impacts sur la santé sont le plus susceptibles de se produire dans les cas des systèmes où la pression liée aux pesticides est la plus importante : système de référence expérimenté sur le site de Dijon, systèmes sans labour des sites de Dijon et Lamothe et système sans désherbage mécanique du site de Dijon (Tableau 14).

Ces résultats permettent d'établir un classement des systèmes, du plus performant (i.e. celui qui permet de réduire le nombre de pesticides présents dans l'environnement et les impacts des pesticides sur la santé) au moins performant (Tableau 14) :

- **Cas des systèmes basés sur une rotation colza-blé-orge :** « Sans herbicide » > « PI Typique » > « PI sans désherbage mécanique » > Système de référence, « PI sans labour »
- **Cas des systèmes basés sur une rotation blé dur-tournesol en sec :** « Bas intrants » > Système de référence > « Très bas intrants avec cultures associées ». Il faut souligner que les impacts sur la santé dus à ce dernier système sont dus à un fongicide, le cymoxanil. Si celui-ci n'est pas utilisé, les risques pour la santé humaine deviennent acceptables.
- **Cas des systèmes basés sur une monoculture de maïs irriguée :** « Rotation courte » > « Bas intrants » > Référence > « Travail du sol simplifié »

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

Tableau 14. Relation entre pratiques agricoles, pression et impact des pesticides. PI : Protection intégrée. Nb : nombre de pesticides, CT : court terme, LT : long terme, Oui : un « programme pesticide » est susceptible d'avoir un impact sur la santé humaine, Non : aucun impact sur la santé humaine d'un « programme pesticide » n'est attendu.

Système	Pratiques agricoles	Pression IFT	Impact					
			Environnement			Santé		
			Observations		Simulations	Opérateur	Adulte CT / LT	Enfant CT / LT
			Nb détectés	Nb > 0.1 µg/l	Nb > 0.1 µg/l			
Dijon								
Référence S1	Rotation Colza-Blé-Orge	8.3	3	1	0	Oui	Non/Non	Oui/Oui
S2	PI sans labour, en semis direct sous couvert	5.6	5	2	2 (MACRO, PEARL)	Oui	Oui/Non	Oui/Oui
S3	PI sans désherbage mécanique	4.8	1	1	1 (MACRO, PEARL, PRZM, STICS-MACRO)	Oui	Non/Non	Oui/Oui
S4	PI typique (incluant le désherbage mécanique)	4.1	4	2	0	Oui	Non/Non	Non/Non
S5	Sans herbicide	1.7	1	0	1 (PEARL)	Oui	Non/Non	Non/Non
Auzeville								
Référence	Rotation blé dur-tournesol en sec	5.1	-	-	-	Non	Non/Non	Non/Non
BI-CI	Bas intrants avec cultures intermédiaires	3.4	3	1	0	Non	Non/Non	Non/Non
TBI-CI	Très bas intrants avec cultures associées et cultures intermédiaires	3.1	2	1	0	Oui	Non/Non	Non/Non
Lamothe								
Référence MM _{Conv}	Monoculture de maïs irriguée	6.6	6	6	5 (MACRO, PEARL, PRZM, STICS-MACRO)	Oui	Non/Non	Non/Non
MM _{BI}	Bas intrants avec désherbage mécanique	3.2	5	5	0	Non	Non/Non	Non/Non
MM _{TS}	Travail du sol simplifié	7.1	1 (6)*	1 (5)*	1 (MACRO)	Oui	Oui/Non	Oui/Oui
RC	Rotation courte	2.4	3	3	1 (MACRO)	Non	Non/Non	Non/Non

* Seul le S-métolachlore a été modélisé.

D'une manière générale, indépendamment du système de culture de référence, les systèmes basés sur un travail du sol simplifié tendent à augmenter les impacts sur la santé en raison de l'augmentation du nombre de traitements herbicides et ils présentent aussi les risques les plus élevés de contamination des eaux souterraines par les pesticides. En revanche, les systèmes innovants tels que les systèmes visant une réduction de 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 le 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 (Tableau 14).

Ce classement sera affiné en réalisant des simulations avec STICS-MACRO, MACRO ou PEARL pour évaluer les concentrations en pesticides à long terme. En raison des nombreuses difficultés rencontrées (Cf sections B.1.2.1 et B.1.2.2.3), le temps a manqué pour réaliser ce travail dans le cadre de ce projet.

Conclusion générale

Les objectifs du projet ECoPESt consistaient à (1) évaluer et comparer les performances environnementales et sanitaires de systèmes de culture conçus avec l'objectif de réduire l'usage des pesticides, (2) établir un lien entre pratiques, pressions et impacts des pesticides et identifier les systèmes présentant le moins d'impacts sur l'environnement et sur la santé afin de préserver les services écosystémiques (notamment services d'approvisionnement et de régulation).

La démarche a été divisée en quatre étapes principales :

- (1) Tester plusieurs modèles numériques décrivant le devenir des pesticides dans l'environnement en comparant les résultats des simulations à des mesures réalisées dans trois sites expérimentaux pour identifier le(s) modèle(s) le(s) plus performant(s).
- (2) Etudier avec le(s) modèle(s) retenu(s) les effets de la variabilité des systèmes de culture et de la variabilité pédoclimatique sur les concentrations en pesticides dans l'environnement.
- (3) Relier la pression « pesticides » (caractérisée par l'IFT) à leurs impacts sur l'environnement (estimés par des niveaux de concentrations simulés dans l'eau lixiviée) et sur la santé (estimés à l'aide d'un modèle d'exposition de la population aux pesticides) pour différents systèmes et différentes conditions pédoclimatiques.
- (4) Proposer une démarche de classement des systèmes de culture en identifiant les systèmes présentant le moins d'impacts sur l'environnement et la santé.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées au cours du projet : disponibilité tardive des données, problème de mesure dus aux aléas climatiques (sécheresse, inondations) et nécessité de développer une nouvelle version du modèle MACRO (impossibilité de modéliser des rotations avec la version courante). Toutefois, les objectifs ont été atteints à 80%.

La pression liée aux pesticides a été caractérisée en comparant le nombre de pesticides appliqués, les quantités moyennes annuelles appliquées et les IFT des différents systèmes. D'une manière générale, les IFT des systèmes innovants sont inférieurs à ceux des systèmes de référence correspondants, les systèmes innovants permettent donc de réduire la pression liée aux pesticides. Il faut cependant souligner que le système basé sur un travail du sol simplifié présente un IFT supérieur au système de référence correspondant en raison de la multiplication du nombre de traitements herbicides. Par ailleurs, les systèmes basés sur des cultures associées tendent également à avoir un IFT supérieur à celui des systèmes bas intrants à cause des traitements de semence : lorsqu'il y a deux cultures associées, il y a deux fois plus de traitements de semences que dans le cas d'une seule culture (systèmes BI). Toutefois, bien que l'IFT augmente, les quantités totales de pesticides en traitement de semences sont néanmoins légèrement inférieures dans les systèmes TBI que dans les systèmes BI. Cet exemple illustre une des limites de l'IFT : plusieurs applications à faibles doses peuvent paraître plus défavorables qu'une seule application à forte dose.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

L'analyse des résultats de mesure des concentrations en pesticides dans les sites et systèmes étudiés a montré que la majeure partie des pesticides détectés sont des herbicides (ils ont par ailleurs une mobilité et une persistance élevées) et que les concentrations dans les eaux de lixiviation dépassent régulièrement le seuil réglementaire de 0.1 µg/l pour les eaux souterraines. Dans le cas des systèmes basés sur la rotation colza-blé-orge, c'est le système « Sans herbicide » qui présente les meilleures performances environnementales (nombre de pesticides détectés dans l'eau faible), tandis que pour les systèmes basés sur la monoculture de maïs, c'est le système « Rotation courte » qui permet de minimiser les impacts sur l'environnement. En revanche, les systèmes basés sur un travail du sol simplifié ont une plus faible performance environnementale vis-à-vis vis-à-vis de la qualité des eaux souterraines en raison de la multiplication du nombre de traitements herbicides, ce qui a tendance à augmenter les quantités de pesticides utilisées, les IFT et le nombre de pesticides susceptibles d'être retrouvés dans les eaux souterraines. Pour le système blé dur-tournesol, c'est le système « Très bas intrants avec cultures intermédiaires » qui semble avoir les meilleures performances environnementales (réduction du nombre de pesticides détectés).

Dans l'ensemble, les modèles MACRO, PEARL et PRZM ne décrivent pas bien la dynamique observée des quantités d'eau percolée et des concentrations en pesticides et ils ont tendance à sous-estimer les concentrations des pesticides peu mobiles ou peu persistants. Inversement, ils tendent à surestimer les concentrations en pesticides très mobiles et persistants. Ils ne sont par ailleurs pas capables de représenter les concentrations observées des pesticides très peu mobiles, car le transport particulaire n'est pas représenté dans ces modèles. Au final, MACRO s'avère être le modèle le plus performant, suivi de PEARL puis de PRZM. Cependant, ces modèles sont probablement plus adaptés pour estimer des concentrations moyennes sur des pas de temps longs que pour estimer des concentrations sur des pas de temps courts et, de plus, ils nécessitent une phase de calage.

