

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

IMPACT DE LA FLORE ADVENTICE SUR LA RETENTION DES PESTICIDES : DEVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICATEUR POUR L'ÉVALUATION DES SYSTEMES DE CULTURE

W. QUEYREL ⁽¹⁾ ET N. COLBACH ⁽²⁾

⁽¹⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France
(wilfried.queyrel@agrosupdijon.fr)

⁽²⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France
(Nathalie.Colbach@dijon.inra.fr)

RÉSUMÉ

Les adventices sont souvent considérées comme nuisibles, mais peuvent également être source de biodiversité. Des indicateurs ont déjà été développés à partir du modèle FLORSYS (Colbach et al., 2014) pour évaluer les systèmes de culture en terme de nuisibilité ou de bénéfice associés à la flore adventice. Nous proposons dans cette étude un nouvel indicateur pour évaluer le potentiel de rétention des pesticides par les adventices et son impact sur le transfert vers l'environnement. Il se décline en deux aspect i) efficacité de l'application des herbicides (interception des herbicides par la plante), ii) rétention des autres pesticides (insecticides et fongicides). Différents systèmes de cultures ont été simulés avec le modèle FLORSYS. Des résultats préliminaires ont été analysés à l'aide de la méthode des arbres de régression pour étudier l'impact des techniques ou combinaison de techniques culturales sur l'indicateur et évaluer les systèmes de cultures qui permettent de maximiser le potentiel de rétention des pesticides.

Mots-clés : évaluation, système de culture, pesticide, lixiviation, modélisation.

ABSTRACT

WEED FLORA IMPACT ON PESTICIDE RETENTION: DEVELOPMENT OF A NEW INDICATOR FOR CROPPING SYSTEM EVALUATION

Weeds are usually considered as harmful for crops but they are essential for biodiversity. Indicators were already developed using the model FLORSYS (Colbach et al., 2014) to evaluate the cropping system in term of harmfulness or benefits related to weed flora. We thus propose a new indicator to evaluate the potential of pesticide retention by weed flora and its impact on pesticide transfer into the environment. The indicator is divided in two parts i) herbicide application efficiency (herbicides interception by weeds), ii) plant uptake for the others pesticides. Several cropping systems have been simulated with the FLORSYS model. Preliminary results have been analyzed using the tree regression method to study the impact of cultivation technics or its combination on the indicator. We thus try to evaluate cropping system which maximize the pesticide retention potential.

Keywords: évaluation, cropping system, pesticide, leaching, modelling.

INTRODUCTION

La flore adventice est souvent considérée comme un bioagresseur nuisible pour la conduite des cultures (Oerke, 2006) alors qu'elle peut jouer un rôle important dans le maintien de la biodiversité (Wilson *et al.* 1999). Depuis le milieu du 20^{ème} siècle (Chauvel *et al.* 2012), La régulation de la flore adventice à l'aide d'herbicides a eu des conséquences importantes sur l'environnement et la qualité de l'eau (Schwarzenbach *et al.*, 2010; Malaj *et al.*, 2014). En conséquence, le cadre réglementaire a été renforcé pour la protection de la ressource (EU 2000) et la diminution des usages en pesticide notamment la directive n° 2009/128/CE du 21/10/09 et le programme ECOPHYTO en France (ATE 2014).

Dans ce contexte, agriculteurs et agronomes doivent concilier un maintien de la production tout en limitant le recours aux intrants de synthèse (Lechenet *et al.* 2014). L'évaluation des systèmes de culture (SDC) (Deytieux *et al.*, 2016) et leur conception (Bergez *et al.*, 2010; Le Bellec *et al.*, 2012; Malézieux, 2012) sont des étapes indispensables pour atteindre cet objectif.

L'évaluation de l'impact de la flore adventices dans les SDC est une démarche complexe où la modélisation est considérée comme une approche adaptée (Colbach, Biju-Duval, *et al.* 2014). Différents indicateurs ont été développés par Mézière, *et al.* (2015) pour prendre en considération les effets bénéfiques et négatifs de la flore adventice dans les SDC. Parmi ces indicateurs, aucun n'intègre l'effet des adventices sur le transfert de pesticide. Des études effectuées sur des couverts de graminées fourragères ont cependant mis en évidence un potentiel de rétention des pesticides par ces plantes (Lin *et al.*, 2008 ; Murphy *et Coats*, 2011 ; Albright *et al.*, 2013).

