

# Colloque RECHERCHE

Des outils et des dispositifs pour éclairer les décisions,  
explorer les possibles et accompagner la transition vers des systèmes  
économiques et multiperformants

**Du 22 au 24 mars 2017**  
Palais des Congrès  
Saint-Malo



## ÉCOPHYTO

RÉDUIRE ET AMÉLIORER  
L'UTILISATION DES PHYTOS



# *Colloque* **RECHERCHE**

**Des outils et des dispositifs pour éclairer les décisions,  
explorer les possibles et accompagner la transition vers des systèmes  
économiques et multiperformants**

**22, 23 et 24 mars 2017**

Palais des Congrès • Le Grand Large • Saint-Malo

La présente brochure regroupe, sous forme de fiches, les résultats des projets issus de l'appel à projets de recherche Pour et Sur le Plan Ecophyto (PSPE 1) et de l'appel à projets de recherche 2011 du programme Pesticides. Ces résultats sont présentés dans le cadre du colloque des 22, 23 et 24 mars 2017.

Les résultats, sous forme d'articles d'une dizaine de pages, sont accessibles dans la revue en ligne « Innovations agronomiques » <http://www.inra.fr/ciag/revue>

---

Remerciements à tous les auteurs ainsi qu'au groupe de travail :

Enrique BARRIUSO (INRA), Carole BARTHÉLÉMY (Univ. Aix-Marseille), Thierry CAQUET (INRA),  
Fabrice DREYFUS (MAAF/CGAAER), Laurence GAMET-PAYRASTRE (INRA),  
Sonia GRIMBUHLER (IRSTEA), Christian HUYGHE (INRA), Charles MANCEAU (ANSES),  
Antoine MESSÉAN (INRA), Jérôme THIBIERGE (Bioline AgroSciences – Groupe InVivo)

---

Crédits photos © (couverture) :

Ministère chargé de l'agriculture : Xavier Remongin, Pascal Xicluna ;  
INRA : Christian Slagmulder ; Chambre régionale d'agriculture de Normandie.

Comité d'organisation :

Anne-Sophie Carpentier (MEEM-CGDD/SR), Laure Dreux (ACTA),  
Gérard Gautier-Hamon (MAAF-DGER), Robin Goffaux (FRB)

*Colloque financé sur des crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses affectés à l'Agence française pour la biodiversité pour appuyer les actions du plan Écophyto II*

# Avant-propos

Les impacts et les risques liés à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et de leurs résidus sur la santé des écosystèmes et la santé humaine engendrent une prise de conscience et une attente forte des citoyens en faveur de modèles de protection des cultures moins dépendant de ces produits et encourageant les solutions alternatives. Cette évolution nécessite la résolution de problèmes souvent complexes. Les décideurs politiques et utilisateurs de produits phytopharmaceutiques ont donc besoin, entre autres, de mieux connaître les impacts des produits phytopharmaceutiques sur l'environnement, mieux prévoir et identifier la dynamique des bioagresseurs ou avoir à leur disposition des propositions de nouveaux systèmes agronomiques ou des pratiques culturales performants à la fois sur le point de vue économique, environnemental tout en tenant compte de la santé humaine. Ce corpus de connaissances techniques doit cependant être mis en résonance avec des recherches en sciences humaines et sociales en vue d'une intégration des systèmes d'acteurs et des socio-écosystèmes pour que cette transition soit la plus efficace pour tous.

C'est pourquoi, dans le cadre du plan Écophyto I, l'axe recherche et innovation a lancé deux appels à propositions de recherche. Le premier, *Pour et sur le plan Écophyto*, lancé par le ministère chargé de l'agriculture, vise à appuyer la mise en place et l'amélioration des dispositifs emblématiques du plan que ce soit le réseau d'épidémiologie, le dispositif DEPHY (Démonstration, Expérimentation et Production de références sur les systèmes économes en pHYtosanitaires) ou le système d'indicateurs de pression et d'impact. Le second, lancé dans le cadre du programme *Évaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides* (dit programme Pesticides) du ministère chargé de l'environnement, vise à mieux évaluer les impacts des pesticides sur les services écosystémiques et à accompagner les changements des pratiques dans le but de proposer des outils de gouvernance afin d'accélérer la transition.

Ce colloque est l'occasion de restituer les résultats de vingt projets de recherche sélectionnés par le groupe d'experts recherche du plan Écophyto I et du conseil scientifique et du comité d'orientation du programme Pesticides. Il s'adresse à tous les acteurs concernés : chercheurs, enseignants-chercheurs, enseignants du technique, services centraux et déconcentrés de l'État, profession agricole, collectivités territoriales, agences, industries, associations, etc.

Les interventions seront structurées autour de quatre sessions :

- identification d'indicateurs pour l'évaluation des impacts sur la biodiversité et l'environnement ;
- appui aux dispositifs spécifiques Écophyto, DEPHY et le réseau d'épidémiologie ;
- accompagnement aux changements des pratiques agricoles ;
- évaluation de la multiperformance des systèmes de culture innovants.

Ces sessions seront complétées par autant de tables rondes qui permettront des échanges entre chercheurs, acteurs du plan et utilisateurs potentiels des résultats de recherche.

Nous espérons que ce colloque vous apportera des clés de réflexion, des méthodes et des outils pour accompagner l'évolution des pratiques et des systèmes agricoles vers une protection durable des cultures.

**Cyril Kao,**

Sous-directeur de la recherche, de l'innovation  
et des coopérations internationales  
au ministère chargé de l'agriculture

**Patrice Bueso,**

Chef par intérim du service de la recherche  
au ministère chargé de l'environnement



# Sommaire

## Identification d'indicateurs pour l'évaluation des impacts sur la biodiversité et l'environnement

- **M6P** - Modélisation des accidents de ponte chez la perdrix grise en plaine de grande culture, en relation avec l'usage agricole de produits phytopharmaceutiques, Elisabeth Bro (ONCFS) 7
- **IMPEC** - Développement d'indicateurs microbiens pour l'évaluation de l'impact des pesticides sur des fonctions écosystémiques terrestres et aquatiques, Fabrice Martin-Laurent (INRA, Agrosup Dijon) 9
- **IndRegArb** - Indicateurs biologiques d'impacts liés à la régulation naturelle des ravageurs en arboriculture fruitière, Yvan Capowiez (INRA) 11
- **EQUIPE** - Evaluation de la Qualité prédictive d'Indicateurs PEsticides et du domaine d'utilisation, Christian Bockstaller (INRA) 13

## Appui aux dispositifs spécifiques Écophyto, DEPHY et le réseau d'épidémiosurveillance

- **CASIMIR** - Développements méthodologiques pour une CARactérisation SIMplifiée des pressions biotiques et des Régulations biologiques, Vincent Cellier (INRA) 15
- **PYROFUS** - Développement d'un outil moléculaire innovant pour la caractérisation du complexe d'espèces de *Fusarium* sur blé, Anne-Laure Boutigny (ANSES) 17
- **PEBiP** - Analyse stratégique des relations Pratiques – Environnement – Bioagresseurs – Pertes de récoltes, François Brun (ACTA) 19
- **SCEP-DEPHY** - Systèmes de Culture Economes et Performants du réseau DEPHY, Nicolas Munier-Jolain (INRA) 21
- **SynOEM** - Mieux profiter de la synergie entre réseaux d'observations, expertise et modélisation pour l'élaboration du Bulletin de Santé du Végétal, François Brun (ACTA) 23
- **VESPA** - Valeur et optimisation des dispositifs d'épidémiosurveillance dans une stratégie durable de protection des cultures, Xavier Reboud (INRA) 25

## Accompagnement aux changements des pratiques agricoles

- **COUD'POUCE** - Comportement et usage des pesticides : pour des contrats environnementaux innovants, Sophie Thoyer (INRA - Montpellier Sup Agro) 27
- **PRUNUS** - Réalités et perspectives de l'écologisation en arboriculture fruitière. Pour une approche intégrant conception variétale, redéfinition des pratiques culturales, et coordination au sein du système agri-alimentaire, à partir du cas des vergers d'abricotiers et pêchers, Claire Lamine (INRA) 29
- **DidacPhyto** - Vers un enseignement de savoirs agronomiques de référence, opératoire pour des pratiques agricoles compatibles avec le plan Écophyto, Paul Olry (Agrosup Dijon) 31
- **Pestimute-Gen** - Intermédiation et transition : processus de généralisation et d'institutionnalisation d'expériences locales de réduction de pesticides, Marianne Cerf (INRA) 33
- **ALTERPHYTO** - Approches juridiques des protections alternatives contre les ennemis des cultures, Philippe Billet (Université Lyon 3) 35

## Évaluation de la multiperformance des systèmes de culture innovants

- **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, Laure Mamy (INRA) 37
- **Perform** - Approches de modélisation pour l'évaluation et la comparaison des performances environnementales de systèmes de culture innovants conçus pour réduire l'usage des pesticides : intégration spatiale et temporelle, traitement des incertitudes, Laure Mamy (INRA) 39
- **FLORSYS** - Analyse et modélisation des effets des pratiques agricoles sur les services et disservices écosystémiques dépendant des adventices – Application à l'évaluation et la conception de systèmes de culture économes en herbicides, Nathalie Colbach (INRA, Agrosup Dijon) 41
- **INULA** - Évaluation des services écosystémiques et potentiels effets non intentionnels liés à une plante méditerranéenne, l'inule visqueuse – Implication en protection intégrée sous serres et en oléiculture, Alexandre Bout (INRA) 43
- **DEXiFruits** - Développement d'un outil d'évaluation de la durabilité de systèmes de production commun aux différentes filières arboricoles et au service des acteurs des réseaux, Aude Alaphilippe (INRA) 45
- **Glossaire** 47



## Modélisation rétrospective et prospective des accidents de ponte chez la perdrix grise (*Perdix perdix*) en plaine de grande culture en relation avec l'usage agricole de produits phytopharmaceutiques

Programme Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsables scientifiques

- Elisabeth Bro (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage – ONCFS, Direction de la Recherche et de l'Expertise), Elisabeth.Bro@oncfs.gouv.fr,
- James Devillers (Centre de Traitement de l'Information Scientifique - CTIS), j.devillers@ctis.fr

### Partenaires

- Collaboration avec le Central Drug Research Institute (CDRI), Lucknow, Inde

### Mots-clefs

Perdrix grise, grande culture, QSAR, exposition potentielle, analyse de résidus, perturbation endocrinienne, aromatasé, toxicité aiguë, SIRIS, SimToxPP

### En bref

Ce projet contribue à l'étude *in natura* des effets non intentionnels des produits phytopharmaceutiques sur la faune sauvage, en prenant comme cas d'étude la perdrix grise (*Perdix perdix*) en plaine de grande culture. Les résultats de ce projet identifient et quantifient l'exposition potentielle des pontes à plus de 200 substances actives, mettent en évidence des contaminations d'œufs par certaines substances actives (actuelles et anciennes), proposent un modèle prédictif d'évaluation du risque des substances actives seules ou en mélange sur les perdrix à partir de leurs activités toxicologiques et propriétés physico-chimiques, et proposent un modèle d'informations sur l'utilisation de l'habitat des perdrix et des caractéristiques de leurs pontes.

## Contexte et objectifs

L'avifaune des milieux agricoles continue de décliner aujourd'hui malgré les actions mises en place par les politiques en faveur de la biodiversité. Ce déclin persistant est globalement attribué à une série de facteurs parmi lesquels l'évolution de l'habitat et les pratiques agricoles occupent une place majeure. L'impact négatif de l'usage des produits phytopharmaceutiques reste très insuffisamment étudié sur la base de travaux de terrain.

Ce projet avait donc pour objectif de contribuer à l'étude *in natura* des effets non intentionnels des produits phytopharmaceutiques sur la faune sauvage, sur un cas d'étude : la perdrix grise (*Perdix perdix*) en plaine de grande culture. Il s'agissait :

- de modéliser l'exposition des femelles et de leurs pontes aux substances actives ;
- de mettre en évidence, ou non, une contamination des œufs par des substances actives consécutivement à leur utilisation en agriculture ;
- de proposer un modèle d'évaluation des risques potentiels des substances actives vis-à-vis des perdrix, fondé notamment sur leurs activités toxicologiques et leurs propriétés physico-chimiques.

## Principaux résultats

### Une forte proportion de pontes potentiellement exposées aux substances actives

La caractérisation de l'exposition potentielle de plus de 140 pontes a été déterminée en croisant les données journalières

de localisation des perdrix (radiopistage) et de traitement des cultures (enquête agriculteurs), à l'aide d'un SIG. Une ponte a été considérée comme potentiellement exposée à une substance active donnée lorsque la femelle a fréquenté les parcelles traitées.

L'exposition potentielle des pontes aux substances actives est quantitativement et qualitativement importante : 71 % des pontes sont exposées à un cocktail de 2 à 22 substances actives, résultant aussi bien de l'écologie de l'espèce, de pratiques agricoles que de formulations commerciales. Cette exposition concerne plus d'une centaine de substances actives, 32 pouvant être qualifiées de « principales » (*i.e.* > 5 % des pontes exposées).

### Des résidus trouvés dans certains œufs

Des analyses de résidus (environ 500 molécules) ont été réalisées sur 139 œufs non éclos de 52 pontes. Les résultats confirment que des contaminations ont eu lieu pour au moins 46 % des pontes analysées. Quatorze molécules différentes ont été détectées : 9 correspondants à des substances actuellement utilisées en agriculture (Tableau 1) et 5 autres désormais interdites. Les doses retrouvées sont toutes inférieures à 0,05 mg/kg, sauf dans trois cas. Ces résultats sont conditionnés aux limites analytiques (LQ= 0,01 mg/kg pour la plupart des molécules), une absence de détection ne signifiant pas une absence de résidus à des concentrations plus faibles.

### Des connaissances insuffisantes pour conclure à un effet

En l'état des connaissances, il n'est pas possible de conclure quant à l'importance de la contamination (en pourcentage ...

Substance active			Exposition potentielle	Pontes analysées (52)		score de risque (molec. seule)
Nom	Famille chimique	Usage répertorié	en % des 140 pontes étudiées	Nb de pontes potentiellement exposées à la substance	Nb de pontes dans lesquelles la substance a été détectée	
lambda-Cyhalothrin	Pyréthroïde	Insecticide	18,6	9	1	58
Prochloraz	Imidazole	Fongicide	18,6	11	4	55
Cyproconazole	Triazole	Fongicide	17,1	11	2	49
Tebuconazole	Triazole	Fongicide	17,1	15	1	37
Fenpropiidim	Amine	Fongicide	10,7	4	3	53
Bromoxynil	Hydroxybenzotriazole	Herbicide	3,6	3	1	42
Difenoconazole	Triazole	Fongicide	0,7	0	1	42
Diflufenican	Pyridinecarboxamide	Herbicide	0,7	1	1	39
Thiamethoxam/Clothianidine	Néonicotinoïde	Insecticide	0,0	0	3	16/-
DOT (2-isomères)	Organochloré	Insecticide	-	-	6	-
Diphenylamine	Amine	Fongicide	-	-	3	-
Fipronil (+sulfone)	Phénylpyrazole	Insecticide	-	-	3	-
HCH ( $\alpha, \beta, \delta$ )	Organochloré	Insecticide	-	-	1	-
Heptachlore (+epoxyde)	Organochloré	Insecticide	-	-	3	-

**Tableau 1** : Substances retrouvées dans les œufs non éclos de perdrix grise.

... de pontes et en concentrations) et la relation de cause à effet entre la contamination des œufs et leur non-éclosion.