MACRO, PEARL et PRZM ne permettant pas de représenter des pratiques agricoles complexes (mulch, travail du sol, cultures associées, fertilisation...), deux nouvelles approches ont été développées :

(1) La première approche a consisté à représenter le mulch comme un horizon de sol ayant des propriétés spécifiques et à caler l'ETP pour tenir compte des effets du mulch sur le bilan hydrique. Cette approche a permis de reproduire correctement les concentrations observées en pesticides.

(2) La seconde approche a été basée sur l'utilisation séquentielle d'un modèle de culture STICS et du modèle « pesticides » MACRO. Les résultats ont montré que STICS-MACRO reproduit mieux, sans calage, les flux d'eau et de pesticides que le modèle MACRO calé. Dans le futur, STICS-MACRO pourrait être utilisé pour modéliser les flux de pesticides dans des systèmes de culture complexes dont les pratiques agricoles ne peuvent être décrites dans des modèles comme MACRO, PEARL ou PRZM. Il permet, en outre, d'accéder à d'autres sorties d'intérêt environnemental (dynamique des composés azotés) et agronomique (rendements).

Enfin, nous avons testé le modèle Hydrus 2D, afin d'étudier si un modèle en 2D permettait de mieux simuler les flux d'eau et de pesticides observés que les modèles en 1D. Les résultats sont en cours d'exploitation.

En résumé, les résultats obtenus montrent que MACRO et PEARL sont les modèles les plus performants pour simuler les flux de pesticides dans les systèmes de cultures mais qu'une phase de calage est indispensable. Ainsi, l'utilisation de STICS-MACRO pourrait être une alternative intéressante.

L'analyse des effets de la variabilité des pratiques agricoles et du climat sur les flux d'eau et de pesticides a montré que l'apport de résidus organiques au sol et le travail du sol sont les pratiques agricoles les plus influentes. Par ailleurs, la variabilité spatiale et temporelle des précipitations a également un effet très important sur les concentrations en pesticides.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

Enfin, les impacts sur la santé des pesticides utilisés dans les systèmes ont été estimés avec le modèle BROWSE et comparés entre eux, puis le lien entre pratiques, pressions et impacts a été établi. D'une manière générale, les résultats montrent, indépendamment du système de culture de référence, que les systèmes basés sur un travail du sol simplifié tendent à augmenter les impacts sur la santé en raison de la multiplication du nombre de traitements herbicides et qu'ils présentent aussi les risques les plus élevés de contamination des eaux souterraines par les pesticides. En revanche, les systèmes innovants tels que les systèmes visant une réduction de 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 vis-à-vis de la contamination par les pesticides. Ces résultats ont aussi permis d'identifier les produits phytosanitaires susceptibles d'entraîner un risque inacceptable pour la santé humaine. Le remplacement de ces produits par d'autres produits moins toxiques pourrait améliorer les performances sanitaires des systèmes concernés.

L'ensemble des résultats obtenus a permis d'établir un classement des systèmes, du plus performant (i.e. celui qui permet de réduire les impacts des pesticides sur l'environnement et sur la santé) au moins performant :

- **Cas des systèmes basés sur une rotation colza-blé-orge** : « Sans herbicide » > « PI Typique » > « PI sans désherbage mécanique » > Système de référence, « PI sans labour »
- **Cas des systèmes basés sur une rotation blé dur-tournesol en sec** : « Bas intrants » > Système de référence > « Très bas intrants avec cultures associées ». Il faut souligner que les impacts sur la santé dus à ce dernier système sont dus à un fongicide, le cymoxanil. Si celui-ci n'est pas utilisé, les risques pour la santé humaine deviennent acceptables.
- **Cas des systèmes basés sur une monoculture de maïs irriguée** : « Rotation courte » > « Bas intrants » > Référence > « Travail du sol simplifié »

Enfin, une démarche pour classer les systèmes de culture, basée sur la modélisation, a été élaborée. Elle est illustrée dans la Figure 20.

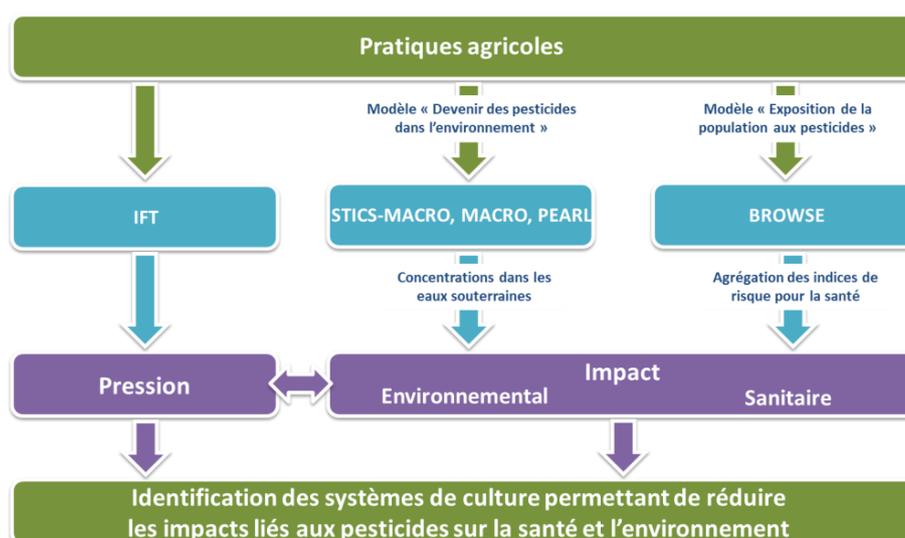


Figure 20. Représentation schématique de la démarche développée pour évaluer a priori les impacts sur l'environnement et sur la santé liés aux pesticides utilisés dans les systèmes de culture.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

Ce projet a permis :

- (1) de montrer que MACRO et PEARL sont les modèles les plus performants pour estimer les flux et concentrations en pesticides dans les systèmes de culture mais qu'une phase de calage est nécessaire
- (2) de développer une nouvelle approche pour représenter les mulchs dans les modèles « pesticides » tels que MACRO
- (3) de développer une nouvelle approche de modélisation basée sur l'utilisation du modèle de culture STICS et de MACRO pour évaluer les concentrations en pesticides dans des systèmes de culture complexes
- (4) d'évaluer et de comparer les performances environnementales des systèmes de culture à partir de la mesure et de la modélisation des concentrations en pesticides dans les eaux souterraines
- (5) d'évaluer et de comparer les impacts potentiels sur la santé humaine des pesticides utilisés dans les systèmes de culture
- (6) de proposer une démarche permettant d'évaluer a priori les impacts des systèmes de culture sur l'environnement et sur la santé, sous l'angle de l'utilisation des pesticides
- (7) d'établir le lien entre pratiques, pressions et impacts des pesticides
- (8) de déterminer un classement des systèmes de culture
- (9) d'identifier les systèmes qui permettent de répondre aux objectifs du plan Ecophyto donc d'aider à réduire les impacts sur l'environnement et la santé.

Afin d'affiner l'évaluation et la comparaison des systèmes de culture, plusieurs perspectives sont envisagées. Nous avons étudié une large diversité de systèmes de culture, mais d'autres systèmes restent à explorer. Concernant la modélisation, les résultats obtenus dans ce projet ont montré que la performance des modèles MACRO, PEARL et PRZM était faible sans phase de calage, en particulier sans calage des paramètres hydrodynamiques. Ainsi, il serait intéressant de proposer des facteurs correctifs génériques de ces paramètres, adaptés au contexte métropolitain (dans un premier temps), qui permettraient d'utiliser ces modèles de manière plus large en minimisant les erreurs des résultats obtenus en sortie des modèles. Néanmoins, il faut rappeler que ces modèles ne permettent pas de décrire des pratiques agricoles complexes et que le modèle STICS-MACRO sera probablement une alternative plus intéressante. Ensuite, pour approfondir l'évaluation des risques liés aux pesticides utilisés dans les systèmes de culture, des simulations à long terme pour évaluer les concentrations en pesticides dans les eaux souterraines, mais aussi dans les eaux de surface, le sol ou l'air, devront être réalisées. La prise en compte plus large de la variabilité des sols et des climats (via les scénarios FROGS, par exemple) permettra également d'améliorer l'évaluation a priori des risques. Enfin, il faudra aussi inclure dans la comparaison des systèmes de culture, l'évaluation des impacts écotoxicologiques des pesticides, notamment sur les organismes non cibles.