Dans le cadre de cette étude, nous avons développé des indicateurs permettant d'évaluer le potentiel de rétention des pesticides par la flore adventices qui est décliné en deux aspects i) efficacité de l'application des herbicides et ii) piégeage des autres pesticides (fongicides et insecticides).

Nous avons également étudiés l'impact des techniques culturales et de leur combinaison sur l'indicateur à partir de différents SDC contrastés. La méthode est présentée par la suite et un exemple est donné à partir d'un panel de SDC.

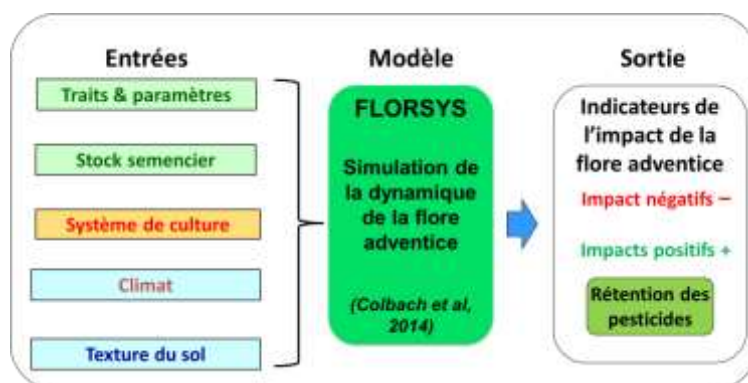
MATERIEL ET MÉTHODE

Le modèle Florsys

L'approche choisie dans cette étude est basée sur le modèle mécaniste FLORSYS (Colbach *et al.*, 2014) (Figure 1), qui simule la dynamique de la flore adventices à partir des traits d'espèce, du climat de la texture du sol et de l'itinéraire technique. Une série d'indicateur a été développée en lien avec le modèle (Mézière *et al.*, 2015a), afin d'évaluer les systèmes de culture en termes de gestion de la flore adventice (Mézière *et al.*, 2015b).

Figure 1 Schéma de fonctionnement simplifié du modèle FLORSYS (Colbach, Biju-Duval, *et al.* 2014)

A simplified scheme of the florsys model



Les nouveaux indicateurs sont associés au panel d'indicateurs déjà présents intégrant les bénéfiques (la biodiversité) et les nuisances (la perte de rendement).

LES INDICATEURS

Les indicateurs d'impact liés à FLORSYS ont été conçus de manière homogène afin de faciliter leur mise en œuvre lors d'évaluation multicritère (Mézière et al., 2015a) :

Les nouveaux indicateurs développés s'inspirent de cette approche. Ils ont pour objectif de rendre compte de la capacité des adventices à jouer un rôle de « pièges à pesticides » pour limiter le transfert des pesticides dans l'environnement, via deux processus : l'interception des pesticides par le feuillage (Linders et al., 2000) et l'absorption par le système racinaire des adventices (Sicbaldi *et al.* 1997).

Ces indicateurs ont deux finalités :

- évaluer l'efficacité des applications d'herbicide (en lien avec l'interception foliaire lors de l'application et l'absorption racinaire par la suite);
- évaluer le potentiel de rétention des autres pesticides (insecticides et fongicides).

Les deux indicateurs sont calculés sur la période comprise entre la récolte du précédent cultural et la récolte de la culture de l'année.