### Pour aller plus loin : l'apport de la modélisation

La méthode multicritère SIRIS (Système d'Intégration des Risques par Interaction de Scores) a été utilisée pour agréger les différentes propriétés et activités des substances\* (caractère perturbateur endocrinien, toxicité aiguë, lipophilie, biodégradation, volatilité). Utilisée avec l'information collectée sur les parcours des perdrix, les caractéristiques des parcelles sur lesquelles se trouvent leurs nids et l'évolution de leurs pontes, un score de risque a été calculé pour chaque substance active rencontrée par une perdrix lors de la formation et de la ponte des œufs. Un autre score de risque a été proposé pour les formulations commerciales et les mélanges extemporanés constitués de deux substances. Enfin, un score de risque pour n'importe quel type de mélanges a été proposé. Un programme appelé SimToxPP a permis d'identifier pour chaque poule les substances auxquelles une perdrix et sa ponte sont potentiellement exposées et de calculer le score de risque des molécules, seules et en mélange, sur une échelle relative. Le résultat obtenu pour la perdrix n°586 est donné pour illustration par la Figure 1 qui présente les sorties graphiques fournies par SimToxPP.

## Perspectives

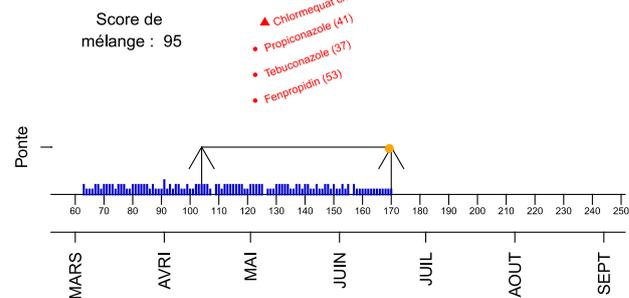
### Transfert

Les données d'exposition et de scores de risque apportées par ce travail permettent d'identifier des enjeux et d'envisager une politique de réduction d'usage des produits phytopharmaceutiques, ciblée par rapport aux risques identifiés. Ceci peut être fait en intégrant ces données aux différentes actions des bonnes pratiques de l'axe I du plan Ecophyto II.

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Bro E., Millot F., Decors A., Devillers J., 2015. Quantification of potential exposure of grey partridge (*Perdix perdix*) to pesticide active substances in farmlands. *Science of Total Environment*, 521–522: 315–325. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.073>
  - Bro E., Devillers J., Millot F., Decors A., 2016). – Residues of plant protection products in grey partridge eggs in French cereal ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 9559–9573. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6093-7>
  - Devillers J., Bro E., Millot F., 2015. Prediction of the endocrine disruption profile of pesticides. *SAR and QSAR in Environmental Research*, 26(10): 831–852. <http://dx.doi.org/10.1080/1062936X.2015.1104809>
  - Saxena A.K., Devillers J., Bhunia S.S., Bro E., 2015. Modelling inhibition of avian aromatase by azole pesticides. *SAR and QSAR in Environmental Research*, 26(7-9): 757–782. <http://dx.doi.org/10.1080/1062936X.2015.1090749>
- Document de vulgarisation (12-pages) : Phytos : effets non intentionnels sur la faune sauvage non cible. ONCFS et CTIS.

### Poule 586, subadulte (2011)



**Figure 1** : Exemple de la femelle baguée 586 dont la première ponte, de 18 œufs, déposée dans un blé d'hiver, a éclos le 19 juin. Ici, le score relatif de risque du mélange de substances est de 95. Les flèches représentent le début et la fin de la période dite « critique » de ponte, définie comme allant de 15 jours avant la ponte du 1<sup>er</sup> œuf jusqu'à l'éclosion ou la destruction de la ponte ; la hauteur des traits bleus représente le nombre de pointages de la poule par jour calendaire.

Ces données peuvent également être (1) mobilisées pour concevoir et tester des itinéraires alternatifs plus économes en produits, pour les cultures où sont épandues les molécules les plus à risque, et *in fine* enrichir la collection de la plateforme « grande culture » du portail EcophytoPIC, et (2) utilisées en tant que compléments pour les dossiers des pétitionnaires lors des procédures d'évaluation des substances.

Les résultats d'analyse de résidus participent au dispositif de phytopharmacovigilance qui compte parmi ses objectifs de caractériser les contaminations de la faune par les substances actives.

### Recherche

La caractérisation des contaminations d'œufs mériterait d'être approfondie pour consolider les données et offrir des perspectives d'analyses statistiques et de modélisation, et ainsi renforcer l'expertise disponible. Parallèlement, des études d'exposition en milieu semi-naturel ou des expérimentations *in ovo* en laboratoire apporteront des données de référence de nature à aider à l'interprétation des données de terrain. Enfin, une analyse de la dynamique de population utilisant un modèle de type individu-centré permettrait de documenter l'impact populationnel des éventuels effets des substances. ■

\* Utilisation de modèles QSPR et QSAR, et espèce-espèce.

## Développement d'indicateurs microbiens pour l'évaluation de l'impact des pesticides sur des fonctions écosystémiques terrestres et aquatiques

Programme Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Fabrice Martin-Laurent  
fabrice.martin@inra.fr  
INRA

### Partenaires

- INRA : UMR Agroécologie, UMR EcoSys
- IRSTEA : UR MALY

### Mots-clefs

Pesticides, microorganismes, fonctions écosystémiques, écotoxicologie microbienne, résilience, évaluation des risques, sols, sédiments

### En bref

L'évaluation *a priori* des effets des pesticides sur les microorganismes des sols repose sur l'estimation de leur impact sur la minéralisation du carbone et de l'azote. Ces tests trop globaux ne rendent pas compte de l'effet des pesticides sur les microorganismes. IMPEC a testé un bouquet d'indicateurs pour évaluer l'impact écotoxicologique de pesticides sur les communautés microbiennes supportant des fonctions écosystémiques dans les sols et les sédiments. Il a permis le développement de nouveaux outils et de normes ISO pouvant être utilisées pour évaluer l'impact *a priori* et *a posteriori* des pesticides sur la diversité taxonomique et fonctionnelle des microorganismes des sols et sédiments.

## Contexte et objectifs

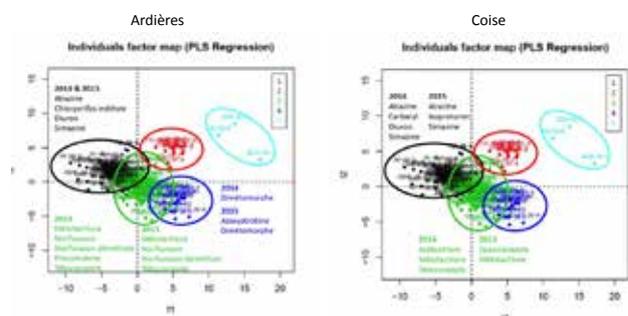
L'usage des pesticides est une menace pour la biodiversité et l'activité des communautés microbiennes présentes dans les agrosystèmes. La perturbation des communautés microbiennes et des fonctions écosystémiques qu'elles remplissent peut avoir des conséquences sur la fertilité et les capacités épuratrices des sols et des sédiments, et ainsi altérer les rendements des cultures et augmenter la pollution des sols et des eaux. Il reste toutefois difficile d'estimer l'impact des pesticides sur des fonctions écosystémiques d'origine microbienne et de suivre leur résilience du fait du manque de descripteurs adaptés et standardisés.

Dans ce contexte, IMPEC visait à tester et à développer de nouveaux indicateurs microbiens pour estimer l'impact des pesticides sur des fonctions écosystémiques liées (i) au cycle des nutriments et (ii) au service d'épuration des compartiments terrestres et aquatiques. Ces nouveaux indicateurs ont été utilisés pour évaluer *a priori* et *a posteriori* l'impact écotoxicologique de pesticides sur la composition taxonomique et sur des traits fonctionnels microbiens des sols et des sédiments.

## Principaux résultats

### Typologie *in silico*

L'analyse TyPol menée sur tous les pesticides et des métabolites utilisés et détectés sur trois sites d'études (réseau PIC Epoisses, bassin versant de la Morcille et du Trec) a permis de classer 144 composés dans 4 groupes distincts selon leurs propriétés physicochimiques et leur comportement environnemental (Figure 1).



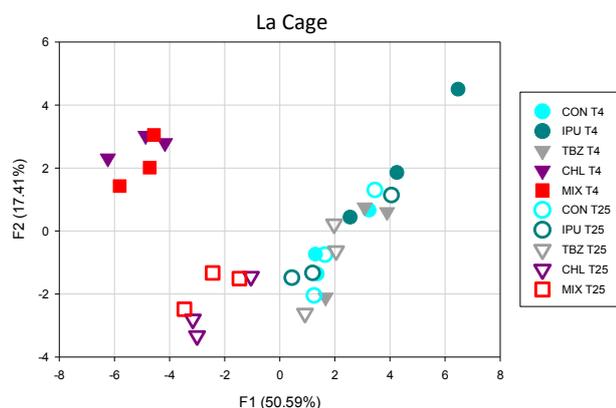
**Figure 1 :** Classification par typologie *in silico* des molécules (pesticides et produits de transformation) détectées dans l'Ardières et dans la Coise.

L'appartenance à des groupes distincts a été utilisée pour raisonner le choix des molécules à tester dans l'évaluation de l'impact écotoxicologique *a priori*. L'hypothèse sous-jacente était que les pesticides appartenant au même groupe avaient des comportements et des effets similaires. Cinq pesticides appartenant à trois groupes différents ont été choisis pour étudier leur impact écotoxicologique sur la communauté microbienne des sols et des sédiments.

### Evaluation *a priori* de l'impact des pesticides

L'étude menée sur les microcosmes aquatiques a montré que l'exposition à des pesticides fréquemment détectés dans les cours d'eau localisés en zones agricoles (diméthomorphe (DMM), tébuconazole (TBZ), glyphosate (GLY)), appliqués seuls ou en mélange, modifiait transitoirement la composition et l'activité de la communauté microbienne des sédiments de la Morcille. En effet, après la perturbation ...

... initiale causée par l'exposition aux pesticides, les descripteurs de la composition et de l'activité de la communauté microbienne avaient retrouvé des niveaux similaires à ceux des témoins après 25 jours d'exposition (Figure 2).



**Figure 2 :** Analyse en composante principale des indicateurs microbiens mesurés dans les microcosmes du sol de La Cage prélevés après 4 (T4) ou 25 (T25) jours d'exposition aux pesticides appliqués seuls (isoproturon (IPU), tébuconazole (TBZ) et chlorpyrifos (CHL)) ou en mélange (MIX). Ces mesures ont aussi été réalisées sur des microcosmes de sol témoin non exposés aux pesticides (CON).

Ces résultats montrent que la communauté microbienne des sédiments était résiliente aux pesticides. L'étude menée sur des microcosmes de sols a montré que l'impact écotoxicologique causé par l'exposition à des pesticides (isoproturon (IPU), chlorpyrifos (CHL), et tébuconazole (TBZ)) appliqués seuls ou en mélange dépendait non seulement du type de pesticide mais aussi du type de sol, conditionnant l'exposition. Plusieurs activités microbiennes du cycle de l'azote étaient sensibles aux pesticides. Pour deux sols, des résultats semblables à ceux observés pour les sédiments ont été obtenus, c'est-à-dire des modifications transitoires à court terme suivies d'une récupération partielle ou totale de plusieurs descripteurs de la composition et de l'activité de la communauté microbienne.

La résilience des sols et des sédiments était possible en raison de la dissipation rapide des pesticides, de la redondance et de la complémentarité fonctionnelle au sein de la communauté microbienne qui a permis sa récupération. Le projet ne permet pas de savoir si la récupération a induit des modifications de la diversité et/ou d'autres traits fonctionnels de la communauté microbienne des sols et des sédiments.

## Evaluation *a posteriori* de l'impact des pesticides

L'étude menée sur les bassins versants de l'Ardières et de la Coise (IRSTEA Lyon) le long d'un gradient de pollution amont > - aval n'a pas permis de montrer un impact écotoxicologique sur la capacité des communautés microbiennes des sédiments de ces deux rivières à mineraliser différents pesticides. En revanche, l'étude menée sur le dispositif PIC (INRA Dijon) a montré que les pratiques différenciées de désherbage mises en place depuis plus d'une dizaine d'années modifiaient la capacité de la communauté microbienne à dégrader des pesticides, ce qui suggère que la capacité de biodégradation peut constituer un marqueur d'exposition de la communauté microbienne des sols aux pesticides.

## Perspectives

### Transfert

IMPEC a contribué à la production de résultats originaux mais aussi de quatre standards ISO qui pourront être utilisés (i) en pré-homologation pour conduire l'évaluation *a priori* du risque environnemental des pesticides sur un bouquet de fonctions microbiennes définies avec l'objectif spécifique de protection comme le recommande l'EFSA et (ii) en post-homologation pour évaluer l'impact *a posteriori* de l'exposition chronique de la communauté microbienne des sols et des sédiments à des résidus de pesticides. Un des descripteurs d'IMPEC (capacité épuratrice) sera appliqué dans un projet soutenu par le plan Ecophyto II (IMPACT-CE, 2016-19).

### Recherche

IMPEC recommande de poursuivre les recherches visant à estimer l'impact *a priori* des pesticides sur des fonctions microbiennes supportant des fonctions écosystémiques des sols identifiées comme objectifs spécifiques de protection. Ces travaux permettraient de proposer des tests et un référentiel d'interprétation (NOR, normal operating range) pour l'évaluation du risque environnemental des pesticides vis-à-vis des microorganismes dans le processus d'homologation. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour identifier et proposer des méthodes valides pour évaluer l'impact *a posteriori* des pesticides sur des fonctions microbiennes écosystémiques et suivre leur trajectoire de récupération. ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Pesce S., Margoum C., Rouard N., Foulquier A., Martin-Laurent F., 2013. Freshwater sediment pesticide biodegradation potential as an ecological indicator of microbial recovery following a decrease in chronic pesticide exposure: A case study with the herbicide diuron. *Ecological Indicators* 29: 18-25.
- Storck V., Lucini L., Mamy L., Ferrari F., Papadopoulou E.S., Nikolaki S., Karas P.A., Servien R., Karpouzias D.G., Trevisan M., Benoit P., Martin-Laurent F., 2016. Identification and characterization of tebuconazole transformation products in soil by combining suspect screening and molecular typology. *Environmental Pollution* 208: 537-545.
- ISO/DIS 17601 Soil quality - Estimation of abundance of selected microbial gene sequences by quantitative realtime PCR from DNA directly extracted from soil (Project Leader: F Martin-Laurent, UMR Agroécologie).
- ISO/CD 20130 Soil quality - Measurement of enzyme activity patterns in soil samples using colorimetric substrates in micro-well plates (Project Leader: N Cheviron, UMR EcoSys).