Références

- Abu-Awwad AM, 1999. Irrigation water management for efficient water use in mulched onion. *J Agron Crop Sci* 183: 1-7.
- 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. *Agron Sustain Dev* 30: 367-400.
- Alletto L, Coquet Y, Justes E, 2011. Effects of tillage and fallow period management on soil physical behavior and maize development. *Agric Water Manag* 102: 74-85.
- Alletto L, Benoit P, Bolognesi 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 Till Res* 128: 97-103.
- Armstrong A, Aden K, Amraoui N, Diekkrüger B, Jarvis N, Mouvet C, Nicholls P, Wittwer C, 2000. Comparison of the performance of pesticide-leaching models on a cracking clay soil: results using the Brimstone Farm dataset. *Agric Water Manag* 44:85-104.
- Azcarate MP, Montoya JC, Koskinen WC, 2015. Sorption, desorption and leaching potential of sulfonylurea herbicides in Argentinean soils. *J Environ Sci Health Part B – Food Contam Agric Wastes* 50: 229-237.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

- Beulke S, Brown CD, Dubus IG, Harris G, 2001. Evaluation of uncalibrated referential flow models against data for isoproturon movement to drains through a heavy clay soil. *Pest Manage Sci* 57: 537-547.
- Beulke S, Renaud F, Brown C, 2002. Development of guidance on parameter estimation for the preferential flow model MACRO 4.2. Final Report of the DEFRA project PL0538. Cranfield Centre for EcoChemistry (University of Cranfield, UK).
- Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy M-H, Ruget F, Gate P, Devienne-Barret F, Antonioletti R, Durr C, Nicoullaud B, Richard G, Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plenet D, Cellier P, Machet JM, Meynard J-M, Delécolle R, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18: 311-346.
- Brown CD, Dubus IG, Fogg P, Spirlet M, Gustin C, 2004. Exposure to sulfosulfuron in agricultural drainage ditches: field monitoring and scenario-based modelling. *Pest Manage Sci* 60: 765-776.
- Butler Ellis MC, van den Berg F, van de Zande JC, Kennedy MC, Charistou AN, Arapaki NS, Butler AH, Machera KA, Jacobs CM, 2016a. The BROWSE model for predicting exposures of residents and bystanders to agricultural use of pesticides: Comparison with experimental data and other exposure models. Biosyst Eng (en ligne).
- Butler Ellis MC, van de Zande JC, van den Berg F, Kennedy MC, O'Sullivan CM, Jacobs CM, Fragkoulis G, Spanoghe P, Gerritsen-Ebben R, Frewer LJ, Charistou A, 2016b. The BROWSE model for predicting exposures of residents and bystanders to agricultural use of plant protection products: An overview. Biosyst Eng (en ligne).
- Calvet R, Barriuso E, Benoit P, Charnay MP, Coquet Y, 2005. Devenir des pesticides dans les sols. Editions France Agricole / Dunod, Paris.
- Carsel RF, Imhoff JC, Hummel PR, Cheplick JM, Donigian Jr AS, 1998. PRZM-3: a model for predicting pesticide and nitrogen fate in the crop root and unsaturated soil zones: user's manual for release 3.12. Athens, GA: National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Cassigneul A, Benoit P, Berghéaud V, Dumény V, Etiévant V, Goubard Y, Maylin A, Justes E, Alletto L, 2016. Fate of glyphosate and degradates in cover crop residues and underlying soil: A laboratory study. *Sci Tot Environ* 545-546: 582-90.
- Cattan P, Voltz M, Cabidoche Y-M, Lacas J-G, Sansoulet J, 2007. Spatial and temporal variations in percolation fluxes in a tropical Andosol influenced by banana cropping patterns. *J Hydrol* 335: 157-169.
- CGDD, 2016. Commissariat Général au Développement Durable. Repères. L'eau et les milieux aquatiques. Chiffres clés. Edition 2016. 60p.
- Chen SY, Zhang XY, Pei D, Sun HY, Chen SL, 2007. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China plain. *Ann Appl Biol* 150: 261-68.
- Cheviron B, Carluer N, Dairon R, Corot M, Pinet F (soumis). A software and framework to use the automated MACRO model for pesticide fate scenarios: application to undrained poorly-gauged plot.
- Chikowo R, Faloya V, Petit S, Munier-Jolain NM, 2009. Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agric Ecosyst Environ* 132: 237-242.
- 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 KS, 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. *Environ Model Software*, 64: 177-190.
- Dairon R, Nicolardot B, Mamy L, Alletto L, Ubertosi M, en préparation. Transfer of water and pesticides in swelling clay soil under different integrated pesticide management systems: data analysis and numerical simulation.
- Dubus IG, Brown CD, Beulke S, 2003. Sensitivity analyses for four pesticide leaching models. *Pest Manage Sci*, 59: 962-982.
- Dyson JS, Beulke S, Brown CD, Lane MCG, 2002. Adsorption and degradation of the weak acid mesotrione in soil and environmental fate implications. *J Environ Qual* 31: 613-618.
- EFSA, 2004. Opinion of the Scientific Panel on Plant Health, Plant Protection Products and their Residues on a request of EFSA related to FOCUS groundwater models. *The EFSA Journal*, 93: 1-20.
- EFSA Journal, 2014. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment for plant protection products: Guidance on pesticides exposure assessment of operators, workers, residents and bystanders. *EFSA Journal* 12: 3874.
- Findeling A, Garnier P, Coppens F, Lafolie F, Recous S, 2007. Modelling water, carbon, and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. *Eur J Soil Sci* 58: 196-206.
- 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.
- FROGS, 2011. French Refinement Of Groundwater Scenarios. Report of the UIPP Environmental Methodology Working Group version 2.0, 314 p.
- van Genuchten MT, Leij FJ, Yates SR, 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 MR, Véricel G, Rametti G, Perdrioux F, Justes E, Alletto L, 2016. Low-input cropping systems to reduce input dependency and environmental impacts in maize production: A multi-criteria assessment. *Eur J Agro* 76: 160-175.
- van Hemmen JJ, 2001. EUROPOEM, A Predictive Occupational Exposure Database for Registration Purposes of Pesticides. *App Occup Environ Hyg* 16: 246-250.
- Huang YL, Chen LD, Fu BJ, Huang ZL, Gong E, 2005. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects. *Agric Water Manag* 72: 209-22.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