L'indicateur d'interception foliaire

Dans le calcul de l'indicateur, la quantité de lumière interceptée représente la fraction de pesticide interceptée par le feuillage (Kim et al., 2011). De la même manière, l'effet de l'espèce sur la capacité à retenir la substance active sur le feuillage a été négligé au regard de l'impact des adjuvants associés aux substances actives (Katagi 2008). À chaque application de pesticide, la contribution d'une plante adventice à l'interception des pesticides par le feuillage dépend uniquement de la quantité de lumière interceptée par le feuillage. Cet indicateur est calculé à chaque application de pesticide de la manière suivante :

$$I_{\text{feuillage}} = \frac{\sum_{j=Rn+1}^{Rn+1} \sum_{h=1}^{NH} \sum_{e=1}^{NE} \sum_{p=1}^{NPe} \text{surfaceTraitée}_h \cdot \text{doseRelative}_h \cdot \text{PARI}_{ep(j=\text{date}_h)} \cdot \frac{\text{surfacePlante}_{ep(j=\text{date}_h)}}{\text{surfaceSimulée}}}{\sum_{h=1}^{NH} \text{surfaceTraitée}_h \cdot \text{doseRelative}_h}$$

Avec :

$I_{\text{feuillage}}$: indicateur d'impact de la flore adventice sur la réduction de la lixiviation des pesticides par interception foliaire ;

NH, NE, NPe : correspondent respectivement aux nombres pesticides pendant la culture n (y compris interculture), d'espèces d'adventices et de plantes de l'espèce e sur l'échantillon de champ simulé ;

surfaceTraitée_h : surface relative du champ sur laquelle le pesticide a été étendue (varie en fonction du type de traitement, sur le rang ou sur l'ensemble de la parcelle) [0,1] ;

surface Simulée : surface de l'ensemble de la parcelle simulée ;

doseRelative_h : taux d'application de la solution commerciale en fonction de la dose homologuée ;

Date_h : date d'application du pesticide h ;

Rn : date de récolte de la culture n ;

$\text{SurfacePlante}_{ep(j=\text{date}_h)}$: surface (cm²) au sol de la plante p de l'espèce e au jour $j = \text{date}_h$,

e : espèce de l'adventice simulée

$\text{PARI}_{ep(j=\text{date}_h)}$: proportion [0,1] du rayonnement intercepté par la plante p de l'espèce e au jour $j = \text{date}_h$

Si aucun pesticide n'est appliqué pendant le cycle cultural l'interception foliaire n'est pas calculée.

L'indicateur d'absorption racinaire

La contribution d'une plante adventice à l'absorption par le système racinaire dépend de (1) sa surface foliaire comme substitution du potentiel de transpiration de la plante, (2) sa biomasse aérienne comme substitution de la biomasse racinaire et donc du potentiel d'absorption racinaire de l'adventice, (3) le caractère lipophile des matières actives ainsi que leur propriété d'adsorption dans le sol afin de déterminer leur mobilité potentielle (McCall et al. 1980). Dans le calcul de l'indicateur, une espèce aura un fort potentiel de rétention si elle a une surface foliaire importante et/ou si elle

transpire beaucoup et si les substances actives considérées sont lipophiles. La persistance de la matière active est également prise en considération dans le calcul de l'indicateur sur la base de la demi-vie de la molécule. L'indicateur d'absorption racinaire est ainsi calculé du jour de l'application jusqu'à la persistance maximale du pesticide :

$$I_{racines} = \frac{\sum_{j=Rn+1}^{Rn+1} \sum_{h=1}^{NH} \sum_{e=1}^{NE} \sum_{p=1}^{NP_e} leaching_j \cdot surfaceTraitée_h \cdot doseRelative_h \cdot (1 - Cmob_h) \cdot Rsd_{hj} \cdot K_h \cdot LA_{epj} \cdot BMA_{epj} / surfaceSimulée}{\sum_{j=Rn+1}^{Rn+1} \sum_{h=1}^{NH} leaching_j \cdot surfaceTraitée_h \cdot doseRelative_h \cdot (1 - Cmob_h) \cdot Rsd_{hj} \cdot K_h}$$

$I_{racines}$: indicateur du potentiel de réduction du transfert des pesticides par absorption racinaire durant la culture **n** ;

Rn : date de récolte de la culture **n** ;

NH, NE, NP_e correspondent respectivement aux nombres de pesticides, d'espèces d'adventices et de plantes de l'espèce **e** sur l'échantillon de champ simulé ;