## Indicateurs biologiques d'impacts liés à la réduction de l'IFT en arboriculture fruitière

Pour et Sur le Plan Écophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Yvan Capowiez  
yvan.capowiez@inra.fr  
INRA

### Partenaires

- INRA : Sylvaine Simon, Mickaël Hedde
- Université d'Avignon : Christophe Mazzia
- Station d'expérimentation La Pugère : Marie Charreyron
- CTIFL, stations d'expérimentation Lanxade et La Morinière : Franziska Zavagli

### Mots-clés

Arboriculture, auxiliaires, biodiversité, mesure de service, lycese

### En bref

Le projet IndRegArb se proposait de développer de nouveaux indicateurs pour suivre les effets positifs de la baisse des IFT. Ces indicateurs, basés soit sur la mesure du service de régulation, soit sur les traits écologiques de certains auxiliaires, ont été testés dans 4 réseaux de vergers DEPHY dans 3 zones géographiques. Les indicateurs de services ont montré des réponses trop variables pour être utilisés en routine. En revanche, certaines communautés ont eu des réponses positives et significatives à des baisses d'IFT (araignées du sol et de la canopée). Il en a été dérivé un indicateur appelé « Test Lycese » simple, rapide et abordable qui peut être utilisé dans les sites du réseau DEPHY.

## Contexte et objectifs

Le projet IndRegArb partait du constat qu'il y avait peu d'outils disponibles pour suivre les effets positifs attendus d'une réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (IFT) dans les vergers à savoir le cercle vertueux : « réduction de l'usage des pesticides → augmentation de la faune auxiliaire → contrôle satisfaisant des ravageurs → réduction de l'usage des pesticides ». Les utilisateurs (responsables de sites EXPE DEPHY ou de réseaux FERME DEPHY) sont donc en attente d'outils simples et rapides d'utilisation et également peu coûteux. Les freins à la mise en place de tels indicateurs sont les connaissances entomologiques et le temps nécessaire au piégeage des arthropodes et à leur détermination.

Ont donc été développés des indicateurs nouveaux :

- **des mesures de services** liés à la régulation naturelle dans les vergers en utilisant des moyens simples (prédation et parasitisme d'œufs sentinelles, estimation du nombre de pucerons momifiés) ;

- **des traits écologiques des auxiliaires** pour mieux comprendre les effets positifs des réductions d'IFT et définir des indicateurs simplifiés facilement transférables aux praticiens.

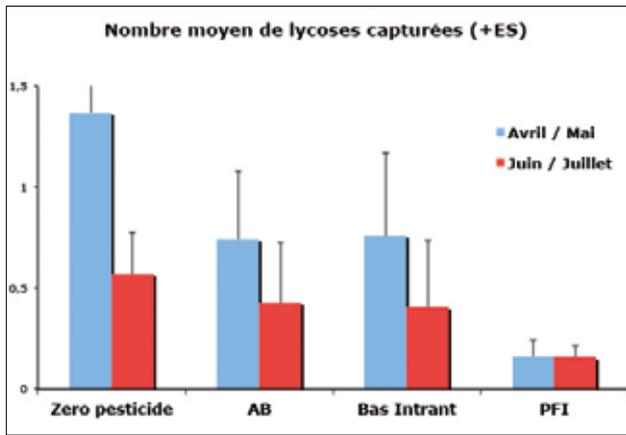
## Principaux résultats

Les mesures ont été menées sur 4 sites DEPHY situés dans le sud-est de la France (Sénas et Valence : La Pugère et Gotheron), en Aquitaine (Lanxade) et en Touraine (La Morinière) représentant des situations géographiques différentes et des pressions fongicides ou insecticides différentes. Quatre types de protection ont été distingués : (i)

des vergers AB, (ii) des vergers dits de référence (PFI), et des vergers où l'on mobilise différents leviers pour atteindre soit (iii) -30 à -50 % ou (iv) -50 à -70 % de l'IFT de référence (Bas Intrants). Les mesures de service se sont révélées trop variables pour être opérationnelles sur des sites Écophyto. Cela tient notamment au fait que les communautés d'auxiliaires sont très différentes entre les 4 sites.

L'abondance des araignées (du sol ou de la canopée) est liée à la pression pesticide : plus l'IFT est réduit, plus ces communautés d'auxiliaires sont abondantes. Cependant, dénombrer toutes les araignées est une tâche ardue car un certain nombre d'entre elles sont millimétriques (comme les Linyphiidae qui représentent 30 % des araignées du sol). Toutefois, il a été également observé une liaison positive entre la réduction de l'IFT et certains traits écologiques des communautés : par exemple, une baisse de l'IFT favorise les araignées de grande taille, comme les lycoses, en lien avec leur faible capacité de recolonisation des milieux perturbés.

Un test simple, rapide et abordable, appelé « Test Lycese » (Figure 1), a donc été développé. Ce test utilise la méthode des pots pièges mais sur des durées de temps courtes (8h). En effet, les lycoses étant des araignées de grande taille (supérieure à 0,5 cm), diurnes et d'un patron de couleur atypique (coloration marron non unie avec des bandes plus claires sur la tête), un piégeage sur la journée permet d'obtenir des estimations fiables et simples de leur abondance. La validation de ce test a été réalisée en 2016 sur un ensemble de 53 vergers du sud-est de la France appartenant à 4 classes : (i) des vergers en AB, (ii) des vergers PFI dits de référence et des vergers dits « Bas intrants » qui ont réduit leur IFT total par l'utilisation de leviers agronomiques variés (variétés résistantes, utilisation de filets Alt'Carpo, ...



**Figure 1 :** Nombre moyen de lycoses capturées par piège lors de l'application du test « Lycose » à 53 vergers de la région Sud-Est. La Figure permet de constater que le nombre de lycoses, pour les deux périodes testées, est significativement plus faible dans les vergers dits PFI (vergers de référence).

... suivi du cahier des charges « baby food » ou pour certains vergers expérimentaux, l'utilisation de seuils de présence pour déclencher les applications de produits phytopharmaceutiques). La Figure 1 a permis de constater que le nombre de lycoses, pour les deux périodes testées, est significativement plus faible dans les vergers dits PFI (vergers de référence).

Cette étude a été confiée à trois étudiants « néophytes » en matière de connaissances entomologiques, après une « formation » d'une demi-heure.



**Figure 2 :** Photo de Lycose (crédit photo : « Insectes de Provence », Jacqueline Bouscarle).

**Fait Marquant 1 :** Les contrôles par des spécialistes en entomologie montrent que le taux d'erreur pour identifier les lycoses par des néophytes est très faible (<1%).

**Fait Marquant 2 :** L'étude menée sur les 53 vergers du Sud-Est montre que l'adoption de leviers techniques visant à réduire les IFT se traduit par une augmentation significative du nombre de lycoses dans les vergers concernés.

## Perspectives

### Transfert

Le test « Lycose » est de nature à pouvoir combler le vide d'indicateurs biologiques mobilisables facilement et en autonomie par les responsables de site ou de réseaux Écophyto pour suivre les effets positifs d'une réduction de l'IFT sur la biodiversité hébergée par les vergers. Cependant, il faut préciser que le rôle écologique des lycoses dans les vergers est *a priori* faible (elles peuvent consommer des larves de lépidoptère lorsque celles-ci viennent diapauser au sol). Le test « Lycose » est donc plutôt un indicateur de biodiversité pas nécessairement lié à l'augmentation d'un service de régulation naturelle significatif.

### Recherche

L'utilité et la pertinence du test « Lycose » ont été prouvées en arboriculture fruitière dans le sud-est de la France. Son extension à d'autres régions arboricoles est presque immédiate car les lycoses sont présentes en abondance dans toute la France. La possible adaptation de ce test à d'autres types de production (grandes cultures) doit encore être confirmée. Dans le cadre du projet IndRegArb, il a été démontré que ni la hauteur ni la densité du couvert végétal des vergers n'influençaient les résultats du test « Lycose ». L'étude d'autres possibles facteurs de confusion doit être poursuivie. ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Capowicz Y., Mazzia C., Hedde M., 2016. Le « test Lycose », un indicateur simplifié pour suivre les effets positifs d'une réduction de l'IFT sur la biodiversité hébergée par les vergers. Fiche Technique issue d'un projet Pour et Sur et le Plan Écophyto 1.

## Evaluation de la QUArité prédictive d'Indicateurs PEsticides et du domaine d'utilisation

Pour et Sur le Plan Ecophyto, PSPE1 (financement : Ecophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Christian Bockstaller  
christian.bockstaller@inra.fr  
LAE, INRA-Université de Lorraine Nancy-Colmar

### Partenaires

- INRA-Université de Lorraine Nancy-Colmar et CRA Grand Est : Frédéric Pierlot
- ARVALIS-Institut du végétal : Jonathan Marks Perreau et Benoît Réal
- Agro Solutions : Thibaut Constant
- IRSTEA : Nadia Carluet et André Miralles
- INRA-Université de Lorraine Nancy-Colmar : Jean Villerd
- Agro-transfert Ressources et Territoires Picardie : Alexandre Morin

### Mots-clefs

Indicateur, risque, produit phytopharmaceutique, transfert, qualité de l'eau, validation, entrepôt de données

### En bref

Le projet EQUIPE a confronté les sorties de 26 indicateurs évaluant les transferts vers les eaux souterraines ou superficielles, et les sorties du modèle mécaniste 1D MACRO 5.2, à des mesures de transferts, pour estimer leur qualité prédictive. A l'exception de MACRO, les corrélations restent faibles bien que, globalement, les indicateurs plus élaborés présentent de meilleurs résultats que les indicateurs simples. Des progrès ont été réalisés dans le développement des systèmes d'information et des entrepôts de données. Une fiche a été rédigée par indicateur, résumant les résultats des tests et donnant des recommandations sur l'utilisation des indicateurs par rapport à leur qualité prédictive.

## Contexte et objectifs

Parmi les compartiments environnementaux qui peuvent être touchés par les produits phytopharmaceutiques, les milieux aquatiques (eaux souterraines et superficielles) sont l'objet d'une attention particulière. La mesure directe de transferts et d'impacts de molécules n'offre pas nécessairement une image complète des transferts dans l'espace et le temps, et est coûteuse à mettre en œuvre. C'est pourquoi de nombreux acteurs ont proposé l'utilisation d'indicateurs de risque comme approche complémentaire. Face au foisonnement d'indicateurs, un outil interactif d'aide au choix des indicateurs traitant des risques liés aux produits phytopharmaceutiques et de la qualité des eaux a été développé : l'outil GUIDE (Keichinger et al., 2013). Faute de données disponibles, ces travaux n'ont pas pu fournir d'informations sur la qualité prédictive des indicateurs décrits.

C'est à partir de ce constat que le projet EQUIPE a été mis en place, avec l'objectif principal d'évaluer la qualité prédictive d'un ensemble d'indicateurs « pesticides et qualité des eaux » disponibles sur GUIDE, aux échelles de la parcelle et du bassin versant.

## Principaux résultats

### A l'échelle parcellaire : de faibles corrélations et des résultats suivant le niveau d'élaboration des indicateurs

Ces travaux ont reposé sur 4 jeux de données conséquents de mesures de transfert de substances actives de sites pilotés par ARVALIS-Institut du végétal : La Jaillièrre (44, drainage et ruissellement par saturation), Le Magneraud (17, infiltration) et Geispitzen (68, ruissellement hortonien) (Figure 1).



**Figure 1** : Dispositif Magneraud : parcelles et fosses d'accès aux lysimètres (crédit photo : ARVALIS-Institut du végétal).

À ces mesures, ont été comparés les résultats de 26 indicateurs évaluant les transferts vers les eaux souterraines ou superficielles, de complexité croissante de la dose par hectare, à des indicateurs intégrant des variables de milieu, de pratiques et de propriétés des molécules, ou basés sur des modèles. Le modèle mécaniste MACRO 5.2, traitant des transferts verticaux par infiltration matricielle ou par transferts rapides, a été ajouté. Un exemple de comparaisons indicateurs-mesures est présenté dans le Tableau 1, pour le site de La Jaillièrre.

Les résultats ont montré de faibles corrélations avec les variables mesurées à l'exception du modèle MACRO 5.2. Les tests sur les classements n'ont pas donné de meilleurs ...

	La Jaillière Drainage														
	fd1			cmax			fmax			cumfl			cmp		
	Corr.	vraisem	dont juste	Corr.	vraisem	dont juste	Corr.	vraisem	dont juste	Corr.	vraisem	dont juste	Corr.	vraisem	dont juste
QSA	0,14	92%	7%	0,14	94%	21%	0,15	92%	22%	0,20	89%	22%	0,15	99%	15%
IFT MA	0,30	93%	8%	0,16	92%	19%	0,18	92%	21%	0,21	89%	21%	0,19	97%	14%
SRISeso	0,32	86%	12%	0,21	71%	19%	0,22	71%	16%	0,25	67%	14%	0,22	84%	22%
FiOeso	0,24	77%	63%	0,28	58%	49%	0,30	59%	51%	0,38	58%	50%	0,29	63%	51%
DEKeso	0,37	84%	27%	0,21	66%	29%	0,21	68%	30%	0,25	64%	27%	0,22	78%	33%
DAEGeso	0,28	75%	59%	0,35	54%	43%	0,34	55%	44%	0,40	55%	44%	0,33	60%	48%
ARTHUReso	0,42	82%	45%	0,29	62%	41%	0,29	65%	44%	0,37	61%	40%	0,28	73%	46%
Iphy1eso	0,36	80%	64%	0,43	62%	51%	0,42	64%	57%	0,49	63%	55%	0,41	67%	51%
Iphy2eso	0,24	84%	41%	0,15	67%	39%	0,16	68%	40%	0,19	64%	37%	0,13	78%	44%
POCLReso	0,04	79%	48%	0,08	58%	36%	0,08	59%	26%	0,09	57%	34%	0,07	66%	44%
EPRIPeso	0,36	81%	43%	0,39	60%	34%	0,40	60%	34%	0,46	58%	33%	0,39	71%	42%
Drainage HAIR	0,11	77%	58%	0,11	56%	44%	0,37	68%	42%	0,44	68%	44%	0,28	70%	38%
MACRO	0,16	73%	72%	0,79	67%	40%	NA	NA	NA	0,71	59%	59%	0,89	71%	40%

Coefficient de corrélation (r)

< 0,4
[0,4; 0,45[
[0,45; 0,50[
[0,50; 0,55[
> 0,55

% estimation juste

≤ 40
[40; 50[
[50; 60[
[60; 70[
> 70

**Tableau 1 :** Résultats de comparaison indicateurs-mesures : coefficients de corrélation (r) et tests de vraisemblance (vraisem). Exemple de la Jaillière (ruissellement par saturation, n=230). fd1 : fréquences de dépassement de 0,1 µg/L (%) ; cmax : concentration maximale (µg/L) ; fmax : flux maximum (mg/ha) ; cumfl : flux cumulés (mg/ha) ; cmp : concentrations moyennes pondérées par la lame d'eau (µg/L).

... résultats. Par rapport aux indicateurs « simples » (QSA, IFT par substance active, NRI, etc.), les indicateurs intégrant directement les propriétés des substances actives, les variables de milieu, de pratiques (I-PHY), ou ceux reposant sur des modèles (I-PHY2, EPRIP1 et 2) sont plutôt satisfaisants, excepté SYNOPSIS. Globalement les résultats pour les indicateurs traitant du ruissellement sont moins bons.