- Huijbregts MAJ, Thissen U, Guinée JB, Jager T, Kalf D, van de Meent D, Ragas AMJ, Wegener Sleeswijk A, Reijnders L, 2000. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA. *Chemosphere* 41: 541-573.
- Jarvis N, Lindahl A, Messing I, Stenemo F, Hollis J, Reichenberger S, Dubus I, 2007. Algorithm to completely parameterise MACRO from basic soil property data. DL21 of the FP6 EU-funded FOOTPRINT project 18.
- Juraske R, Antón A, Castells F, 2008. Estimating half-lives of pesticides in/on vegetation for use in multimedia fate and exposure models. *Chemosphere* 70: 1748-1755.
- Kennedy MC, Butler Ellis MC, Miller PCH, 2012. BREAM: A probabilistic Bystander and Resident Exposure Assessment Model of spray drift from an agricultural boom sprayer. *Comput Elec Agric* 88: 63-71.
- Kennedy MC, Butler Ellis MC, 2016 (en ligne). Probabilistic modelling for bystander and resident exposure to pesticides using the Browse software. Biosyst Eng.
- Khaledian MR, Mailhol JC, Ruelle P, Mubarak I, 2012. Impacts of direct seeding into mulch on the yield, water use efficiency and nitrogen dynamics of corn, sorghum and durum wheat. *Irrig Drain* 61: 398-409.
- Lammoglia SK, Moeys J, Barriuso E, Larsbo M, Marín-Benito JM, Justes E, Alletto L, Ubertosi M, Nicolardot B, Munier-Jolain N, Mamy L, 2016a. Sequential use of the STICS crop model and the MACRO pesticide fate model to simulate pesticides leaching in cropping systems. *Environ Sci Pollut R* DOI 10.1007/s11356-016-6842-7.
- Lammoglia SK, Makowski D, Moeys J, Justes E, Barriuso E, Mamy L, 2016b. Sensitivity analysis of the STICS-MACRO model to identify cropping practices reducing pesticides losses. *Sci Tot Environ* DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.10.010
- Lammoglia SK, Brun F, Moeys J, Quemar T, Barriuso E, Gabrielle B, Mamy L, en préparation (a). Modelling pesticides leaching in cropping systems: effect of uncertainties in soil, climate and pesticide properties, and in agricultural practices.
- Lammoglia SK, Kennedy MC, Hart ADM, Barriuso E, Alletto L, Justes E, Munier-Jolain N, Mamy L, en préparation (b). Assessment and comparison of the risks for human health of pesticides programmes used in conventional and innovative cropping systems.
- Larsbo M, Jarvis NJ, 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.
- Lascano RJ, Baumhardt RL, 1996. Effects of Crop Residue on Soil and Plant Water Evaporation in a Dryland Cotton System. *Theor Appl Climatol* 54: 69-84.
- Leistra M, van der Linden AMA, Boesten JJTI, Tiktak A, van den Berg F, 2001. PEARL model for pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems: description of the processes. *Alterra Rep* 13. The Netherlands: Wageningen University and Research Centre, Wageningen, 115 p.
- Li QQ, Chen YH, Liu MY, Zhou XB, Yu SL, Dong BD, 2008. Effects of irrigation and straw mulching on microclimate characteristics and water use efficiency of winter wheat in North China. *Plant Prod Sci* 11: 161-170.
- Louie MJ, Shelby PM, Smesrud JS, Gatchell LO, Selker JS, 2000. Field evaluation of passive capillary samplers for estimating groundwater recharge. *Water Resour Res* 36: 2407-2416.
- Mc Call PJ, Swann RL, Laskowski DA, Unger SM, Vrona SA, Dishburger HJ, 1980. Estimation of chemical mobility in soil from liquid chromatographic retention times. *Bull Environ Contam Toxicol* 24: 190-195.
- McGrath GS, Hinz C, Sivapalan M, 2009. A preferential flow leaching index. *Water Resour Res* 45.
- Mamy L, Gabrielle B, Barriuso E, 2010. Comparative environmental impacts of glyphosate and conventional herbicides when used with glyphosate-tolerant and non-tolerant crops. *Environ Pollut* 158: 3172-3178.
- Marín-Benito JM, 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. *Sci Tot Environ*, 499: 533-545.
- Marín-Benito JM, Alletto L, Barriuso E, Bedos C, Benoit P, Pot V, Mamy L, en préparation. Modelling the fate of pesticides in conservation tillage systems: case study of S-metolachlor in maize monoculture.
- Moertl M, Orsolya K, Darvas B, Klatyik S, Vehovszky A, Gyori J, Szekacs A, 2016. Study on soil mobility of two neonicotinoid insecticides. *J Chem* 4546584.
- Moeys J, Larsbo M, Bergström L, Brown CD, Coquet Y, Jarvis NJ, 2012. Functional test of pedotransfer functions to predict water flow and solute transport with the dual-permeability model MACRO. *Hydrol Earth Syst Sci* 16: 2069-2083.
- Morris MD, 1991. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33: 161-174.
- Munier-Jolain N, Deytieux V, Guillemin JP, 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. *Innov Agro* 3: 75-88.
- Nash JE, Sutcliffe JV, 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I: a discussion of principles. *J Hydrol* 10: 282-290.
- 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. *Agric Ecosyst Environ* 224: 145-156.
- PPDB, 2016. The FOOTPRINT pesticide properties database. UK: University of Hertfordshire [<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/es/index2.htm>].
- Rawls WJ, Brakensiek DL, Saxton KE, 1982. Estimation of soil water properties. *Trans ASAE*, 1316-1320. [article No. 81-2510].
- Regitano JB, Koskinen WC, 2008. Characterization of nicosulfuron availability in aged soils. *J Agric Food Chem*, 56: 5801-5805.
- RIVM, VROM, VWS, 1998. Uniform System for the Evaluation of Substances 2.0 (USES 2.0). RIVM report no. 679102044, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), Ministry of Health, Welfare and Sport (VWS).
- Šimůnek J, van Genuchten MTh, Šejna M, 2008. Development and applications of HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone J*, 7: 587-600.

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - RAPPORT SCIENTIFIQUE

- Šimůnek J, Sejna M, van Genuchten MT, 1999. The Hydrus-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMC - TPS - 53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 251pp.
- Smith J, Smith P, Addiscott T, 1996. Quantitative methods to evaluate and compare soil organic matter (SOM) models. NATO ASI Series, 38: 181-199.
- Sun HY, Shao LW, Liu XW, Miao WF, Chen SY, Zhan XY, 2012. Determination of water consumption and the water-saving potential of three mulching methods in a jujube orchard. Eur J Agron 43: 87-95.
- Thiamethoxam 600 g/L FS, Notification of an active substance under Commission Regulation (EU) 844/2012. Document MC-P Section 9. Fate and behaviour in the environment. Oct. 2015, 49p.
- Vereecken H, 2005. Mobility and leaching of glyphosate: a review. Pest Manage Sci 61: 1139-1151.
- Wester RC, Maibach HI, 1985. In vivo percutaneous absorption and decontamination of pesticides in humans. J Toxicol Environ Health 16: 25-37.
- Wösten JHM, Lilly A, Nemes A, Le Bas C, 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 90: 169-185.

Annexes

Annexe 1.

Propriétés hydrodynamiques des sols de Dijon, Auzeville et Lamothe

Tableau A1.1. Propriétés hydrauliques des sols de Dijon, Auzeville et Lamothe. Les paramètres présentés ont été estimés avec RETC (van Genuchten et al., 1991) à partir de la granulométrie et de la densité des sols. CAC : teneur en eau à la capacité au champ à pF 2 ; pFp : teneur en eau au point de flétrissement permanent, θ_s : teneur en eau à saturation ; θ_r teneur en eau résiduelle ; XMPOR : teneur en eau au potentiel matriciel à la limite entre macropores et micropores ; Ksat : conductivité hydraulique à saturation ; KSM : conductivité hydraulique à la limite entre macropores et micropores ; α et n : paramètres de van Genuchten. S1 : Système de référence ; S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert ; S3 : PI sans désherbage mécanique ; S4 : PI typique ; S5 : Sans herbicide ; BI : Bas intrants ; BI-CI : Bas intrants, culture intermédiaires ; TBI : Très bas intrants ; TBI-CI : Très bas intrants, cultures intermédiaires ; MM_{Conv} : Système de référence ; MM_{BI} : Bas intrants ; RC : Rotation courte.

Site	Système	Horizon (cm)	CAC (%)	pFp (%)	θ_s (%)	θ_r (%)	XMPOR (%)	Ksat (m j ⁻¹)	KSM (m j ⁻¹)	α (cm ⁻¹)	n
Dijon	S1	0-31	39.75	13.85	46.97	9.24	44.40	0.087	0.013	0.0097	1.456
		31-65	40.14	15.60	48.32	9.77	44.05	0.088	0.005	0.0128	1.371
		65-91	41.87	17.90	50.17	10.15	45.60	0.189	0.007	0.0145	1.317
	S2	0-23	41.57	15.57	49.96	9.84	46.58	0.119	0.619	0.0120	1.399
		23-48	35.57	14.86	41.85	8.92	39.31	0.023	0.078	0.0118	1.348
		48-81	38.85	15.55	46.28	9.57	42.38	0.052	0.128	0.0124	1.364
	S3	0-21	39.00	13.68	45.88	9.21	43.32	0.064	0.009	0.0100	1.439
		21-44	38.37	14.90	45.46	9.40	42.59	0.048	0.004	0.1170	1.381
		44-77	38.27	16.12	45.62	9.54	41.71	0.050	0.002	0.0134	1.335
	S4	0-13	44.34	14.14	44.34	9.15	41.75	0.041	0.005	0.0107	1.403
		13-29	46.53	14.00	46.53	9.40	43.77	0.065	0.008	0.0131	1.417
		29-75	48.87	16.20	48.87	9.87	44.50	0.089	0.005	0.0131	1.364
	S5	0-21	36.90	15.00	43.58	9.18	40.88	0.032	0.003	0.0118	1.362
		21-41	42.15	16.80	50.90	10.35	46.28	0.148	0.008	0.0133	1.365
		41-68	39.71	15.10	47.87	9.70	43.67	0.085	0.005	0.0127	1.374
Auzeville	BI	0-30	31.14	10.00	38.24	6.32	37.28	0.067	0.0180	0.0115	1.4539
		30-60	37.88	11.80	45.17	8.14	43.86	0.152	0.0430	0.0094	1.5058
		60-90	31.00	12.50	38.43	6.89	36.40	0.051	0.0044	0.0167	1.3265
		90-110	27.80	13.00	34.80	5.64	32.40	0.050	0.0016	0.0247	1.2440
	BI-CI	0-30	36.43	10.70	43.98	7.41	42.60	0.163	0.045	0.0099	1.509
		30-60	37.50	11.80	44.50	8.39	42.85	0.107	0.024	0.0096	1.485
		60-90	32.57	11.40	40.20	7.18	38.42	0.0065	0.010	0.0132	1.408
		90-110	33.57	10.80	40.06	7.37	38.60	0.057	0.014	0.0099	1.467
	TBI	0-30	31.33	13.00	37.55	7.29	35.58	0.027	0.0023	0.0140	1.323
		30-60	33.00	12.20	39.61	7.76	37.66	0.038	0.0045	0.0125	1.370
		60-90	30.40	12.80	35.78	7.12	34.13	0.017	0.0016	0.0126	1.302
		90-110	32.14	9.00	37.20	6.26	36.69	0.063	0.0027	0.0076	1.537
	TBI-CI	0-30	32.10	12.40	38.70	7.36	36.73	0.037	0.0042	0.0128	1.370
		30-60	35.00	12.60	41.75	8.25	39.17	0.052	0.0059	0.0110	1.418
		60-90	35.00	10.80	40.31	7.58	39.43	0.056	0.0192	0.0077	1.523
90-110		32.85	9.00	37.63	6.74	37.14	0.048	0.0209	0.0074	1.526	
Lamothe	MM _{Conv}	0-10	35.20	11.70	41.44	8.02	39.90	0.055	0.012	0.0095	1.464
		10-30	35.20	12.00	41.90	8.25	40.16	0.054	0.0095	0.0105	1.434
		30-60	34.30	12.70	40.59	8.13	38.19	0.039	0.0044	0.0107	1.409
		60-100	33.80	15.00	39.89	8.44	37.25	0.027	0.0015	0.0136	1.307