$surfaceTraitée_h$: surface relative du champ sur laquelle pesticide a été épandue [0,1] ;

$doseRelative_h$: taux d'application de la solution commerciale en fonction de la dose homologuée ;

LA_{epj} : surface foliaire (cm²) de la plante **p** de l'espèce **e** au jour **j** (substitution du potentiel de transpiration) ;

BMA_{epj} : biomasse aérienne (g) de la plante **p** de l'espèce **e** au jour **j** (substitution de la biomasse racinaire) ;

$Cmob_h$: mobilité [0,1] du pesticide **h** dans le sol ;

Rsd_{hj} : rémanence, proportion [0,1] du pesticide **h** restant dans le sol le jour **j** ;

K_h : absorbabilité de l'herbicide **h** ;

$surfaceSimulée$: surface (cm²) de l'échantillon de champ simulé ;

$leaching_j$: jour où le lessivage est susceptible de se produire (si la capacité au champ est atteinte dans les 30 premiers cm de sol [0,1] ;

e : espèce de l'adventice simulée ;

Si aucun pesticide n'est appliqué pendant la campagne culturale [**R_{n-1}** , **R_n**] ou si aucun jour où le potentiel de lessivage n'est atteint, alors **$I_{racine} = NA$** .

Le potentiel de piégeage des pesticides par les adventices est fonction de la mobilité des substances actives dans le sol. Sur la base de la classification (McCall et al, 1980) qui regroupe les molécules en fonction de leur mobilité dans le sol. Le potentiel de mobilité est défini en fonction du coefficient de partition entre l'eau mobile et la matière organique du sol appelé Koc (mL/g). Une relation continue du potentiel de mobilité a été établie pour chaque solution commerciale à partir de la classification de McCall, et al. (1980) :

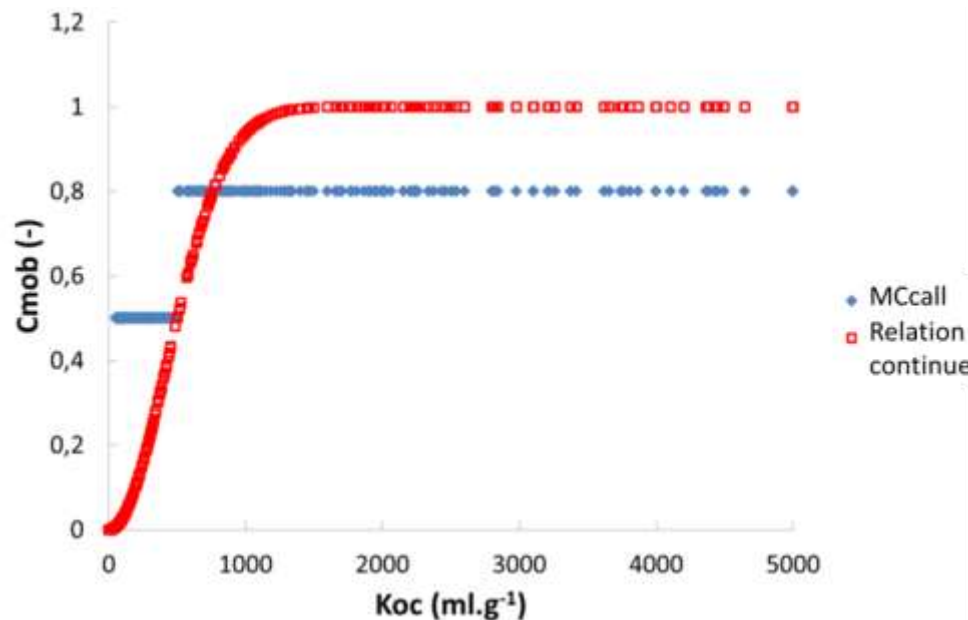
$$Cmob_h = 1 - e^{-ln2 \left(\frac{Koc_h}{Koc_{mid}} \right)^2}$$

Koc_{max} : est fixé à 5000 (mL/g) qui correspond au seuil d'immobilité des substances actives dans le sol ;

Koc_{mid} : est la valeur médiane du Koc utilisée dans la relation continue) ;

Figure 2 : Evaluation du potentiel de mobilité d'un pesticide en fonction du Koc (en rouge la relation de Weibull, en bleu seuils établis en fonction de la classification de Mccall (1980))

Evaluation of the pesticide mobility potential in the soil depending on the Koc (red Weibull equation, blue Mccall classification)



Cette nouvelle équation permet ainsi de limiter l'effet de seuil de la classification de Mccall et al., (1980) (cf. figure 2).