### A l'échelle du bassin versant : des résultats similaires et des progrès méthodologiques de gestion de données et de valorisation/d'analyse des résultats

La comparaison a porté sur 8 indicateurs (ex. : ADSCOR, DAEG, I-PHY2) et 6 herbicides sur plusieurs années. Le travail réalisé sur le bassin versant de la Fontaine du Theil, (136 ha, 80 parcelles pilotées par ARVALIS-Institut du végétal) a conduit au même niveau de corrélation sans permettre de différencier nettement les indicateurs, quel que soit le type d'agrégation spatiale, par la surface parcellaire, pondérée par un coefficient d'atténuation.

Au niveau informatique, la chaîne de traitement développée a permis d'automatiser :

- la création de la base de données réifiant le cube multidimensionnel ;
- de faciliter l'intégration de modifications demandées par le groupe d'utilisateurs rendant ainsi le processus plus interactif ;
- de produire de façon automatisée des cartes de résultats aux échelles des parcelles ou du bassin, en fonction des agrégations demandées.

### Un autre jeu de données nécessaire pour la construction « de chaînes d'indicateurs »

Pour la construction de « chaînes d'indicateurs », il a été appliqué une méthode de fouille de données, avec des arbres de régression sur les deux jeux de données de La Jaillière et celui du Magneraud, de taille suffisante pour cet exercice.

Ces essais de fouille de données n'ont pas abouti à des chaînes d'indicateurs significatives et compréhensibles, pour partie, en raison, des jeux de données ne présentant qu'une faible variabilité des conditions pédologiques par type d'écoulement dominant.

### Des fiches par indicateurs

A l'issue de ce travail, une fiche a été rédigée par indicateur, résumant les résultats des tests et donnant des recommandations sur l'utilisation des indicateurs. Les utilisateurs ont été alertés sur le fait qu'une utilisation simpliste des indicateurs, visant à conseiller uniquement la substitution de molécules, peut conduire à des problèmes de résistance rapide à la famille chimique favorisée, sans garantir une amélioration de la qualité des eaux.

## Perspectives

### Transfert

Les résultats ont permis de compléter les fiches de l'outil GUIDE. Les indicateurs « simples », envisagés au niveau du plan Écophyto et basés sur la dose et/ou sur les propriétés des molécules, ou un coefficient de transfert, sont de faibles prédicteurs de la qualité de l'eau. Des indicateurs intégrant différentes variables, en tenant compte des processus, sont à privilégier. La mise en œuvre d'un modèle mécaniste comme MACRO semble préférable. Avec les progrès en termes de gestion de données, son utilisation au niveau territorial est envisageable. Dans tous les cas, l'utilisation de ces indicateurs limitée à un conseil de substitution de molécules est à éviter.

### Recherche

Le travail a montré que certaines variables pertinentes comme la date de traitement, en lien avec le statut hydrique du sol, ne sont pas prises en compte. La question porte donc sur leur intégration dans un indicateur nouveau ou existant.

Les jeux de données ont permis dans ce projet un effort de validation unique. Cependant, comme l'ont montré les travaux sur les chaînes d'indicateurs, les jeux de données de mesures de transferts de substances actives vers les eaux devraient présenter une plus grande variabilité en croisant, par exemple, pour un site et une voie de transfert, un climat, avec plusieurs types de sol, de pente, etc. De même, le travail sur d'autres bassins versants serait à envisager. ■

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Fiches par indicateur sur le site du RMT ERYTAGE : <http://www.erytage.fr/guide/>
- Keichinger O., Benoit P., Boivin A., Bourrain X., Briand O., Chabert A. et al., 2013. GUIDE : développement d'un outil d'aide à la sélection d'indicateurs de risques. Innovations Agronomiques 28 1-13.

## Développements méthodologiques pour une CARactérisation SIMplifiée des pressions biotiques et des Régulations biologiques

Pour et Sur le Plan Ecophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Vincent Cellier  
vincent.cellier@inra.fr  
INRA

### Partenaires

- Responsable groupe « adventices » : Stéphane Cordeau, INRA et Laurence Fontaine, ITAB
- Responsables groupe « Bioagresseurs, ennemis naturels et régulations biologiques » : Jean-Pierre Sarthou et Muriel Valantin-Morison, INRA

### Mots-clefs

Bioagresseurs, auxiliaires, phytopathométrie, protocoles, DEPHY

### En bref

En collaboration avec la CAN DEPHY, le projet CASIMIR propose des protocoles simples de suivi des adventices, maladies et ravageurs dans plusieurs filières ainsi qu'un outil d'aide à la conception de stratégies d'échantillonnage. Un prototype de guide permettant de réaliser simplement un diagnostic agronomique des pressions biotiques est proposé. Le projet CASIMIR a aussi étudié la mise en place et l'intensité des régulations biologiques dans des systèmes de grandes cultures avec peu de pesticides. De nouvelles méthodes de piégeage et d'échantillonnage ont ainsi été testées sur les sites Rés0Pest<sup>1</sup> pour faire le lien entre la biodiversité fonctionnelle et l'intensité des régulations biologiques.

## Contexte et objectifs

Le projet CASIMIR a pour objectif de sélectionner ou concevoir avec les utilisateurs, des protocoles simples et rapides à mettre en œuvre, pour caractériser l'évolution des bioagresseurs, de leurs dégâts et de l'intensité de la régulation biologique dans les parcelles agricoles.

**Pour le plan Écophyto**, le projet veut répondre aux besoins du réseau DEPHY :

- sensibiliser les agriculteurs à l'observation des pressions et régulations biologiques ;
- expliciter les relations entre pressions et traitements, analyser leur variabilité et les liens avec les évolutions d'IFT ;
- juger des conséquences agronomiques et sanitaires des systèmes DEPHY FERME et EXPE, et définir leur domaine de validité.

**Sur le plan Écophyto**, le projet doit permettre :

- d'avancer sur la compréhension des mécanismes de régulation biologique (mise en place et intensité), dans les systèmes de grandes cultures avec peu de pesticides, en étudiant les parcelles du réseau expérimental sans pesticides Rés0Pest ;
- de proposer des mesures indicatrices de la régulation biologique et de faire le lien avec la biodiversité fonctionnelle.

## Principaux résultats

Les livrables du projet sont disponibles sur la plateforme QuantiPest<sup>2</sup>. Cette plateforme du réseau européen ENDURE, administrée par le Réseau Protection Intégrée des Cultures de l'INRA (Réseau PIC), a été créée afin de rassembler les



Figure 1 : Couple auxiliaire-ravageur : coccinelle et pucerons.

connaissances nécessaires à l'identification et à la quantification des bioagresseurs et de leurs dégâts. Son but est d'aider à la conception des méthodes et protocoles nécessaires à la caractérisation des pressions biotiques et mettant à disposition des références et des outils pertinents pour cet usage. Les livrables principaux du projet CASIMIR sont les suivants :

- La **grille non exhaustive des protocoles référencés au commencement du projet**. Elle centralise des protocoles de l'INRA, de Terres Inovia, de Rés0Pest, du GEVES et du réseau d'épidémiologie du territoire (protocoles Vigiculture, SBT maraîchage, Guide horticulture, ...). Cette grille ...

1. <http://www.inra.fr/reseau-pic/Projets/Res0Pest>

2. <http://quantipest.endure-network.eu/> Pour trouver tous les documents issus du projet CASIMIR, lancer une recherche avec le mot clé « CASIMIR ».

... permet de partager ce travail et aux utilisateurs de rechercher des protocoles qu'ils pourront sélectionner selon leurs besoins.

- Un **prototype de guide d'aide au diagnostic** avec un mode opératoire simplifié et rapide à mettre en œuvre et complété par un mode opératoire construit sur un échantillonnage. Les cultures ayant été sélectionnées dans le projet CASIMIR sont le blé et le colza. L'objectif du mode opératoire simplifié est de réaliser un diagnostic agronomique de la pression biotique qui s'est exercée pendant la saison culturale.

- Un **outil d'aide à la conception de stratégies d'échantillonnage pour caractériser la composante biotique des agro-écosystèmes**. Cet outil permet d'établir une stratégie d'échantillonnage pour la caractérisation d'un stress biotique ou d'une régulation biologique (potentielle), et/ou d'analyser une stratégie d'échantillonnage éprouvée afin d'évaluer s'il est possible d'en réduire les coûts d'échantillonnage ou bien, au contraire, si l'effort d'échantillonnage doit être plus important pour atteindre les objectifs visés.

- Des **protocoles simplifiés** de suivi des adventices pour les filières grandes cultures, arboriculture fruitière, viticulture, et cultures légumières. Ces protocoles sont reproductibles, faciles à appliquer, rapides à mettre en œuvre et reposent sur le principe d'évaluation visuelle avec l'utilisation d'une échelle d'abondance. Des protocoles **plus complexes** de suivi des adventices sont disponibles pour les grandes cultures et la viticulture.

- Des **outils de formation** afin d'aider à la mise en place des protocoles :

- des **fiches pédagogiques** qui présentent des méthodes simplifiées de suivi de la flore adventice, des méthodes de piégeage de la macrofaune qui se développe au-dessus du sol ainsi que des méthodes de suivi des pucerons et de leurs ennemis naturels dans les parcelles de céréales ;

- des **didacticiels** qui permettent de s'entraîner à la reconnaissance des adventices, soit avec un jeu de photos présentant les adventices à différents stades de leur développement, soit uniquement au stade de la plantule.

## Perspectives

### Transfert

Le projet CASIMIR propose des outils directement transférables vers les acteurs du plan Écophyto pour le suivi de la flore adventice et des bioagresseurs et auxiliaires. Ces protocoles sont simples et accompagnés de fiches pédagogiques et de didacticiels permettant de faciliter leur appropriation.

Un prototype de guide d'aide au diagnostic rapide à mettre en œuvre est proposé pour blé et colza pour faire un diagnostic agronomique de la pression biotique de la saison culturale.

L'inventaire des protocoles, réalisé en début de projet, est mis à disposition.

Un outil pédagogique d'aide à la mise au point de stratégies d'échantillonnage optimisées en termes de rapport coût/précision est aussi proposé.

### Recherche

Le projet CASIMIR a permis des avancées sur la caractérisation des régulations biologiques et a contribué à la rédaction d'un article de vulgarisation scientifique sur l'état des connaissances qui sera soumis à la revue *Phytoma*.

Il serait intéressant de poursuivre les analyses statistiques des jeux de données collectés dans le projet CASIMIR et de mettre au point une grille d'analyse fonctionnelle des effets des systèmes de culture permettant de faire l'analyse multi-site des différents systèmes de culture de Rés0Pest et de leurs effets sur les ravageurs, leurs auxiliaires et la régulation biologique. ■

---

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Froger M., Cellier V., Fontaine L., Guillemin J.P., Rodriguez A., Cordeau S., 2015. Accompagner les réseaux DEPHY-FERME et DEPHY-EXPE dans la caractérisation de l'effet des systèmes de culture sur la flore adventice. Rencontres sur la Gestion Durable des Adventices, Paris, FRA (2015-12-15).
- Froger M., Cellier V., Fontaine L., Guillemin J.P., Rodriguez A., Cordeau S., 2015. Accompagner les agriculteurs dans la caractérisation de l'effet des systèmes de culture sur la flore adventice. Colloque du RMT systèmes de culture innovants, Paris, FRA (2016-05-17).
- Froger M., Cellier V., Aubertot J.N., 2016. Outil d'aide à la conception de stratégies d'échantillonnage pour caractériser la composante biotique des agroécosystèmes.

## Développement d'un outil moléculaire innovant pour la caractérisation du complexe d'espèces de *Fusarium* sur blé

Pour et Sur le Plan Écophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Anne-Laure Boutigny  
anne-laure.boutigny@anses.fr  
ANSES

### Partenaires

- ANSES, Laboratoire de la santé des végétaux, Equipe de mycologie
- INRA, UR1290 BIOGER\_CPP
- ARVALIS - Institut du végétal

### Mots-clefs

*Fusarium*, séquençage haut débit, blé, fusariose, mycotoxines, metabarcoding, orge

### En bref

La fusariose est une maladie des céréales causée par un complexe d'espèces du genre *Fusarium*. Elle fait l'objet de traitements fongicides spécifiques et les changements de pratiques agricoles induits par le plan Écophyto pourraient modifier le complexe d'espèces associé à cette maladie. Un outil innovant basé sur l'analyse de séquences de marqueurs génétiques générées par séquençage haut débit a été développé et permet de dresser un inventaire exhaustif des espèces de *Fusarium* présentes dans des lots de céréales. Ce nouvel outil devra permettre de détecter et gérer plus efficacement les émergences d'espèces de *Fusarium* ou toutes modifications de la prévalence des espèces du complexe.

## Contexte et objectifs

La fusariose est une maladie des céréales causée par un complexe d'espèces du genre *Fusarium*. La diversité et la richesse des espèces de *Fusarium* varient en fonction de l'année, de la région, des conditions climatiques, de la variété de la plante hôte, de l'historique parcellaire et des pratiques culturales.

Afin de réduire le risque de développement de la fusariose, des traitements fongicides sont préconisés à la floraison. Chacune des espèces de *Fusarium* du complexe présente une sensibilité particulière aux fongicides. Les changements de pratiques agricoles induits par le plan Écophyto pourraient modifier le complexe d'espèces associé à la fusariose.

Ces dernières années, le développement de technologies de séquençage à haut débit a permis d'accéder à la diversité de communautés de microorganismes par un séquençage massif de marqueurs ADN (barcode) utilisés pour caractériser les espèces. L'objectif de ce projet était de développer un outil basé sur les technologies de séquençage à haut débit afin de détecter sans *a priori* l'ensemble des espèces de *Fusarium* présentes au sein d'échantillons de céréales.

## Principaux résultats

### Définition d'amorces dans une région barcode

Une zone d'intérêt a été ciblée au sein du gène EF1- $\alpha$  et des amorces ont été dessinées permettant l'amplification spécifique des espèces du genre *Fusarium*. La spécificité de la réaction d'amplification a été vérifiée par PCR sur plusieurs espèces de champignons du genre *Fusarium* ou d'autres

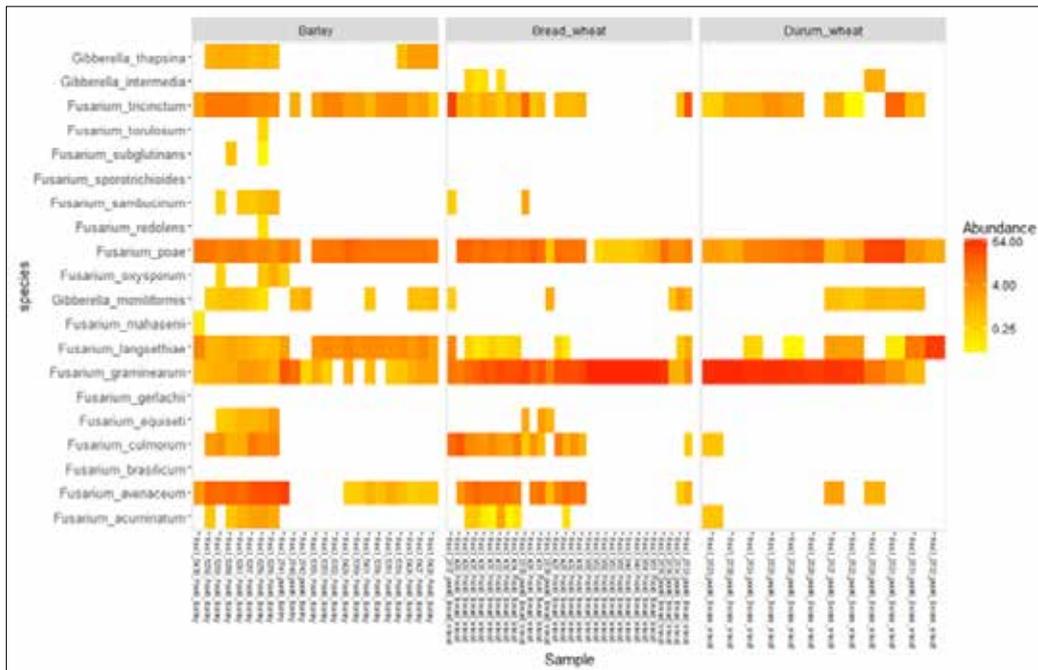


Fusariose sur épi de blé.

genres. Les amorces finalement sélectionnées amplifient une région barcode de 640 pb au sein du gène EF1- $\alpha$ .