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - ANNEXES

	MM_{BI}	0-10	35.33	14.08	41.73	8.69	39.21	0.034	0.0032	0.0113	1.377
		10-30	34.85	13.02	40.98	8.37	38.58	0.035	0.0039	0.0107	1.400
		30-60	36.00	15.50	42.46	9.02	38.90	0.033	0.0015	0.0132	1.322
		60-90	34.50	16.50	40.33	8.77	37.10	0.023	0.0007	0.0144	1.275
	MM_{TS}	0-5	Nd	26.80	76.66	10.00	75.60	0.0792	0.007	0.013	1.204
		5-15	Nd	22.00	42.00	10.00	41.30	2.369	0.007	0.022	1.111
		15-35	Nd	21.60	44.50	10.00	43.50	3.024	0.007	0.026	1.121
		35-65	Nd	27.70	38.50	10.00	38.10	1.061	0.005	0.018	1.072
		65-105	Nd	28.70	38.20	10.00	37.90	0.348	0.004	0.014	1.058
	RC	0-10	37.85	16.30	45.22	9.46	41.20	0.056	0.0023	0.0139	1.327
		10-30	37.85	16.30	45.23	9.46	41.24	0.056	0.0023	0.0139	1.326
		30-60	35.75	17.50	42.08	9.10	38.50	0.035	0.0009	0.0154	1.265
		60-90	34.80	17.70	41.08	8.88	37.40	0.046	0.0087	0.0174	1.243

Annexe 2. Caractéristiques des cultures

Tableau A2.1. Hauteur, LAI et enracinement maximums des différentes cultures pour le paramétrage de MACRO et PRZM. Dans le cas du modèle PEARL, les valeurs sont laissées par défaut.

Culture	Hauteur maximale (cm)	Profondeur d'enracinement maximal (cm)	LAI maximum (m ² m ⁻²)
Avoine d'hiver	140 ^a	110 ^b	5 ^b
Avoine + Vesce + Phacélie	140 ^a	110 ^b	5 ^b
Betterave sucrière	60 ^c	80 ^b	5 ^b
Blé dur d'hiver	120 ^c	110 ^b	5 ^b
Blé dur + Pois	120 ^c	110 ^b	5 ^b
Blé tendre d'hiver	120 ^c	110 ^b	5 ^b
Colza d'hiver	150 ^d	110 ^b	5 ^b
Féverole d'hiver	120 ^e	110 ^b	5 ^b
Féverole de printemps	120 ^e	110 ^b	5 ^b
Luzerne	60 ^a	150 ^f	4 ^g
Luzerne + Trèfle d'Alexandrie	60 ^a	150 ^f	4 ^g
Maïs	250 ^a	110 ^b	5 ^b
Moutarde + Vesce	30 ^a	30 ^a	2 ^a
Orge d'hiver	70 ^h	110 ^b	5 ^b
Orge de printemps	70 ^h	110 ^b	5 ^b
Phacélie + Avoine	30 ^a	30 ^a	2 ^a
Phacélie + Vesce	25 ^a	30 ^a	2 ^a
Ray grass hybride	40 ^a	50 ^a	3 ^a
Ray grass hybride + Trèfle	40 ^a	50 ^a	3 ^a
Soja	80 ^c	80 ^b	4 ^b
Sorgho	250 ^c	110 ^b	5 ^b
Tournesol	160 ^c	110 ^b	4 ^g
Tournesol + Luzerne + Trèfle	160 ^c	150 ^f	5 ^g
Tournesol + Soja	160 ^c	110 ^b	5 ^b
Trèfle d'Alexandrie	20 ^a	50 ^a	2 ^a
Trèfle incarnat	40 ^a	50 ^a	3 ^a
Vesce + Avoine	30 ^a	30 ^a	2 ^a
Triticale	90 ⁱ	110 ^b	5 ^b
Triticale + Féverole	120 ^e	110 ^b	5 ^b
Triticale + Pois	90 ⁱ	110 ^b	5 ^b

^a Mesures

^b Jarvis et al. (2007)

^c D'après STICS (Brisson et al., 1998)

^d Terra Inovia (2012, 2014)

^e Arvalis (2013)

^f Jugement d'xpert

^g FOCUS (2000)

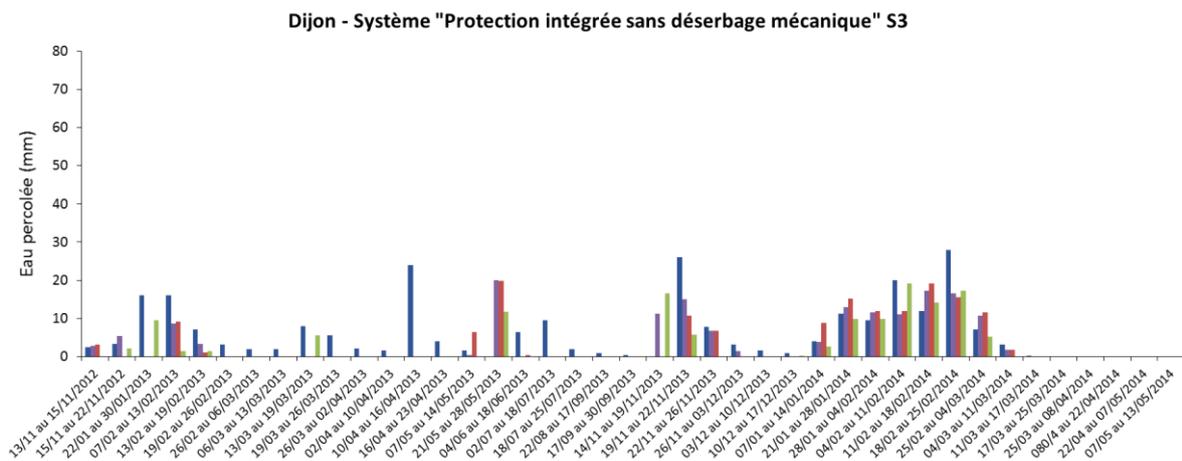
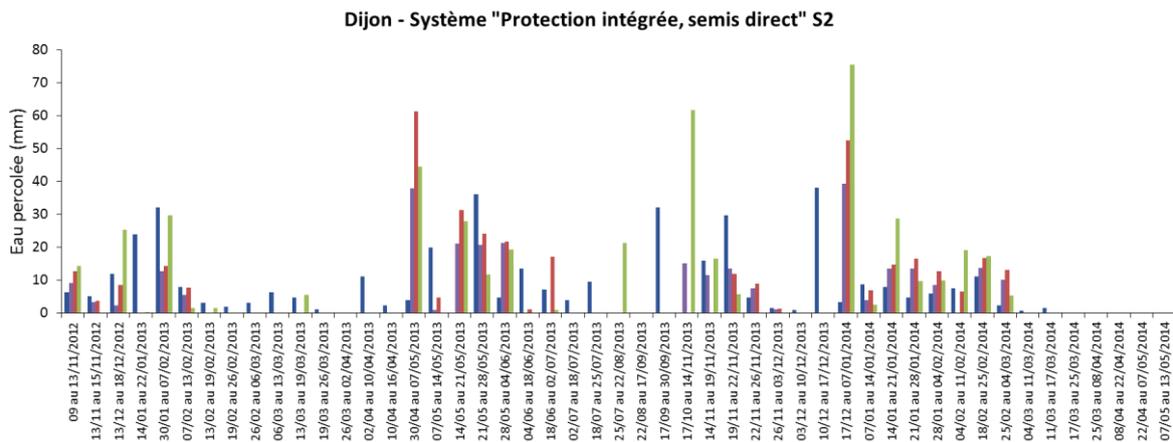
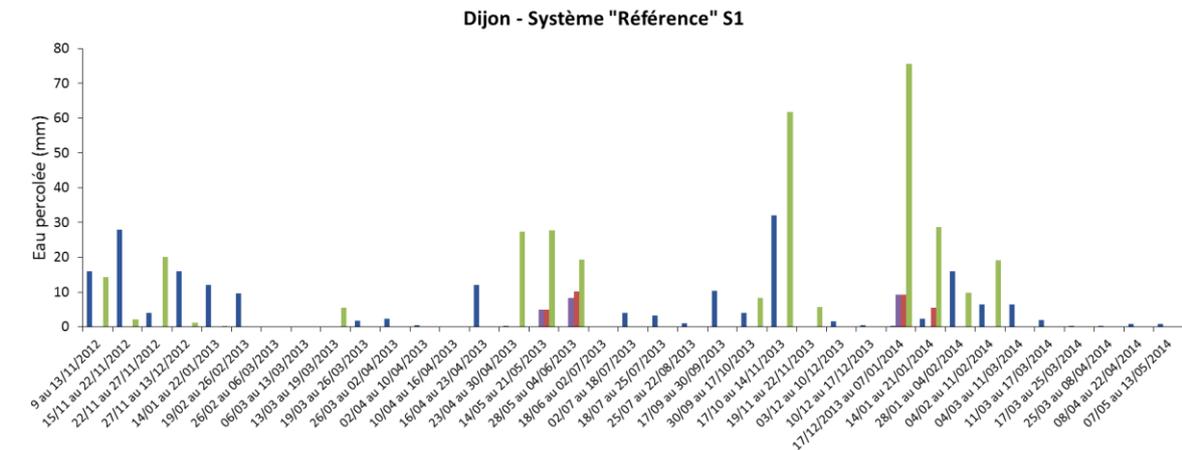
^h GNIS (2008)