Le potentiel d'absorption du pesticide par la plante est défini selon le modèle établi par Briggs et al. (1982) qui considèrent que plus un pesticide est lipophile, plus il a de facilité à être capté par le système racinaire.

$$K_h = 0.784 * \exp \left(- \frac{(\log K_{ow} - 1.78)^2}{2.44} \right)$$

Kow : coefficient de partition octanol/eau qui rend compte du caractère lipophile d'un pesticide (plus il est élevé plus le pesticide est lipophile et inversement).

Pour faciliter l'interprétation de l'indicateur il pourra être normalisé au potentiel maximal de rétention et ainsi avoir une valeur bornée entre 0 et 1.

EVALUATION DES SYSTEMES DE CULTURE

Les systèmes de culture évalués

Les systèmes de culture choisis pour l'évaluation sont issus de l'essai système en protection intégrée des cultures sur le domaine expérimental de l'INRA de Dijon-Epoisses dans l'Est de la France (47°20'N, 5°2'E) (Chikowo *et al.* 2009; Deytieux *et al.* 2012). Les principales caractéristiques de ces systèmes sont présentées dans le tableau 1. Les modalités de gestion de la flore adventice sont organisées selon un gradient d'usage des herbicides, allant d'un système de référence de type agriculture raisonnée pratiquée dans la plaine Dijonnaise, au système zéro herbicide (tableau 1).

Tableau 1: Caractéristiques des systèmes de cultures évalués

Cropping systems characteristics used for this study

Nombre de SDC par modalité	Modalité du système de culture	Usage en Herbicide	Usage en fongicide + insecticide
2	Référence : <i>agriculture raisonnée</i>	++++	+++++
2	Gestion intégrée des adventices : <i>travail du sol réduit</i>	+++	++
2	Gestion intégrée des adventices : <i>sans désherbage mécanique</i>	++	++++
2	Gestion intégrée des adventices : <i>avec désherbage mécanique</i>	+	+++
2	Gestion intégrée des adventices : <i>sans herbicide</i>	0	+

Chaque SDC est caractérisé par l'utilisation d'un ou plusieurs levier(s) agronomique(s) mobilisé(s) pour une gestion intégrée de la flore adventice. Les modalités d'usage des fongicides et insecticides ne sont pas raisonnées selon le même gradient d'utilisation des herbicides.

L'analyse des stratégies techniques

Afin d'analyser les techniques et combinaisons de techniques culturales associées à une valeur d'indicateur, nous avons utilisé une approche statistique non paramétrique : la méthode CART (Breiman et al., 1984). Cette méthode basée sur des arbres de régression ou de classification permet ainsi de diviser en deux groupes un nombre d'individus de manière récursive en minimisant la variabilité au sein du sous-groupe et en maximisant la variabilité entre les deux sous-groupes formés. Cette méthode a déjà été utilisée pour d'autres indicateurs de l'impact de la flore adventice par Mézière et al. (2015a).

Protocole de simulation

Les itinéraires techniques des 10 systèmes de cultures ont été renseignés dans le modèle FLORSYS pour effectuer les simulations sur une période de 27 ans qui ont été répétées 10 fois à partir de séries climatiques différentes choisies aléatoirement. Ce protocole permet ainsi d'intégrer des effets liés à la variabilité climatique.