### Analyse d'échantillons de référence calibrés

Afin de valider la faisabilité de l'identification d'espèces de *Fusarium* présentes dans un échantillon par séquençage haut débit, des échantillons de référence calibrés ont été utilisés pour mettre au point l'outil. Pour cela, deux types d'échantillons calibrés ont été préparés : des mélanges ADN témoins et des échantillons de blé artificiellement contaminés par *Fusarium*. Les mélanges ADN témoins contenaient de l'ADN en quantité équimoléculaire de différentes espèces de *Fusarium* et d'autres espèces fongiques. Des échantillons de blé ont été artificiellement contaminés par diffé- ...



**Figure 1** : Analyse de la diversité des espèces de *Fusarium* sur des échantillons de céréales collectés dans le cadre de cette étude.

... rentes espèces de *Fusarium* (*F. graminearum*, *F. poae*, *F. tricinctum*, *F. langsethiae*, *F. culmorum*, *F. avenaceum*, *F. oxysporum* et *F. verticillioides*) et dans différentes proportions. La technologie MiSeq (Illumina) disponible sur la plateforme Genotoul (INRA, Toulouse) a été sélectionnée. L'analyse des séquences a finalement été faite sur une portion d'EF1- $\alpha$  de 200 paires de bases, correspondant à la séquence forward. Le pipeline d'analyse, basé sur le logiciel MOTHUR v.1.36, a comporté différentes étapes pour traiter et analyser les séquences brutes. Le processus d'analyse a permis de retrouver toutes les espèces de *Fusarium* ajoutées dans les mélanges témoins et dans les échantillons de blé artificiellement contaminés. Ces échantillons de référence calibrés ont permis de valider la répétabilité et la sensibilité de la technique.

#### Evaluation de l'outil sur des échantillons issus de parcelles d'agriculteurs

En 2014 et 2015, 65 échantillons de blé tendre, blé dur et orge ont été collectés dans différentes régions de France. Ces échantillons ont été analysés en utilisant l'outil développé dans ce projet et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 1. Jusqu'à 17 espèces de *Fusarium* ont pu être détectées dans les échantillons de blé tendre, blé dur et orge. *F. graminearum* et *F. poae* sont présentes dans la majorité des échantillons. Certaines espèces de *Fusarium* sont spécifiquement détectées dans l'orge : *Gibberella thapsina* (= *Fusarium thapsinum*), *Fusarium torulosum*, *Fusarium subglutinans*, *Fusarium redolens*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium mahasenii* ou dans le blé : *Gibberella intermedia* (= *Fusarium proliferatum*).

## Perspectives

### Transfert

L'année 2017 permettra de valoriser l'outil développé auprès des acteurs du terrain par différentes actions :

- rédaction d'un guide d'utilisation ;
- action de transfert de l'utilisation de l'outil de l'INRA vers ARVALIS – Institut du végétal et vers les acteurs terrains qui le demanderont ;
- rédaction d'articles de vulgarisation (*Perspectives Agricoles*, *Innovations Agronomiques*) ;
- présentation de l'outil au prochain séminaire du RFSV (Réseau Français pour la Santé Végétale) ;
- rédaction d'un article scientifique et de communications orales dans des congrès européens et internationaux décrivant la mise au point de l'outil.

### Recherche

L'outil devrait permettre de détecter et gérer plus efficacement les émergences d'espèces, ou toute modification de la prévalence des espèces impliquées dans la fusariose et le risque toxigène associé. Un tel outil devrait participer à moyen terme à l'adoption de nouvelles stratégies et de nouveaux comportements en matière de pratiques agricoles économes en produits phytopharmaceutiques. Des données actualisées annuellement, sur un réseau représentatif de parcelles, permettraient de préciser la nature exacte de la pression parasitaire et de nourrir une analyse du risque pertinente pour les experts nationaux et régionaux. ■

#### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Basler R., Boutigny A.L., Gautier A., Dauthieux F., Leite S., Aguayo J., Valade R., loos R., Laval V. Metabarcoding targeting EF1- $\alpha$  region to assess *Fusarium* diversity on cereals (article en préparation).
- Basler R., Boutigny A.L., Gautier A., Dauthieux F., Leite S., Aguayo J., Valade R., loos R., Laval V. Développement d'un outil moléculaire innovant pour la caractérisation du complexe d'espèces de *Fusarium* sur céréales (article en préparation dans *Perspectives Agricoles*).

## Analyse stratégique des relations Pratiques - Environnement - Bioagresseurs - Pertes de récoltes

Pour et Sur le Plan Ecophyto, PSPE1 (financement : Ecophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

François Brun, francois.brun@acta.asso.fr  
ACTA – Tête de réseau des instituts des  
filiales animales et végétales

### Partenaires

- INRA AGIR : Serge Savary, Laetitia Willocquet, Céline Jouanin
- ARVALIS Institut du végétal : Nathalie Verjux

### Mots-clés

Blé, statistique, essai système, maladie, variété

### En bref

Ce projet a défini une démarche générique d'analyse des relations P-E-Bi-P (pratiques-environnement bioagresseurs-pertes de récoltes) basée sur les contextes, les pratiques, les contraintes abiotiques et biotiques, et l'environnement des productions végétales. Il consiste notamment à considérer l'ensemble des maladies sous la forme de syndromes de santé végétale. La mise en œuvre d'une stratégie d'analyse sur la base de données « blés rustiques » nationale, permet d'illustrer cette démarche et de quantifier les relations entre syndromes de santé végétale, climat, sensibilité des variétés et itinéraires techniques. Cette démarche peut inspirer les acteurs des réseaux DEPHY.

## Contexte et objectifs

Baucoup d'informations sont collectées sur les contextes, les pratiques, les contraintes abiotiques et biotiques, et l'environnement des cultures. Ces données sont destinées à guider les pratiques agricoles au cours des saisons et améliorer les performances de l'agriculture. Il s'agit, en particulier, de gérer les risques associés aux bioagresseurs des cultures. Ces sources de données reflètent nécessairement une grande diversité des informations concernant tout ou partie des relations P-E-Bi-P (pratiques-environnement-bioagresseurs-pertes de récoltes).

L'objectif de ce projet est d'élaborer une démarche générique d'analyse des relations P-E-Bi-P en utilisant des données déjà collectées. Cette démarche est illustrée sur la culture du blé en France.

Cette analyse des relations P-E-Bi-P doit apporter un ensemble d'informations qui, d'une manière générale, permettrait d'identifier (1) les syndromes de santé végétale (SV; dégâts occasionnés par des pathogènes et des ravageurs animaux), (2) les « situations de production » (SP; itinéraires techniques dans des conditions climatiques et socioéconomiques données), et (3) le niveau d'association des associations SV-SP.

## Principaux résultats

Le choix a été fait de mettre en œuvre notre approche sur les données issues du réseau expérimental « blés rustiques » mené par ARVALIS-Institut du végétal, l'INRA et différentes chambres d'agriculture entre 2003 et 2010 sur une grande partie de l'ouest et du centre de la France. Ces essais visent à évaluer le comportement d'une large gamme de variétés présentant différents profils de résistances aux maladies du

point de vue de leurs performances et des maladies foliaires les affectant dans des itinéraires techniques contrastés correspondant à des niveaux d'intrants (azote et produits phytopharmaceutiques) variés (CMGT1 très intensif avec un fort niveau d'intrant à CMGT4 avec un niveau réduit d'intrant) et une large gamme de variétés. Le raisonnement des niveaux d'intensification est basé sur CMGT2, qui représente les recommandations actuelles pour les performances à haut rendement adaptées à chaque situation pédoclimatique. ...

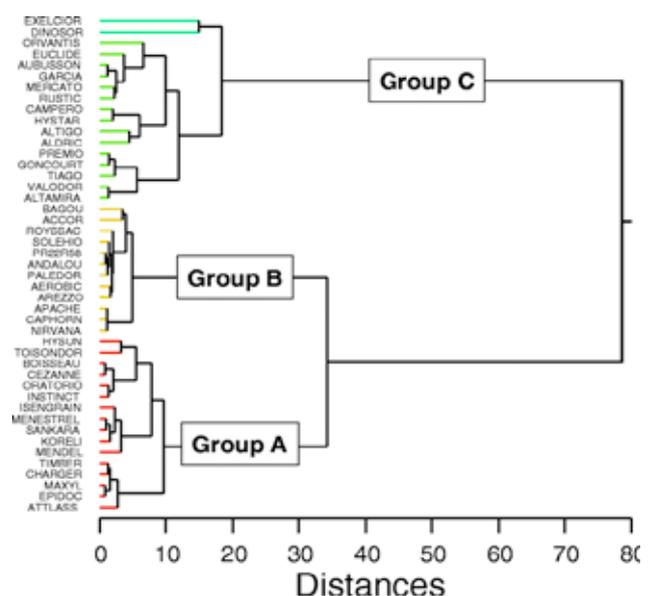


Figure 1 : Analyse hiérarchique des variétés de blé basée sur les intensités de maladie observées.

### ... Groupes de variétés par analyse de classification hiérarchique sur CMGT3

Les profils de sensibilité aux maladies des variétés ont été examinés (Figure 1). La réponse de la maladie d'une variété donnée est considérée comme une fonction de son génotype et de l'année climatique, mais également de la gestion des cultures. Idéalement, cette analyse devrait être effectuée en l'absence de toute protection chimique. Le groupe A, composé de 16 variétés, correspond à des niveaux de maladie modérément bas, sauf pour la rouille jaune (niveaux modérés). Le groupe B, composé de 12 variétés, correspond à des niveaux modérément faibles de rouilles brune et jaune et de fusariose et à des niveaux modérés de d'oidium et de septoriose). Le groupe C, composé de 17 variétés, correspond à des niveaux comparativement plus élevés de rouilles brune et jaune, de fusariose et de septoriose et des niveaux modérés d'oidium.

#### Analyse des facteurs de risque

Une analyse des correspondances multiples a permis de créer une vue d'ensemble des liens multiples entre les années climatiques et les niveaux de la maladie, les variétés et groupes de variétés, et la gestion des cultures. Une analyse des facteurs de risque impliquant des régressions logistiques est proposée dans cette étape. La probabilité d'apparition d'épidémies a été considérée comme le résultat d'une série de facteurs prédictifs : années climatiques, gestion des cultures et des groupes de variétés. Les régressions logistiques (Tableau 1) fournissent des estimations quantitatives de la contribution des facteurs prédictifs à la probabilité d'épidémies pour chacune des cinq maladies considérées.

Par exemple, dans le cas de la rouille brune, les années 2003, 2005, 2007 et 2009 (année 2010 : référence) sont positivement et significativement associées à la probabilité d'avoir des épidémies. En particulier, les rapports des chances (odds ratios) très importants obtenus pour les années 2003 et 2007 indiquent leur forte association avec les épidémies. Les groupes de variétés A et B (C : référence) sont significativement associés aux non-épidémies de BR, et CMGT1-3 (CMGT4 : référence) sont également significativement associés aux non-épidémies.

Les autres régressions logistiques peuvent être interprétées de la même manière. Dans le cas de la rouille jaune (YR), les années climatiques 2007 et 2008 et le groupe de variétés A sont significativement associés aux épidémies, tandis que les niveaux 2 et 3 de gestion des cultures sont associés à des situations non épidémiques.

Disease	Likelihood ratio <sup>a</sup>		Area under ROC curve <sup>b</sup>	Parameter statistics by component (year, variety group, crop management)								
	LR	P		Parameter <sup>c</sup>	Estimate <sup>d</sup>	SE	P	Odds ratio				
BR brown rust n = 679 epidemics	133.779	<0.001	0.902	Constant	-0.923	0.317	<0.001	-				
				VARGROUPA	-0.272	0.147	0.044	0.762				
				VARGROUPB	-0.391	0.147	0.008	0.676				
				CMGT1	-1.568	0.460	0.001	0.208				
				CMGT2	-1.072	0.207	<0.001	0.139				
				CMGT3	-1.141	0.194	<0.001	0.139				
				Year 2003	2.384	0.413	<0.001	19.760				
				Year 2004	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>				
				Year 2005	1.694	0.331	<0.001	5.442				
				Year 2006	0.364	0.395	0.353	1.442				
				Year 2007	4.556	0.326	<0.001	35.213				
				Year 2008	-0.541	0.397	0.173	0.582				
				Year 2009	1.442	0.353	<0.001	4.227				
				YR yellow rust n = 55 epidemics	152.943	<0.001	0.907	Constant	-3.719	0.732	<0.001	-
								VARGROUPA	0.760	0.360	0.032	2.140
VARGROUPB	-1.217	0.451	0.054					0.296				
CMGT1	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>					NA <sup>(e)</sup>				
CMGT2	-2.938	0.481	<0.001					0.054				
CMGT3	-1.473	0.351	<0.001					0.229				
Year 2003	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>					NA <sup>(e)</sup>				
Year 2004	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>					NA <sup>(e)</sup>				
Year 2005	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>					NA <sup>(e)</sup>				
Year 2006	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>	NA <sup>(e)</sup>					NA <sup>(e)</sup>				
Year 2007	1.694	0.360	0.032					5.442				
Year 2008	2.081	0.780	0.006					7.777				
Year 2009	0.224	1.016	0.823					1.256				

**Tableau 1** : Extrait des régressions logistiques de l'apparition des épidémies pour les différentes maladies de blé avec les années, les groupes de variétés et les niveaux de gestion des cultures [BR: rouille brune; YR: Rouille jaune].

## Perspectives

### Transfert

Les conclusions indiquent, par ordre décroissant d'importance, les effets du climat, puis des variétés et enfin celui des pratiques.

La démarche mise en œuvre sur le réseau « blés rustiques », qui constitue un réseau DEPHY EXPE avant l'heure, est détaillée et peut servir de guide d'analyse à certains porteurs de ces réseaux d'expérimentation ayant des objectifs et dispositifs très similaires. La démarche pourra aussi alimenter les réflexions lors de la construction des dispositifs expérimentaux testés dans le cadre du dispositif DEPHY EXPE, puis de leur analyse.

Le porteur de projet et ses partenaires sont à la disposition des acteurs des réseaux DEPHY pour les accompagner dans l'appropriation de la démarche.