ⁱ Prieur et Lafont (2011)

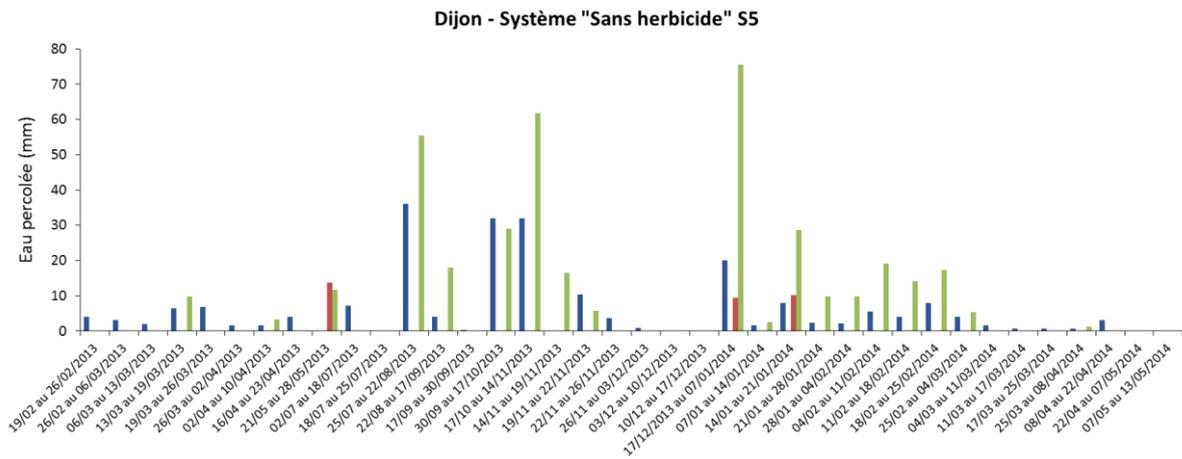
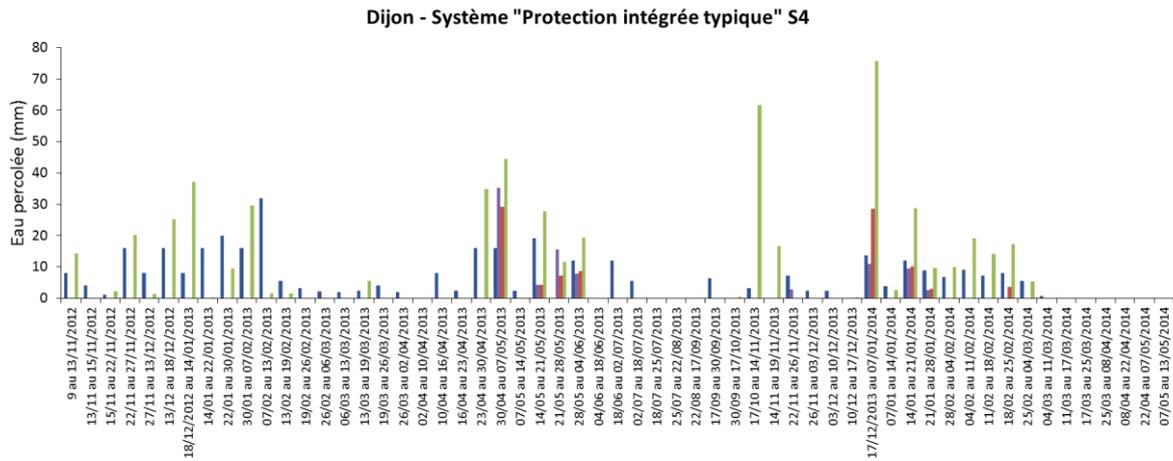
Annexe 3.

Tâche 1. Test de la performance des modèles : représentations graphiques des quantités d'eau percolées observées et simulées

Figure A3.1. Quantités d'eau percolées, systèmes expérimentés à Dijon, basés sur une rotation « colza-blé-orge ». ■ Observations, ■ MACRO, ■ PEARL, ■ PRZM.