RESULTATS PRELIMINAIRES

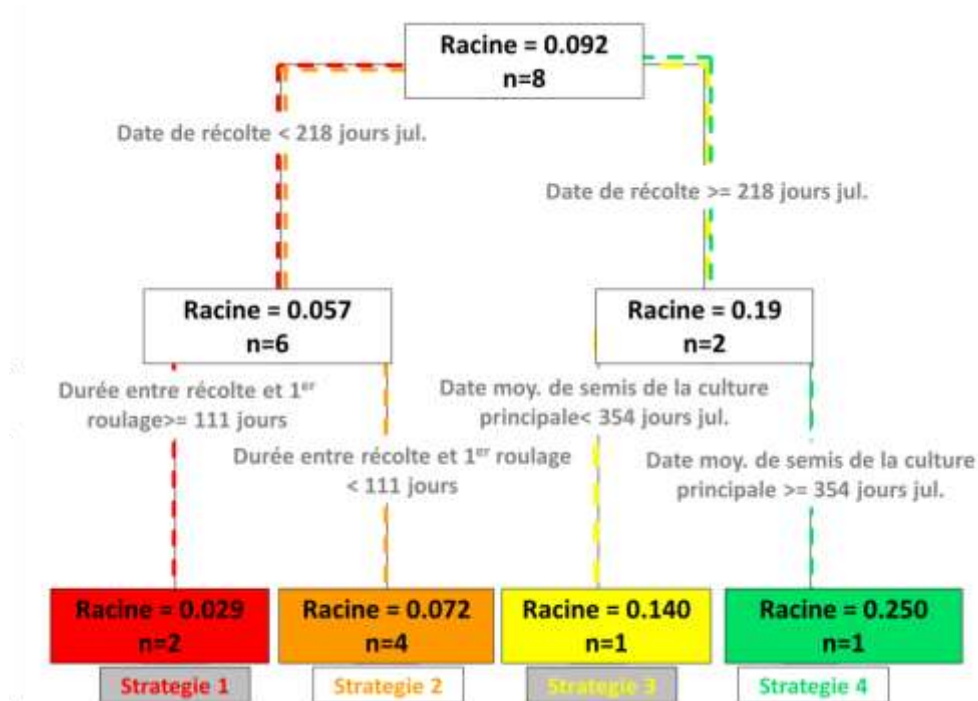
Les résultats présentés dans la partie suivante correspondent à une première étape dans l'évaluation des SDC à partir des indicateurs de rétention des pesticides par la flore adventice.

Définition des stratégies culturales

La figure 3 illustre les résultats obtenus pour l'indicateur rétention par le système racinaire des herbicides pour 8 SDC étudiés. Les deux autres systèmes n'ayant pas d'application d'herbicides n'ont pas été retenus pour le traitement des données.

Figure 3 : Effet des techniques culturales sur la rétention des herbicides par les racines des adventices (n: nombre de systèmes de culture; Racine: valeur de l'indicateur d'absorption racinaire, jour jul. : jour julien)

Impact of the cultural techniques on the pesticide root uptake (n : number of cropping system ; Racine : value of the root uptake indicator, jour jul. : julian day)



Parmi les 8 SDC, 4 stratégies se distinguent regroupées en deux groupes principaux suivant la date moyenne de récolte, en début d'été ou en fin d'été début d'automne. Les valeurs de l'indicateur racinaire pour 6 des 8 systèmes est inférieures à 0.1. Seul 2 SDC semblent être plus favorables à l'interception des herbicides par le système racinaire. Les SDC avec peu de travail du sol et une proportion importante de culture de printemps favorisent l'interception des herbicides par le système racinaire. En revanche, les SDC où le levier travail du sol est valorisé la rétention par le système racinaire est minimale.

Analyse des stratégies

Une analyse de l'ensemble des pesticides utilisés sur les SDC et pour les deux indicateurs a été réalisée. Le tableau 2 synthétise les différentes combinaisons de techniques qui maximisent ou minimisent l'interception foliaire et l'absorption racinaire des pesticides. L'interception des herbicides par le feuillage des adventices (et donc l'efficacité potentielle des herbicides foliaires) est meilleure dans les systèmes avec labour régulier, mais peu de travail du sol superficiel. L'interception des fongicides et insecticides par les racinaires adventices (et donc la réduction du transfert dans l'environnement) est maximale dans des systèmes avec peu ou pas de travail du sol et des rotations comprenant beaucoup de cultures de printemps ou des cultures d'hiver semées très tardivement.