### Recherche

Cette démarche permettra d'enrichir les analyses dans le cadre des réseaux DEPHY en fournissant une information complémentaire à celle fournie actuellement pour les acteurs du réseau FERME afin de les accompagner dans leur modification de pratiques, dans le but de réduire les intrants phytopharmaceutiques. ■

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Savary S., Jouanin C., Félix I., Gourdain E., Piroux F., Willocquet L., Brun F., 2016. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: multivariate and risk factor analyses. *European Journal of Plant Pathology* 146(4): 757-778.
- Savary S., Jouanin C., Félix I., Gourdain E., Piroux F., Willocquet L., Brun F., 2016. Assessing plant health in a network of experiments on hardy winter wheat varieties in France: patterns of disease-climate associations. *European Journal of Plant Pathology* 146(4): 741-755.

## Systemes de culture économes et performants du réseau DEPHY

Pour et Sur le Plan Écophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Nicolas Munier-Jolain  
nicolas.munier-jolain@inra.fr  
INRA

### Partenaires

- INRA
- Agrosolutions
- Chambres d'agriculture (Tarn-et-Garonne et Finistère)
- IDELE
- CER-France

### Mots-clés

Réseau DEPHY, système de culture, pesticides, durabilité, évaluation multicritère, multiperformance, DEXiPM, analyse de cycle de vie, situation de production

### En bref

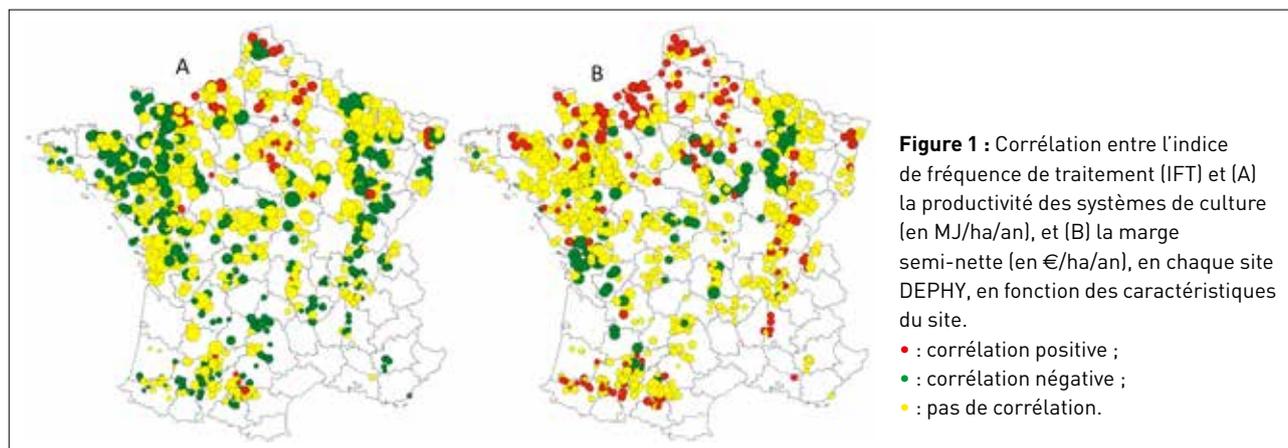
Le projet valorise les données du réseau DEPHY pour produire des connaissances sur les systèmes de culture peu consommateurs de produits phytopharmaceutiques et fournit des outils d'évaluation de la durabilité adaptés au réseau. Ses résultats technico-économiques constituent une contribution majeure à l'évaluation de la pertinence du plan Écophyto. L'analyse de la diversité des pratiques montre notamment qu'il n'y a pas d'antagonisme entre d'une part la faible dépendance aux produits phytopharmaceutiques et d'autre part la productivité et la rentabilité des exploitations, et que l'adoption généralisée des pratiques économes en produits phytopharmaceutiques se traduirait par une amélioration de la balance commerciale de la France.

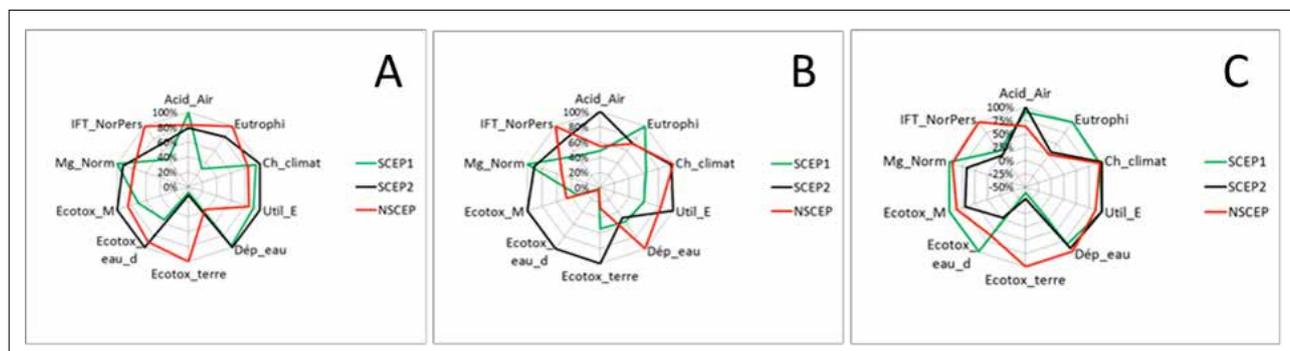
## Contexte et objectifs

Le réseau DEPHY FERME produit un jeu de données unique par le descriptif détaillé des pratiques à l'échelle du système de culture, sur un échantillon large de milieux, de pratiques et de niveaux de dépendance aux produits phytopharmaceutiques. Le premier objectif de SCEP-DEPHY est d'identifier et de caractériser les stratégies de gestion des bioagresseurs faiblement dépendantes des produits phytopharmaceutiques, de montrer que ces stratégies sont diverses et varient en fonction des spécificités du contexte de production, puis d'analyser les conséquences bénéfiques et négatives potentielles de la transition vers des pratiques économes en produits phytopharmaceutiques, en termes économiques, environnementaux et sociaux (à l'échelle de chaque ferme DEPHY, mais aussi à l'échelle régionale et nationale). Le second objectif est de fournir au réseau des outils d'évaluation de la durabilité adaptés et utiles pour l'animation et la communication. Plusieurs méthodes d'évaluation de la multiperformance ont été éprouvées.

## Principaux résultats

- Les fermes DEPHY sont assez représentatives de l'agriculture française. Tous les climats et types de sols sont représentés et les pratiques sont en correspondance avec les résultats d'enquête nationale.
- En grandes cultures, l'association à l'élevage, le contexte climatique et les débouchés locaux pour des cultures industrielles sont des facteurs qui déterminent l'usage de produits phytopharmaceutiques. Les stratégies à faible usage combinent différents leviers dont les plus fréquents sont l'intégration de prairies temporaires dans la rotation, la diversité des rotations, des variétés, des dates de semis, le travail du sol, la restriction de la fertilisation et les réductions de doses des traitements. Les stratégies Écophyto peuvent être différentes selon les contextes de production : dans un contexte céréalier, la diversification est le facteur principal, alors qu'en zone « maïs » ce sont la réduction de dose et le désherbage mécanique. ...





**Figure 2 :** Valeurs moyennes d'indicateurs d'impacts estimés par ACV pour des systèmes économes et performants (SCEP1 et SCEP2) ou non (NSCEP). A : systèmes céréaliers ; B : systèmes avec maïs et prairies ; C : monocultures de maïs.

... • L'analyse des relations entre d'une part le niveau d'usage de produits phytopharmaceutiques et d'autre part la productivité ou la rentabilité des systèmes de grandes cultures montre que ces relations dépendent des situations de production, mais qu'il n'y a pas d'antagonisme dans 94% et 78% des sites DEPHY pour la productivité et la rentabilité, respectivement (Figure 1). Les sites où est observée une relation positive entre IFT et marge sont dans les régions de production de betterave, pomme de terre et maïs semence.

- En viticulture, l'analyse de la diversité des pratiques permet également de discriminer les situations ainsi que les leviers techniques associés aux faibles fréquences de traitement (réduction de doses, effeuillage, travail du sol...), mais l'interprétation des résultats sur la variabilité d'IFT est parfois difficile en raison du biais lié au prestige du vin. Par exemple, le désherbage mécanique est en général mis en place dans des vignobles de terroirs prestigieux pour lesquels les propriétaires ont tendance à sur-protéger les vignes par des traitements fongicides pour diminuer le risque d'apparition de maladies fongiques. En conséquence, il est observé des corrélations positives entre IFT et désherbage mécanique.

- L'outil DEXiPM a été adapté en fonction des données disponibles dans le réseau, pour les grandes cultures, la vigne, les vergers et les cultures légumières. Ces différentes versions permettent de repérer les systèmes performants et de mettre en évidence les leviers d'action susceptibles d'améliorer la durabilité globale. L'outil a notamment permis de souligner le fait que des systèmes économes en produits phytopharmaceutiques et performants économiquement (SCEP) peuvent présenter des limites sur le plan social et environnemental.

- Les méthodes d'analyse de cycle de vie ont été adaptées pour évaluer une centaine de systèmes DEPHY (grandes cultures et cultures légumières). Ces évaluations ont montré une grande variabilité des impacts environnementaux entre les systèmes, sans lien systématique avec le classement SCEP (Figure 2).

- L'adoption généralisée, à l'échelle de la France, des systèmes de culture DEPHY peu consommateurs de produits phytopharmaceutiques mais performants économiquement, compte tenu des contraintes des situations de production, se traduirait par une baisse de 30% de l'IFT sans dégradation de la performance économique des exploitations. La balance commerciale de la France serait améliorée, car les baisses d'exportation de céréales seraient compensées par les baisses d'importation de soja et de pétrole (amélioration de l'autonomie en protéines et baisse de la fertilisation minérale).

## Perspectives

### Transfert

Les résultats du projet valident en partie les objectifs du plan Écophyto, en montrant qu'une baisse significative de la dépendance aux produits phytopharmaceutiques est possible sans affecter les performances économiques de l'agriculture française. Ils contribuent à l'animation du réseau en offrant des pistes individualisées d'évolution des pratiques pour chaque situation particulière du réseau. Enfin, les outils d'évaluation multicritère développés sont utilisables pour la caractérisation des performances de chaque système de culture et pour le repérage semi-automatique de systèmes multiperformants.

### Recherche

Le projet ouvre de nombreuses pistes de recherche : (i) intégration des indicateurs issus des ACV dans l'évaluation de la multiperformance, (ii) intégration d'informations sur la tolérance aux bioagresseurs et sur les structures paysagères pour expliquer la (faible) part de variabilité d'usage de produits phytopharmaceutiques non expliquée par les combinaisons de leviers alternatifs, (iii) adaptation des méthodes utilisées pour l'analyse des trajectoires d'évolution des performances en lien avec l'évolution des pratiques. ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Lechenet M., Dessaint F., Py G., Makowski D., Munier-Jolain N.M., 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability in arable farms. *Nature Plants* (sous presse).
- Lechenet M., Makowski D., Py G., Munier-Jolain N.M., 2016. Profiling farming management strategies with contrasting pesticide use in France. *Agricultural Systems*, 149, 40-53.
- Mailly F., Hossard L., Barbier J.M., Thiollot-Scholtus M., Gary C., 2017. Quantifying the impact of crop protection practices on pesticide use in wine-growing systems. *European Journal of Agronomy*, 84, 23-34.
- Bockstaller C., Marion-Wuillemin M., Akkal-Corfini N., Munier-Jolain N., Corson M., 2015. Assessing environmental impacts of cropping systems: comparison of an indicator-based and a life-cycle analysis-based method. 5. *International Symposium for Farming Systems Design (AGRO2015)* (2015/09/07-10) Montpellier [FRA].

## Mieux profiter de la synergie entre réseaux d'observations, expertise et modélisation pour l'élaboration du Bulletin de Santé du Végétal

Pour et Sur le Plan Écophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

François Brun

francois.brun@acta.asso.fr

ACTA – Tête de réseau des instituts des filières animales et végétales

### Partenaires

- ARVALIS - Institut du végétal : Emmanuelle Gourdain
- CA Yonne : Emilie Ribérolles
- CIRAME : Ivan Sivadon
- CRA Centre : Thierry Bordin
- CRA Champagne-Ardenne : Karim Benredjem
- CRAMP : Barbara Cichosz
- IFV : Audrey Petit
- INRA : David Makowski
- Terres Inovia : Sébastien Gervois

### Mots-clefs

Blé, vigne, colza, statistique, épidémiologie, maladie

### En bref

La Surveillance Biologique du Territoire (SBT) repose sur le suivi d'un réseau d'observations des principales maladies et ravageurs. Ces observations sont utilisées pour élaborer le Bulletin de Santé du Végétal (BSV), mais la valorisation actuelle de ces données reste limitée.

L'objectif de SynOEM est de développer des outils pour faciliter l'analyse de risque faite en cours de campagne. Les travaux ont concerné différentes maladies et ravageurs du blé, de la vigne et du colza.

*In fine*, des outils opérationnels ont été déployés et utilisés dès 2015 par les acteurs du BSV sur le mildiou de la vigne en Midi-Pyrénées et la septoriose du blé en Grand-Est et Centre. L'extension à d'autres régions et maladies est en cours.

### Contexte et objectifs

La Surveillance Biologique du Territoire (SBT) s'est renforcée en France depuis 2009, à la suite de la mise en place du plan Écophyto. Elle repose sur le suivi d'un réseau de parcelles cultivées. Plusieurs maladies et ravageurs sont observés selon des protocoles harmonisés. Les observations sont utilisées pour élaborer le Bulletin de Santé du Végétal (BSV), mais la valorisation actuelle de ces données reste limitée et repose essentiellement sur des analyses descriptives.

Ce projet a pour objectif de mieux formaliser et améliorer les processus d'analyse et d'intégration des différentes sources d'information lors de l'édition des BSV. Il vise notamment à améliorer la représentativité du message contenu dans le BSV. Il s'agit de développer des outils pour mieux valoriser les réseaux d'observation, les modèles épidémiologiques, l'expertise des acteurs et les synergies entre ces sources d'information. Ces outils doivent faciliter l'analyse de risque faite en cours de campagne.

Les travaux ont concerné différentes maladies et ravageurs essentiellement sur le blé, la vigne, le colza, mais des extensions à des cultures tropicales ont également été testées.

### Principaux résultats

Les travaux reposent sur quatre cas d'étude principaux : 1) mildiou de la vigne en région Midi-Pyrénées, 2) septoriose du blé en région Champagne-Ardenne, 3) sclérotinia du colza

en région Bourgogne, 4) tordeuse de la vigne en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Certains résultats ont fait l'objet d'une extension à d'autres régions et d'un transfert de la méthodologie à deux cultures tropicales (banane et patate douce).