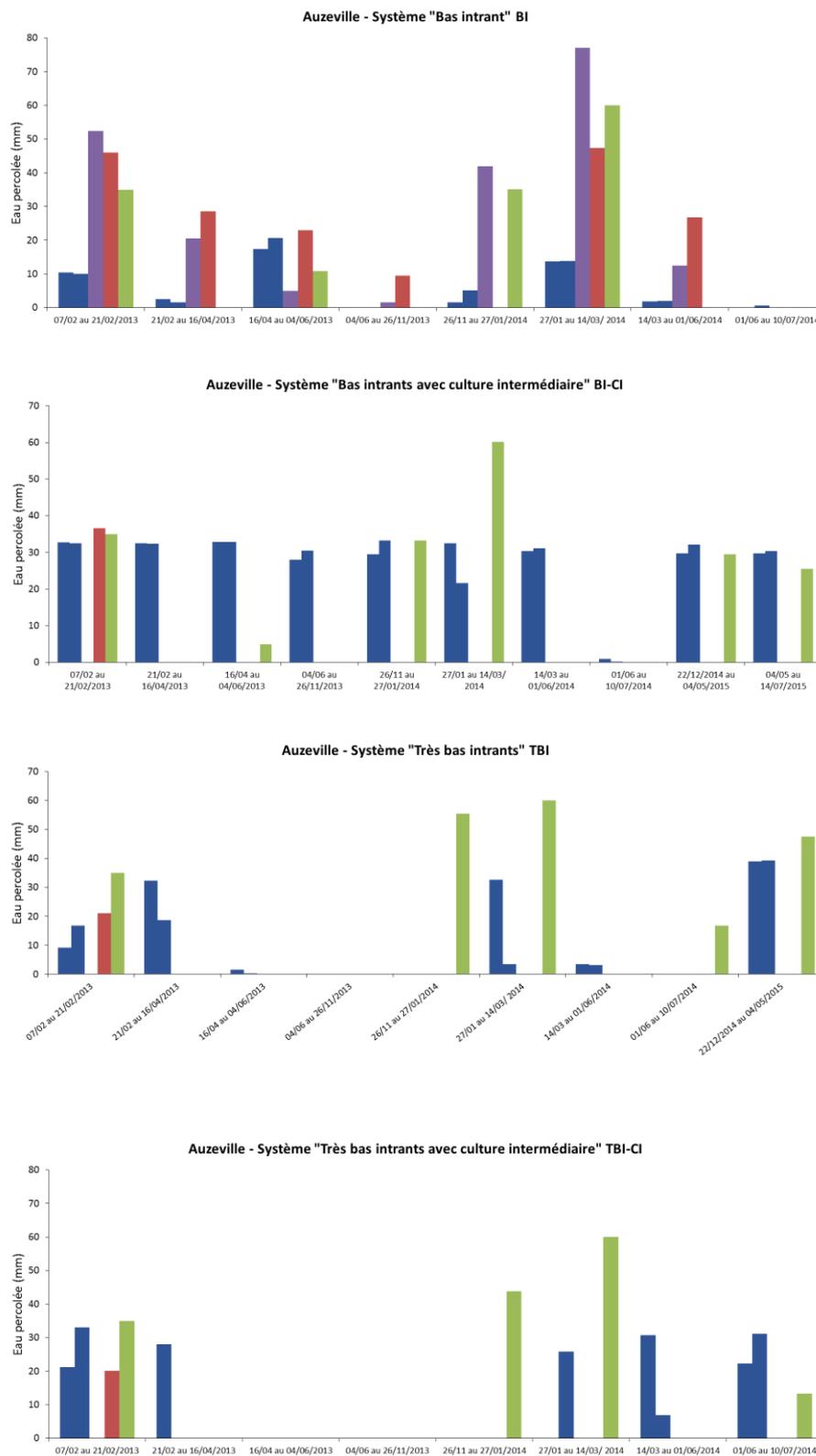


Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - ANNEXES



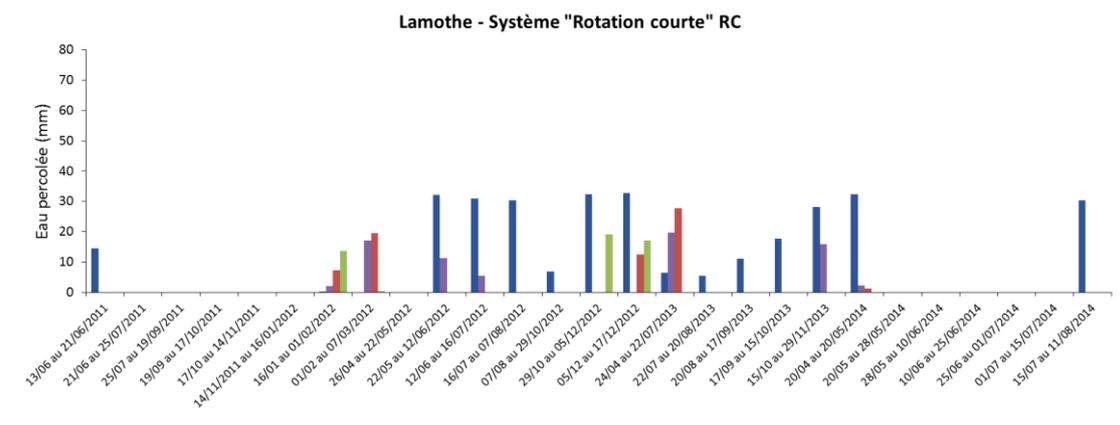
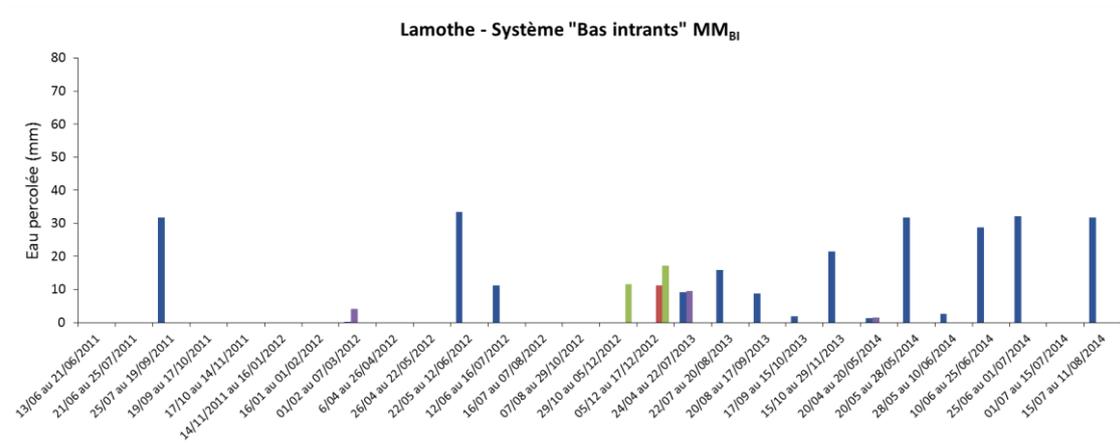
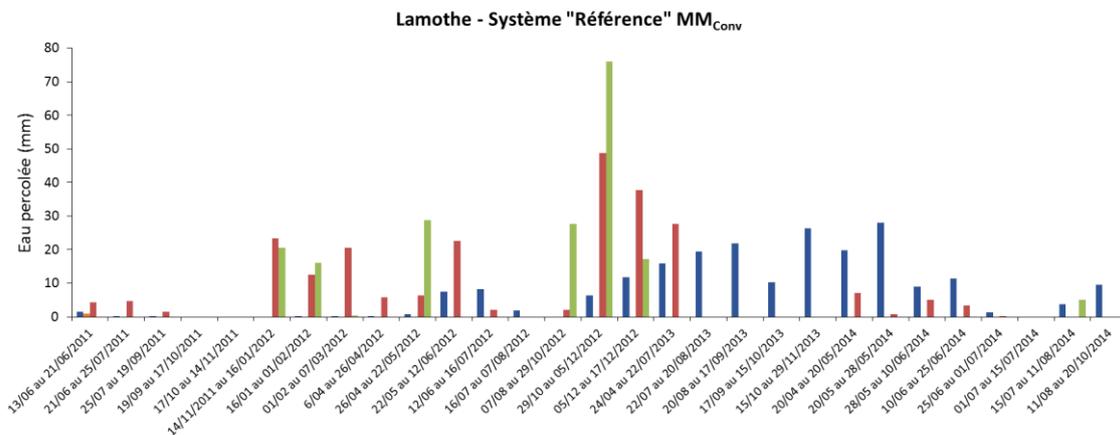
Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - ANNEXES

Figure A3.2. Quantités d'eau percolées, systèmes expérimentés à Auzeville, basés sur une rotation « blé dur-tournesol » en sec. ■ Observations, ■ MACRO, ■ PEARL, ■ PRZM.



Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - ANNEXES

Figure A3.3. Quantités d'eau percolées, systèmes expérimentés à Lamothe, basés sur une monoculture de maïs irriguée. ■ Observations, ■ MACRO, ■ PEARL, ■ PRZM.



Annexe 4.

Tâche 1. Test de la performance des modèles à simuler les quantités d'eau percolées : quantités d'eau percolées et indices statistiques

Tableau A4.1. Quantités totales d'eau percolées, observées et simulées. Deux hypothèses de calcul sont présentées dans les cas de MACRO et PEARL : (1) toutes les valeurs simulées sont retenues « Totalité », (2) seules les valeurs correspondant à potentiel matriciel (ψ) « $\psi > -70$ cm » (Dijon) ou « $\psi > -100$ cm » (Auzeville, Lamothe) sont retenues. S1 : Système de référence ; S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert ; S3 : PI sans désherbage mécanique ; S4 : PI typique ; S5 : Sans herbicide ; BI : Bas intrants ; BI-CI : Bas intrants, culture intermédiaires ; TBI : Très bas intrants ; TBI-CI : Très bas intrants, cultures intermédiaires ; MM_{Conv} : Système de référence ; MM_{BI} : Bas intrants ; RC : Rotation courte.

Site	Système	Observations (mm)	Simulations (mm)		
			MACRO	PEARL	PRZM
Dijon					
$\psi > -70$ cm	S1	195	23	30	327
	S2	399	286	370	456
	S3	253	161	154	133
	S4	358	89	95	547
	S5	219	0	33	395
Totalité	S1	195	338	402	327
	S2	399	475	557	456
	S3	253	226	232	133
	S4	358	568	549	547
	S5	219	259	321	395
Auzeville					
$\psi > -100$ cm	BI	47 – 54	211	181	141
	BI-CI	279 – 277	69	37	163
	TBI	120 – 82	0	21	215
	TBI-CI	102 – 97	0	20	152
Totalité	BI	47 – 54	223	187	141
	BI-CI	279 – 277	304	338	163
	TBI	120 – 82	196 – 183	317 – 311	215
	TBI-CI	102 – 97	259	261	152
Lamothe					
$\psi > -100$ cm	MM _{Conv}	215	247	236	192
	MM _{BI}	262	15	11	29
	RC	311	73	68	50
Totalité	MM _{Conv}	215	313	258	192
	MM _{BI}	262	80	121	29
	RC	311	121	91	50

Evaluation et comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : lien entre pratiques, pressions et impacts - ANNEXES

Tableau A4.2. Indices statistiques permettant d'évaluer la performance de MACRO, PEARL et PRZM à simuler les quantités d'eau percolées dans les différents systèmes de culture expérimentés à Dijon et Lamothe : efficacité (EF), coefficient de la masse résiduelle (CRM) et erreur quadratique moyenne (RMSE). S1 : Système de référence ; S2 : Protection intégrée (PI) sans labour en semis direct sous couvert ; S3 : PI sans désherbage mécanique ; S4 : PI typique ; S5 : Sans herbicide ; BI : Bas intrants ; BI-CI : Bas intrants, culture intermédiaires ; TBI : Très bas intrants ; TBI-CI : Très bas intrants, cultures intermédiaires ; MM_{Conv} : Système de référence ; MM_{BI} : Bas intrants ; RC : Rotation courte.