Tableau 2 : Synthèse des combinaisons de techniques culturales permettant de minimiser ou maximiser l'interception des pesticides par la flore adventice identifiées sur l'essai "système" de l'INRA de Dijon-Epoisses

Summary of cultural technics combination, allowing to maximise or minimise pesticide interception, by weeds on the system experimentation carried out at INRA Dijon-Epoisses

Type de pesticide	Type d'interception	Nombre de stratégies	Stratégies pour obtenir l'interception	
			Minimale (-)	Maximale (+)
Herbicides	Par le feuillage	3	≥ 3.6 travaux du sol superficiels par an	< 3.6 travaux du sol superficiels par an et fréquence de labour ≥ 1 an sur 2
	Par les racines	4	Récolte avant 5 août et ≥ 111 jours entre la récolte et le premier roulage (ou pas de roulage)	Récolte après 5 août et semis après 19 décembre
Insecticides + fongicides	Par le feuillage	2	Durée de couverture des cultures (y compris temporaires et cipan) < 9 mois	Durée de couverture des cultures (y compris temporaires et cipan) ≥ 9 mois
	Par les racines	4	≥ 1.9 travaux du sol entre mars et octobre et fréquence de labour < 1 an sur 2	< 1.9 travaux du sol entre mars et octobre et semis après 22 novembre

DISCUSSION

Les résultats présentés dans cette étude sont préliminaires et nécessitent d'être davantage étayés. En effet, seules 5 modalités de SDC ont été évaluées à partir des deux indicateurs ce qui ne permet pas d'approfondir l'analyse des SDC. La méthodologie présentée permet cependant de montrer que ces indicateurs permettent de discriminer les SDC entre eux et que les techniques ou combinaisons de techniques culturales semblent avoir un effet significatif sur le potentiel de rétention des pesticides. Il est également important de préciser que ces indicateurs sont de type qualitatif et qu'il permettent seulement d'estimer un potentiel de rétention et non de le quantifier. Par ailleurs, peu de données sont disponibles dans la littérature sur l'effet de la flore adventice sur la rétention des pesticides ou d'espèces végétales proches (Lin et al., 2008 ; Murphy et Coats, 2011 ; Albright et al., 2013). De plus, l'analogie entre les adventices et un couvert d'interculture n'est pas envisageable ce qui rend difficile l'évaluation de ces indicateurs à partir de données.

CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif de développer des indicateurs permettant d'évaluer le potentiel de rétention des pesticides par la flore adventices qui se décline en deux aspects i) efficacité de l'application des herbicides et ii) piégeage des autres pesticides (fongicides et insecticides). Ces indicateurs ont été intégrés dans le modèle FlorSys. La méthode des arbres de régression a permis d'analyser l'impact des techniques culturales et de leur combinaison sur la rétention des pesticides. Par ailleurs, des simulations complémentaires vont être réalisées sur un plus grand nombre de SDC et leur analyse permettra d'identifier les systèmes de culture permettant de maximiser le rôle bénéfique de la flore adventice en termes de piégeage des pesticides, tout en limitant la nuisance associée à cette flore. Ces résultats seront combinés aux autres indicateurs d'impact de la flore adventice pour réaliser une analyse multicritère de ces systèmes de culture.

REMERCIEMENTS

Le projet a été financé dans le cadre de l'ANR CoSAC (ANR-14-CE18-0007) et par le ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt dans le cadre du plan Ecophyto 2018