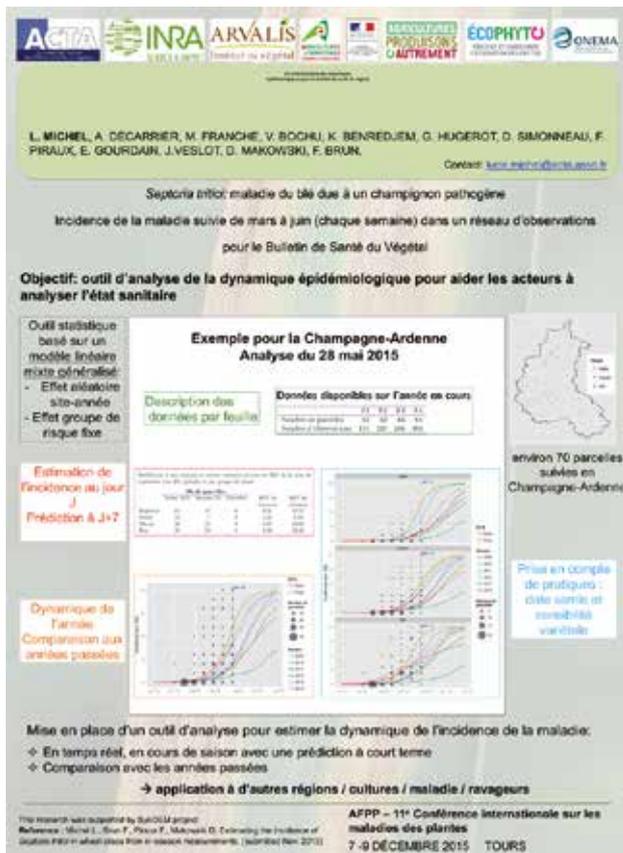
### Performance des modèles

Les observations collectées dans le cadre du BSV peuvent concerner différentes variables comme des mesures d'incidence, de sévérité ou encore de comptage. Aussi, il a été proposée une démarche générique basée sur un modèle linéaire mixte généralisé.

Les modèles proposés sur les différentes maladies, notamment sur blé et vigne, présentent des qualités de prédiction très satisfaisantes pour qualifier l'année en cours. La qualité de prédiction à un horizon au-delà d'une semaine se dégrade, mais la prédiction à une semaine semble raisonnable et la plus utile dans ce cadre où de nouvelles données sont collectées chaque semaine. Sur le blé, la qualité de prédiction à l'échelle nationale a été améliorée en intégrant des indicateurs météorologiques ou basés sur des observations précoces. Néanmoins, il a été décidé de conserver le modèle le plus simple pour une mise en œuvre opérationnelle à court terme.

### Des outils opérationnels

Le temps disponible est très réduit entre la collecte des observations sur le terrain et la diffusion des éditions du ...



**Figure 1 :** Extrait du rapport sur la septoriose du blé présentant l'analyse de la dynamique épidémiologique.

... BSV. Des outils de saisie des observations existent et sont utilisés (EPICURE, Vigiculture et Latitude dans les cas d'étude de notre projet), mais des marges de progrès sont à trouver. Pour la vigne en Midi-Pyrénées, a été mise en place une automatisation des extractions d'EPICURE, du traitement des données et de leur mise en forme. Cela permet, en temps réel, à l'animateur d'évaluer le niveau de remontée des informations par vignoble, de se focaliser sur les éléments saillants de l'analyse et d'avoir des éléments (graphiques ou tableaux) prêts à l'emploi pour l'analyse collective, voire l'édition. La mise en place de cette automatisation et l'accès des observateurs à ces rapports les incitent à saisir rapidement leurs observations dans l'outil EPICURE.

Il a été procédé de même pour le blé en région Centre et Champagne-Ardenne. L'outil d'analyse de la dynamique épidémiologique a été intégré dans les rapports hebdomadaires.

En gagnant en efficacité sur ces aspects très opérationnels, l'enjeu est de libérer du temps pour que les rédacteurs se concentrent sur l'interprétation de la situation sanitaire. Cela permet aussi de laisser plus de temps à l'utilisation de nouveaux outils d'analyse. Ainsi, à partir d'une interface web, les acteurs peuvent directement éditer les rapports mis à jour. Ces rapports (Figure 1) avec beaucoup d'informations sont destinés au travail de préparation du bulletin et discussion au sein de la cellule d'analyse.

### D'autres travaux

Pour la tordeuse de la vigne, une démarche similaire a été entamée en confrontant les modélisations des pics de vol liés aux différentes générations, aux résultats des simulations du modèle biologique de développement. On pourrait corriger les décalages observés dans ces simulations pour les générations 2 et 3 grâce aux observations lors du premier pic. Sur le sclérotinia du colza, les conditions météorologiques favorables au développement de la maladie ont été modélisées. Ce modèle permettrait de classer différentes situations selon le risque épidémiologique et d'identifier les conditions climatiques limitant ou favorisant l'infection.

## Perspectives

### Transfert

Les différents indicateurs proposés et les modèles statistiques pour prédire les dynamiques épidémiologiques permettent aux acteurs de mieux qualifier la dynamique de la maladie, notamment en se situant par rapport aux années passées et en analysant la prédiction à court terme. *In fine*, des outils opérationnels ont été déployés et utilisés dès 2015 par les acteurs du BSV sur le mildiou de la vigne en Midi-Pyrénées et la septoriose du blé en Champagne-Ardenne et Centre. Ces outils sont des applications web permettant aux acteurs d'éditer automatiquement un rapport à jour contenant un ensemble de graphiques et de tableaux lors de la rédaction du Bulletin hebdomadaire.

### Recherche

L'extension à d'autres régions et maladies est prévue pour 2017. L'ergonomie des outils est également revue en profitant de la plateforme API-AGRO pour accéder aux données en temps réel et rendre le processus plus automatique. Des suites sont en cours pour combiner l'information régionale à une expertise ou observation locale afin d'apporter une information utilisée à l'échelle de l'exploitation. ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Mieux valoriser les réseaux d'épidémiosurveillance lors de l'élaboration du Bulletin de Santé du Végétal. Mémoire de thèse de Lucie Michel. mai 2016.
- Michel L., Brun F., Piraux F., Makowski D., Soumis à Crop Protection, juin 2016. A framework based on generalised linear mixed models for analysing pest and disease surveys.
- Michel L., Brun F., Piraux F., Makowski D., 2016. Estimating the incidence of Septoria leaf blotch in wheat crops from in-season field measurements. European Journal of Plant Pathology.
- Michel L., Decarrier A., Franche M., Bochu V., Benredjem K., Hugerot G., Simonneau D., Piraux F., Gourdain E., Veslot J., Makowski D., Brun F., 2015. Un outil d'analyse des dynamiques épidémiologiques pour le bulletin de Santé du Végétal : application à la septoriose du blé. AFPP CIMA.
- Brun F., Veslot J., Michel L., Cichosz B., Petit A., Makowski D., 2015. Quelles pistes d'amélioration pour mieux valoriser les données et les simulations dans le Bulletin de Santé du Végétal ? AFPP CIMA.

## Valeur et optimisation des dispositifs d'épidémiosurveillance dans une stratégie durable de protection des cultures

Pour et Sur le Plan Écophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Xavier Reboud  
xavier.reboud@inra.fr  
INRA

### Partenaires

- INRA : Jean-Noël Aubertot, Marc Barbier, Vincent Cellier, Nathalie Dubois-Peyrard, Sabrina Gaba, Stéphane Lemarié
- IRSTEA : Catherine Roussey

### Mots-clefs

Épidémiosurveillance, projection, décision individuelle, phytoprotection, documents d'archives, croisement économie-phytopathologie.

### En bref

Le projet VESPA s'est penché sur les apports de l'épidémiosurveillance végétale et différentes contributions en découlent. Une archive retraçant cinquante ans d'avertissements sur la santé des cultures a été réunie, numérisée et adossée à un portail internet de consultation. Plusieurs approches conduites attribuent une valeur aux informations de l'épidémiosurveillance : l'une découle du simple fait de venir conforter l'opinion des acteurs sur les risques phytosanitaires, l'autre évalue via la modélisation l'impact sur l'évolution potentielle des épidémies. Ensemble, ces travaux mettent en regard la perception des pressions des bioagresseurs et auxiliaires au sein des objectifs d'Écophyto.

## Contexte et objectifs

La partie la plus visible du travail réalisé par le réseau d'épidémiosurveillance végétale en France concerne les « Bulletins de Santé du Végétal ». Diffusés librement sur internet, ces documents décrivent l'état des principaux risques sanitaires encourus pour les cultures, les vergers et les jardins. En support du travail de rédaction réalisé par 4 000 agents, des observations précises complétées par la modélisation ont été conduites sur plus de 15 000 sites. Cette expertise est traduite annuellement dans plus de 3 000 bulletins sur lesquels des agriculteurs ou des conseillers vont baser leur décision d'intervention avec différentes techniques dont le recours aux produits phytopharmaceutiques.

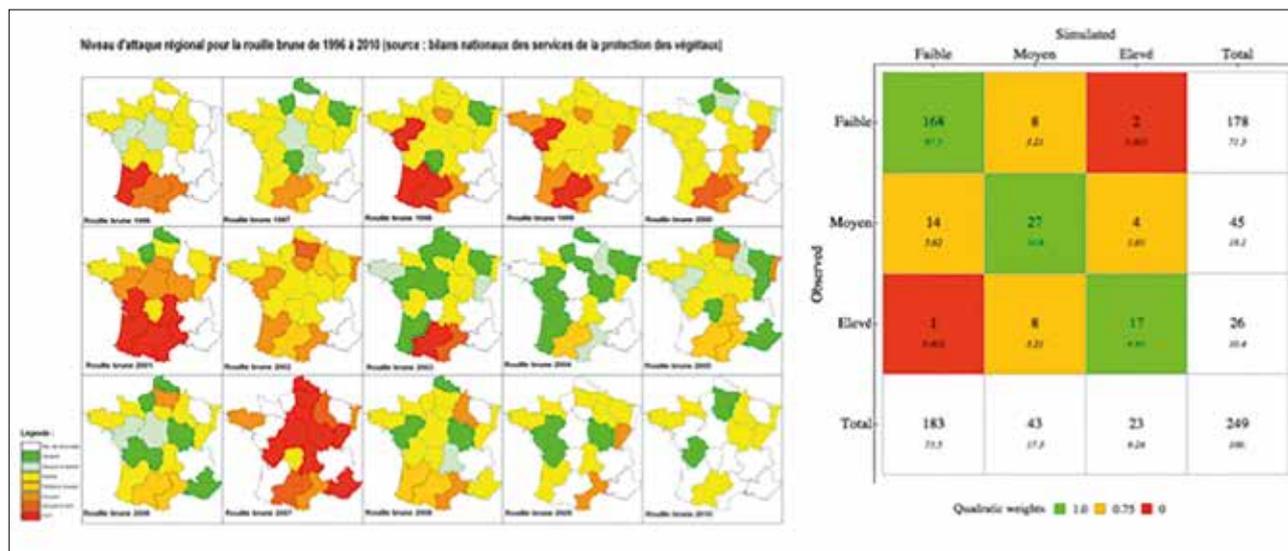
Logiquement l'épidémiosurveillance végétale coûte cher ; aussi, l'importance de son action est-elle régulièrement questionnée. A travers le projet, il s'agissait de mieux caractériser ce que ce dispositif délivre comme cadre de référence pour l'action : de l'optimisation des moyens de lutte à une contribution effective à la réduction d'usage des produits phytopharmaceutiques, pour peu que l'efficacité de différentes mesures prophylactiques soit mieux renseignée et relayée à travers la modulation du risque phytosanitaire encouru.

## Principaux résultats

VESPA a réalisé une numérisation de plus de 40 000 documents étalés sur 50 ans, en compilant les Avertissements Agricoles (essentiellement en grandes cultures) puis les Bulletins de Santé du Végétal. Un portail web a été construit en parallèle pour en permettre librement la consultation. Il a été développé un modèle permettant d'étudier l'in-

fluence de la densité du réseau d'observations et de la profondeur de l'historique de l'information pris en considération, sur le rapport entre l'étendue de l'épidémie d'un ravageur cible et le nombre total de traitements phytosanitaires appliqués en cours de saison pour la contenir. Une première idée majeure sous-jacente était que, pour les organismes prévisibles d'une année sur l'autre, une partie de l'information compilée les années antérieures gardait de sa pertinence à être adossée à la campagne en cours. Une seconde idée visait à clarifier les économies permises en cours de saison par des actions précoces.

La modélisation des épidémies découlant de l'exploration des variations interannuelles et inter-régions, illustrée avec le cas de la rouille brune du blé, traduit bien les avancées que la caractérisation du risque phytosanitaire peut étayer. Sur la gauche de la Figure 1, les cartes illustrent l'hétérogénéité des situations rencontrées tout en suggérant la persistance d'effets régionaux opposant le nord au sud ainsi que des effets « année ». La partie droite rend compte de la précision d'un modèle épidémiologique reposant uniquement sur quelques indicateurs climatiques. Contrairement aux modèles épidémiologiques « classiques », les variables sélectionnées sans *a priori* retiennent la période estivale de l'année précédente. C'est en effet pendant cette période d'inter-culture que l'agent pathogène biotrophe strict (qui ne peut survivre qu'au sein d'une plante) doit trouver des réservoirs lui garantissant le relais (le « green bridge » des épidémiologistes). Il est assez remarquable que de telles conclusions, relativement fines, puissent être tirées de données qualitatives de faible résolution spatiale (la région). Une étape supplémentaire consisterait à pouvoir intégrer d'autres covariables modulant le risque phytosanitaire. Il serait pertinent que le taux d'adoption des mesures pro- ...



**Figure 1 :** Caractérisation des variations d'intensité des attaques de rouille brune sur le blé à travers les bilans de campagne et sa modélisation à des échelles annuelles et régionales.

... phylactiques, la caractérisation à large échelle de l'environnement biotique des cultures, ou la connaissance du statut de résistance des variétés les plus utilisées, puissent venir apporter des pondérations exploitables.

En outre, VESPA conclut que l'épidémiologie contribue à l'entretien de l'expertise en région. La fourniture d'un avis a un impact sur l'état sanitaire des cultures et influe sur l'évolution des épidémies. Modulé par la biologie des espèces suivies, un réseau d'observations à une échelle intermédiaire d'agrégation permet de gérer au mieux les foyers. Les avis émis contribuent à forger et renforcer l'opinion des acteurs sur l'état de la situation phytosanitaire. La valeur, que chaque information représente à travers la réduction permise de l'incertitude, a été évaluée entre 2 et 3 €. Cette valeur attribuée par les acteurs est à mettre en regard des 70 centimes/ha que représente le coût moyen de l'épidémiologie.

Sur la base de son activité régulière, l'épidémiologie a aussi favorisé l'articulation d'une information standardisée à d'autres sources de données.

## Perspectives

### Transfert

Ont été posées les bases d'une utilisation des archives

réunies pour dresser une échelle semi-quantitative des pressions biotiques comme résultant d'un compromis entre leur fréquence, la facilité de leur observation, leur dangerosité, ou encore leur rang relatif à d'autres pathosystèmes sur une même culture. Ces informations viendront étayer les dires d'experts. Le transfert s'illustre aussi à travers la facilité de libre consultation des archives via le portail à l'adresse [www.pestobserver.eu](http://www.pestobserver.eu).