Site	Système	Modèle	EF	RMSE	CRM	
Dijon	S1	MACRO	-1.39	226	-0.74	
		PEARL	-2.43	271	-1.06	
	S2	MACRO	-1.24	185	-0.19	
		PEARL	-1.89	211	-0.39	
	S3	MACRO	0.228	105	0.11	
		PEARL	0.200	107	0.09	
	S4	MACRO	-1.70	176	-0.59	
		PEARL	-2.09	188	-0.53	
	S5	MACRO	0.25	134	-0.18	
		PEARL	-0.55	192	-0.46	
	Auzeville	C1	MACRO	-3.95 / -3.48	227 / 247	-1.53 / -1.67
			PEARL	-5.34 / -4.19	257 / 266	-1.55 / -1.69
		C2	MACRO	0.29 / -0.63	100 / 177	-0.63 / -1.23
			PEARL	-2.28 / -1.99	216 / 240	-1.64 / -2.80
		F1	MACRO	-23.9 / -19.6	540 / 472	-3.70 / -3.15
PEARL			-11.4 / -9.57	381 / 388	-2.95 / -2.49	
F2		MACRO	-0.92 / -0.84	45 / 46	-0.09 / -0.09	
		PEARL	-2.22 / -1.99	58 / 59	-0.21 / -0.22	
Lamothe		MM _{Conv}	MACRO	-2.23	207	-0.45
			PEARL	-2.29	209	-0.20
		MM _{BI}	MACRO	-0.37	155	0.70
			PEARL	-0.59	167	0.54
	RC	MACRO	-0.39	134	0.61	
		PEARL	-0.80	153	0.71	

Annexe 5.

Tâche 2. Effet de la variabilité des pratiques agricoles sur les quantités d'eau percolées et les concentrations en pesticides

Tableau A5.1 Paramètres de STICS et intervalles de valeurs correspondants pour l'analyse des effets des pratiques agricoles sur les flux d'eau et les concentrations en pesticides (Lammoglia et al., 2016b)

Paramètre	Unité	Maïs		Blé d'hiver	
		Min	Max	Min	Max
CsurNres ^b	(-)	10	125	10	125
deneng ^a	(-)	0.05	0.2	0.05	0.2
densite ^a	plants/m ²	5	20	200	400
eaures ^a	% poids frais	0	100	0	100
engamm ^a	(-)	0.5	1	0.5	1
Hinit1 ^a	%	0	30	0	30
Hinit2 ^a	%	0	30	0	30
Hinit3 ^a	%	0	30	0	30
Hinit4 ^a	%	0	30	0	30
Hinit5 ^a	%	0	30	0	30
iplt0 ^a	Jour Julien	90 (Early)	129 (Late)	275 (Early)	323 (Late)
julres ^a	Jour Julien	iplt0 - 14	iplt0 - 2	iplt0 - 14	iplt0 - 2
jultrav ^a	Jour Julien	iplt0 - 14	iplt0 - 2	iplt0 - 14	iplt0 - 2
Ninit1 ^a	kgN/ha	0	30	0	30
Ninit2 ^a	kgN/ha	0	30	0	30
Ninit3 ^a	kgN/ha	0	30	0	30
Ninit4 ^a	kgN/ha	0	30	0	30
Ninit5 ^a	kgN/ha	0	30	0	30
Nminres ^a	% poids frais	0	10	0	10
Norgeng ^a	kgN/ha	0.2	42	0.2	42
pgrainmaxi ^a	g	0.24	0.36	0.24	0.36
profres ^c	cm	0	30	0	30
profsem ^b	cm	1	10	1	10
proftrav ^b	cm	0	30	0	30
qres ^b	t/ha	0	30	0	30
ratiol ^a	(-)	0.2	1	0.2	1
ratiolN ^a	(-)	0.2	1	0.2	1
stamflax ^a	Degré jour	390	600	390	600
stdrpmat ^a	Degré jour	570	780	570	780
stlaxsen ^a	Degré jour	680	800	680	800
stlevamf ^a	Degré jour	190	310	190	310
stsenlan ^a	Degré jour	180	300	180	300
voleng ^a	(-)	0	0.35	0	0.35

^a Jugement d'expert

^b Ruget et al. (2002)

^c Limites imposées par STICS

Références citées dans les annexes

- Arvalis, 2013. https://www.arvalis-infos.fr/retrouvez-toutes-les-preconisations-pour-la-campagne-2013/2014-dans-le-guide-quoi-de-neuf--@/14265/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.html?id=22887&prop=file
- Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy M-H, Ruget F, Gate P, Devienne-Barret F, Antonioletti R, Durr C, Nicoullaud B, Richard G, Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plenet D, Cellier P, Machet JM, Meynard J-M, Delécolle R, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346.
- FOCUS, 2000. "FOCUS groundwater scenarios in the EU review of active substances". Report of the FOCUS Groundwater Scenarios Workgroup, EC Document Reference Sanco/321/2000 rev.2, 202p.
- van Genuchten MT, Leij FJ, Yates SR, 1991. The RETC code for quantifying hydraulic functions of unsaturated soils. Technical Report IAG-DW12933934. US Salinity Laboratory, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Riverside, CA.
- GNIS, 2008. <http://www.semencemag.fr/ouverturepdf.php?file=cultiver-orge-fabriquer-malt-1448636107.pdf>
- Jarvis N, Lindahl A, Messing I, Stenemo F, Hollis J, Reichenberger S, Dubus IG, 2007. Algorithm to completely parameterise MACRO from basic soil property data. Report DL21 of the FP6 EU-funded FOOTPRINT project [www.eu-footprint.org], 18p.
- Prieur L, Laffont L, 2011. Résultats de l'essai variétés de triticale en agriculture biologique - Campagne 2010-2011. CREAB Midi-Pyrénées, 13p.
- Ruget F, Brisson N, Delécolle R, Faivre R, 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie* 22: 133-158.
- Terres Inovia, 2012. http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/regions/Est/2012/OLEOmail/OLEOmail_2012_08_16_varietes_colza_resultats_definitifs3.pdf
- Terres Inovia, 2014. <http://www.myvar.fr/uploads/media/document/0001/01/c9b9c79d86ea175e36218e2a0817d0d716717aa8.pdf>

ANNEXE : TEXTES DES PUBLICATIONS

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).

Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

Merci de joindre des tirés à part, et d'indiquer les restrictions éventuelles en termes de droits de reproduction (notamment sur le site Internet du MEDDE). Notez que ce rapport pourra être mis en ligne sur le site Internet du MEDDE.

- [1] Marín-Benito JM, 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.
- [2] Alletto L, Pot V, Giuliano S, Costes M, Perdrieux F, Justes E, 2015. Temporal variation of soil physical properties improves the water dynamics modelling in a conventionally-tilled soil. *Geoderma*, 243-244 : 18-28.
- [3] Lammoglia SK, Moeys J, Barriuso E, Larsbo M, Marín-Benito JM, Justes E, Alletto L, Ubertosi M, Nicolardot B, Munier-Jolain N, Mamy L, 2016a. 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* (en ligne). DOI 10.1007/s11356-016-6842-7
- [4] Lammoglia SK, Makowski D, Moeys J, Justes E, Barriuso E, Mamy L, 2016b. Sensitivity analysis of the STICS-MACRO model to identify cropping practices reducing pesticides losses. *Science of the Total Environment* (en ligne). DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.10.010
- [5] Giuliano S, Ryan MR, 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.
- [6] Benoit P, Alletto L, Barriuso E, Bedos C, Garnier P, Mamy L, Pot V, Réal B, Vieublé-Gonod L, 2014. Travail du sol et risques de transferts de produits phytosanitaires. In *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*. Labreuche J, Laurent F, Roger-Estrade J (Coords). Editions Quae, Versailles et Arvalis-Institut du Végétal, Paris. Chapitre 7, 127-141 (14 pp). (ISBN Quae 978-2-7592-2193-6 ; ISBN Arvalis 978-2-8179-0170-1).
- [7] Benoit P, 2014. Des effets multiples sur les risques de transferts : l'absence de travail du sol ne diminue pas systématiquement les transferts de produits phytos vers les eaux. Dossier « Travail du sol », *Perspectives agricoles*, 412: 50 (Juin 2014).

ANNEXE : PARTIE CONFIDENTIELLE

Les données présentées dans les annexes suivantes (Annexe AC1 à AC6) ne sont pas encore publiées et doivent donc rester strictement confidentielles (aucune diffusion n'est autorisée). Elles sont la propriété de :

- Nicolas MUNIER-JOLAIN (Site de Dijon)
UMR 1347 INRA « Agroécologie »
17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon Cedex

- Marjorie UBERTOSI (Site de Dijon)
Université Bourgogne Franche-Comté, AgroSup Dijon, UMR Agroécologie
26 bd Dr Petitjean, 21079 Dijon

- Eric JUSTES (site d'Auzeville)
UMR 1248 INRA-INP Toulouse « Agrosystèmes, agricultures, Gestion des ressources, Innovations et Ruralités » (AGIR)
Chemin de Borde-Rouge, Auzeville, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex

- Lionel ALLETTO (Site de Lamothe)
Université de Toulouse, INP-Ecole d'ingénieurs de Purpan, UMR
AGIR, 75 voie du TOEC, 31076 Toulouse