BIBLIOGRAPHIE

- ATE, 2014, 'ECOPHYTO 2018.' (Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt) <http://agriculture.gouv.fr/ecophyto>.
- Le Bellec F., Rajaud A., Ozier-Lafontaine H., Bockstaller C., Malezieux E., 2012- Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. *Agronomy for Sustainable Development* **32**, 703–714.
- Bergez JE., Colbach N., Crespo O., Garcia F., Jeuffroy MH., Justes E., Loyce C., Munier-Jolain N., Sadok W., 2010- Designing crop management systems by simulation. *Cropping Systems Design: new methods for new challenges* **32**, 3–9.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J., 1984. Classification and Regression Trees. Chapman and Hall. Wadsworth, Inc., New York, USA.
- Chauvel B., Guillemain J-P., Gasquez J., Gauthier C., 2012- History of chemical weeding from 1944 to 2011 in France: Changes and evolution of herbicide molecules. *Crop Protection* **42**, 320–326.
- Chikowo R., Faloya V., Petit S., Munier-Jolain NM., 2009- Integrated Weed Management systems allow reduced reliance on herbicides and long-term weed control. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **132**, 237–242.
- Colbach N., Biju-Duval L., Gardarin A., Granger S., Guyot SHM., Mézière D., Munier-Jolain NM., Petit S., 2014- The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. *Weed Research* **54**, 541–555.
- Colbach N., Granger S., Guyot SHM., Mézière D., 2014- A trait-based approach to explain weed species response to agricultural practices in a simulation study with a cropping system model. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **183**, 197–204.
- Deytieux V., Munier-Jolain N., Caneill J., 2016- Assessing the sustainability of cropping systems in single- and multi-site studies. A review of methods. *European Journal of Agronomy* **72**, 107–126.
- Deytieux V., Nemecek T., Freiermuth Knuchel R., Gaillard G., Munier-Jolain NM., 2012- Is Integrated Weed Management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *European Journal of Agronomy* **36**, 55–65.
- EU (2000) 'Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy.'
- Katagi T., 2008- Surfactant Effects on Environmental Behavior of Pesticides. 'Rev. Environ. Contam. Toxicol.' (Ed DM Whitacre) pp. 71–177. (Springer New York)
- Kim DS., Marshall EJP., Brain P., Caseley JC., 2011- Effects of crop canopy structure on herbicide deposition and performance. *Weed Research* **51**, 310–320.

- Lechenet M., Bretagnolle V., Bockstaller C., Boissinot F., Petit M-S., Munier-Jolain NM., 2014- Reconciling Pesticide Reduction with Economic and Environmental Sustainability in Arable Farming. **9**, e97922.
- Malaj E., von der Ohe PC., Grote M., Kühne R., Mondy CP., Usseglio-Polatera P., Brack W., Schäfer RB., 2014- Organic chemicals jeopardize the health of freshwater ecosystems on the continental scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**, 9549–9554.
- Malézieux E., 2012- Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development* **32**, 15–29.
- McCall PJ., Swann RL., Laskowski DA., Unger SM., Vrona SA., Dishburger HJ., 1980- Estimation of chemical mobility in soil from liquid chromatographic retention times. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **24**, 190–195.
- Mézière D., Colbach N., Dessaint F., Granger S., 2015- Which cropping systems to reconcile weed-related biodiversity and crop production in arable crops? An approach with simulation-based indicators. *European Journal of Agronomy* **68**, 22–37.
- Mézière D., Petit S., Granger S., Biju-Duval L., Colbach N., 2015a- Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators* **48**, 157–170.
- Mézière D., Petit S., Granger S., Biju-Duval L., Colbach N., 2015b- Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators* **48**, 157–170.
- Oerke E-C., 2006- Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science* **144**, 31.
- Schwarzenbach RP., Egli T., Hofstetter TB., von Gunten U., Wehrli B., 2010- Global Water Pollution and Human Health. 'Annu. Rev. Environ. Resour. VOL 35'. (Ed Gadgil, A and Liverman, DM) Annual Review of Environment and Resources. pp. 109–136.
- Sicbaldi F., Sacchi GA., Trevisan M., Del Re AAM., 1997- Root Uptake and Xylem Translocation of Pesticides from Different Chemical Classes. *Pesticide Science* **50**, 111–119.
- Wilson JD., Morris AJ., Arroyo BE., Clark SC., Bradbury RB., 1999- A review of the abundance and diversity of invertebrate and plant foods of granivorous birds in northern Europe in relation to agricultural change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **75**, 13–30.