### Recherche

Le contenu sémantique des messages de l'épidémiologie végétale a évolué en cinquante ans. On constate que les messages d'alerte sont maintenant susceptibles de moduler le risque sanitaire en fonction des mesures prophylactiques prises. Une généralisation de cette prise en considération des mesures préventives constitue une reconnaissance de leur valeur. Si l'on pouvait caractériser l'impact sur le risque sanitaire de variables à grandes échelles telles que la composition de l'assolement, la densité des infrastructures (haies, bandes enherbées) ou le taux d'adoption de pratiques alternatives en les rapprochant des observations d'épidémiologie, cela viendrait étayer les opportunités locales de modifier les pratiques de phytoprotection. Aussi une recommandation sera de mieux coordonner les réseaux d'épidémiologie et de fermes DEPHY. ■

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Portail internet donnant accès aux archives de l'épidémiologie : <http://www.pestobserver.eu/reporting>
- Description de l'ontologie 'FrenchCropUsage' pour l'automatisation de la recherche d'information sémantique en français: <http://exclu.agroportal.lirmm.fr/ontologies/CROPUSAGE>.
- Roussey C., Bernard S., Pinet P., Reboud X., Cellier V., 2016. Gestion sémantique des bulletins de santé du végétal dans le projet Vespa. In *Atelier IN-OVIVE@ IC 2016* (pp. 12-p).
- Turenne N., Andro M., Corbière R., Phan T. T., 2015. Open data platform for knowledge access in plant health domain: VESPA Mining. *arXiv preprint arXiv:1504.06077*.

## COmportement et Usage Des Pesticides : POUr des Contrats Environnementaux innovants

Programme Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Sophie Thoyer  
 thoyer@supagro.inra.fr  
 INRA - Montpellier Sup Agro - CNRS - Université Montpellier I

### Partenaires

- Laboratoire Montpellierain d'Économie Théorique et Appliquée (LAMETA), Montpellier Sup Agro, INRA

### Mots-clés

Contrats agro-environnementaux, normes sociales, mesure d'impact, économie expérimentale, économie comportementale, aires d'alimentation de captage

### En bref

Les mesures agroenvironnementales de réduction des pesticides ont un taux d'adoption faible. Leur efficacité et la durabilité des changements de pratiques qu'elles induisent sont souvent remises en cause. Certains programmes d'action s'enlisent dans des situations conflictuelles dans lesquelles les agriculteurs se sentent stigmatisés, freinant l'évolution des comportements en matière d'usage de pesticides. Comment obtenir plus de gains environnementaux avec moins d'argent public ? Ce projet propose de combiner des incitations économiques et non économiques pour accélérer l'émergence de dynamiques individuelles et collectives vers des pratiques plus économes en pesticides.

## Contexte et objectifs

Ce projet analyse, dans une approche fondée sur l'économie publique et comportementale associant économie, psychologie et sociologie, comment les facteurs comportementaux et cognitifs peuvent limiter ou renforcer la portée des outils d'intervention publique incitant les agriculteurs à limiter les pesticides. Le comportement des individus ne relève pas purement de la rationalité économique mais est aussi formé par leurs motivations personnelles et par les normes sociales dans lesquelles ils s'inscrivent. La compréhension fine de ces comportements est mobilisée pour proposer des dispositifs innovants associant incitations monétaires et comportementales, visant à renforcer l'efficacité de l'action publique, à améliorer son acceptabilité et sa légitimité, à mieux évaluer ses effets et à mieux communiquer sur ses impacts. On appelle ces interventions publiques, qui permettent de renforcer les effets des incitations économiques sans augmenter leurs coûts budgétaires, des *nudges*, traduit en français par « coups de pouce ».

## Principaux résultats

L'ensemble du projet s'est d'abord appuyé sur un bilan des mesures agro-environnementales territorialisées (MAEt) et des programmes d'action dans les aires d'alimentation de captage à partir de deux enquêtes nationales auprès d'agriculteurs éligibles (763 réponses) et d'animateurs ou opérateurs de MAEt (259 réponses).

Outre un bilan sur les MAEt (Figure 1), la synthèse des avis a permis de formuler des propositions d'évolution pour la PAC 2014 et de développer trois axes d'investigation pour des mesures innovantes :

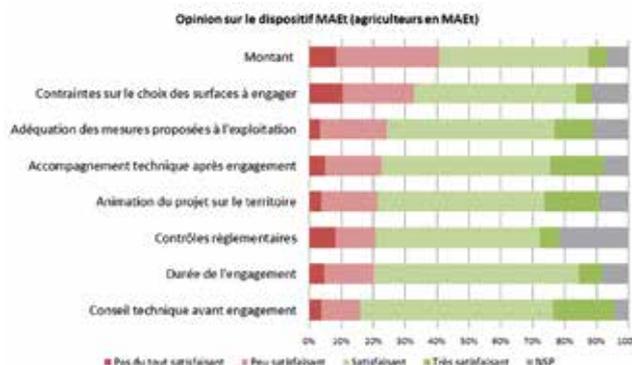


Figure 1 : Enquête nationale sur les MAEt.

- (1) Efficacité d'un **contrat à bonus conditionnel** : si, au terme des cinq années du contrat, la surface du territoire engagée dans une MAEt a atteint un certain seuil, alors chaque viticulteur-contractant reçoit un bonus financier qui s'ajoute à son paiement annuel. L'introduction de ce bonus permet de réduire le budget de plus de 20 % pour un même résultat environnemental. L'enquête de modélisation des choix (conduite sur 310 viticulteurs du Languedoc-Roussillon) révèle la sensibilité des agriculteurs à des dispositifs qui les rassurent sur la participation de leurs pairs à la MAEt et qui valorisent leur engagement collectif à l'échelle d'un territoire (Figure 2). Il a été aussi analysé l'efficacité et l'acceptabilité de **contrats agro-environnementaux à subvention conditionnelle**, qui ne seraient activés et payés que si un seuil minimal d'intention de participation est atteint à l'échelle d'un territoire. Ce type de dispositif peut être efficace à condition de réussir à engager de nom- ...

	Mesure A	Mesure B	
Réduction des herbicides par rapport à vos pratiques actuelles ①	Réduction de 30 % 	Réduction de 60% 	Je préfère conserver mes pratiques actuelles
Désherbage par taches supplémentaire (au max 10% de la surface engagée) ①	Autorisé 	Autorisé 	
Bonus collectif final versé à chaque viticulteur engagé si 50% de la surface du vignoble est engagée ①		Bonus final 	
Accompagnement administratif et technique personnalisé ①	Non inclus 	Inclus 	
Montant par hectare engagé et par an ①	170 €/ha/an	330 €/ha/an	
Cochez votre option préférée →	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure 2 : Exemple de carte de choix pour l'enquête sur le bonus conditionnel.

... breux agriculteurs dès le début du programme, ce qui suppose un gros effort initial d'information et d'animation.

- (2) **La permanence des bonnes pratiques agro-environnementales au-delà de la durée du contrat** a également été analysée. Le problème de « fin de contrat » est une des principales critiques faites aux MAE, soulignant leur manque d'effet sur le long terme et leur dépendance aux financements externes. Informer les agriculteurs sur l'intention qu'ont les autres agriculteurs de maintenir ou non les pratiques adoptées pendant la MAE, comme indicateur de la norme sociale, influence significativement leur décision individuelle : 43 % des 395 agriculteurs interrogés déclarent avoir l'intention de maintenir les pratiques au-delà du contrat. Mais lorsqu'on leur indique que 80 % des agriculteurs se déclarent prêts, à maintenir leurs pratiques au-delà de la durée du contrat, ils ont une probabilité 2,8 fois plus élevée de déclarer qu'ils feront de même, par rapport à ceux qui n'ont pas reçu cette information (groupe de contrôle).

- (3) **Test d'un nudge portant sur la formulation des objectifs du programme agro-environnemental** visant à « activer » des normes personnelles. Cette analyse a été conduite sur des enjeux de biodiversité mais les résultats sont transposables au cas des pesticides. Une enquête de modélisation des choix a permis de démontrer que les agriculteurs sont prêts à s'engager davantage, et pour un paiement moindre, pour des contrats de préservation de l'environnement financés par la collectivité (contrats MAE) plutôt que pour des contrats de compensation environnementale, financés par des opérateurs privés, qui compensent les pertes de biodiversité induites par des projets de développement.

## Perspectives

### Transfert

- Expertise et analyse de l'appel à projets « création de prairies pour la protection des ressources en eau » de l'Agence de l'eau Artois-Picardie.

- Projet engagé avec 5 collectivités territoriales en France pour tester des mesures innovantes dans les aires d'alimentation de captage prioritaires.

- Collaboration avec le collectif des animateurs de MAE du Languedoc-Roussillon pour améliorer l'efficacité de leur action. Expérience lancée avec une coopérative viticole pour la mise en place d'un nudge utilisant les normes de comparaison afin d'inciter les viticulteurs à s'engager dans des démarches de réduction des pesticides.

### Recherche

Il est important 1) de pouvoir tester de façon plus objective l'impact net des incitations financières proposées aux agriculteurs en mettant en place des expériences pilotes avec un protocole d'évaluation comparant des groupes « traités » et des groupes de contrôle ; 2) d'approfondir le rôle que peuvent jouer les normes sociales (descriptives et injonctives) dans l'adoption et la diffusion de pratiques plus économes en pesticides parmi les agriculteurs. Deux projets de recherche ont été lancés sur ces thèmes, le premier dans le cadre d'un programme collaboratif financé par le FEDER, le second dans le cadre de l'ANR (projet PENSEE). ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Kuhfuss L., Préget R., Thoyer S., Hanley N., Le Coent P., Désolé M., 2016. Nudge, social norms and permanence in agri-environmental schemes, *Land Economics*, Vol 92, No 4.
- Kuhfuss L., Préget R., Thoyer S., Hanley N., 2016. Nudging farmers to sign agri-environmental contracts: the effects of a collective bonus, *European Review of Agricultural Economics*, Vol 43, No 3, pp 609-636.
- Grolleau G., Mzoughi N., Thoyer S., 2015. Les incitations non-matérielles dans la politique agro-environnementale : peut-on faire mieux avec moins ? *Review of Agricultural and Environmental Studies*, Vol 96 no 2, pp 241-257.
- Kuhfuss L., Préget R., Thoyer S., 2014. Préférences individuelles et incitations collectives : quels contrats agroenvironnementaux pour la réduction des herbicides par les viticulteurs ? *Review of Agricultural and Environmental Studies*, 95(1) :111-143.

## Réalités et perspectives de l'écologisation en arboriculture fruitière - Pour une approche intégrée à partir du cas des vergers de pêchers et d'abricotiers en Rhône-Alpes

Programme Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Claire Lamine  
 claire.lamine@inra.fr  
 INRA

### Partenaires

- Chambres d'agriculture de Drôme et d'Ardèche
- Association Fruits Plus
- AOP Abricot
- FREDON Rhône-Alpes

### Mots-clefs

Système sociotechnique, transitions, réduction des produits phytopharmaceutiques, idéotypes variétaux, pratiques culturales, interactions variété/conduite, verger, *Prunus*

### En bref

Le projet « Prunus » a exploré la question de la (re)conception de vergers « durables » au travers d'une approche intégrée prenant en compte à la fois le choix variétal, l'agencement du verger, les conduites de cultures et les évolutions plus larges du système « agri-alimentaire » (filières, politiques publiques, recherche, conseil). Il a associé des chercheurs en sciences sociales, en agronomie et en génétique, ainsi que plusieurs acteurs de la filière autour d'une analyse socio-historique élaborée avec eux, d'enquêtes auprès des arboriculteurs visant à évaluer les réalités et possibilités de réduction d'intrants et enfin de trois séminaires de co-construction autour de l'innovation variétale.

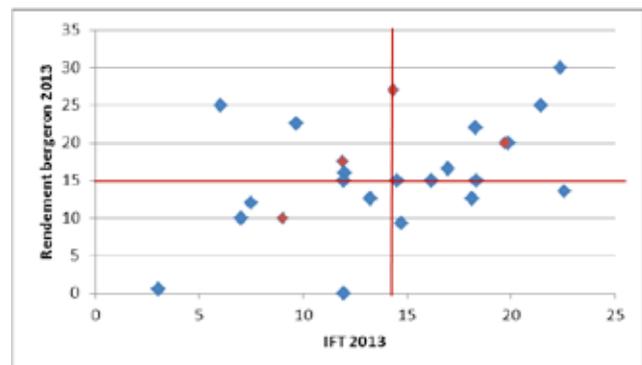
### Contexte et objectifs

L'évolution récente du verger de *Prunus* en Drôme-Ardèche (déclin du pêcher, substitution partielle par l'abricotier), dans un contexte de crise fruitière, pose question quant à la viabilité socio-économique des exploitations et de la filière et aux impacts en termes de gestion phytosanitaire. Cette évolution ouvre-t-elle des possibilités de réduction d'intrants et quelles en sont les difficultés ou marges de manœuvre ? Y a-t-il modification des stratégies de protection du verger et adoption de nouveaux leviers de gestion des bioagresseurs avec le passage à l'abricot ? Quel(s) impact(s) du type de conseil et des modes de commercialisation sur les pratiques de protection ? Quels sont les freins à l'adoption de méthodes de substitution et de variétés résistantes ? Sur quelles bases co-construire un verger de *Prunus* durable pour demain ?

### Principaux résultats

L'analyse socio-historique, co-construite avec les partenaires de la filière, basée sur l'étude des évolutions dans les exploitations, la mise en marché et les politiques publiques et l'analyse de leur influence sur l'innovation variétale, a montré comment l'on passait, à partir des années 1980-1990, à un modèle d'innovation variétale fondé non plus sur la production (critères de rendement et de régularité) mais sur le produit (critères d'aspect, de conservation, etc.). Ceci résulte des contraintes imposées par l'aval, dans un contexte d'allongement des calendriers de production et se fait aux dépens des possibilités de réduction d'intrants et même de la pérennisation du verger et des exploitations. Ceci souligne aussi par contraste l'enjeu d'une approche intégrée et multipartenaire.

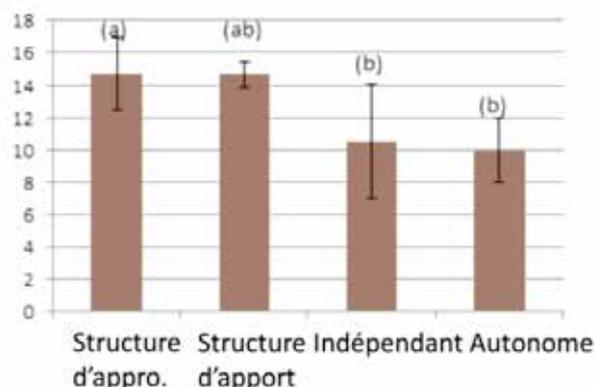
L'analyse des pratiques de protection s'est appuyée sur une enquête auprès de 35 producteurs représentatifs de la diver-



**Figure 1** : IFT et rendement pour la variété Bergeron en 2013. Chaque point représente un verger. Les lignes rouges correspondent aux valeurs médianes pour chacune des variables (n=24).

sité des pratiques de protection, des débouchés, des zones de production, du type de conseil, du degré de diversification. Elle montre que pour la filière de l'abricot le niveau d'adoption de méthodes alternatives aux produits phytopharmaceutiques est globalement faible. Certains freins liés aux conditions du milieu sont difficilement surmontables (sol caillouteux, pente), mais certains leviers pourraient être mis en place dans les vergers existants (ex. : argile) ou lors de nouvelles plantations (désherbage mécanique qui demande une irrigation surélevée). Le levier matériel végétal (sensibilité variétale et hauteur du greffage) est peu mobilisé, les variétés historiques restant prédominantes. L'utilisation des produits phytopharmaceutiques (mesurée par l'indice de fréquence de traitement (IFT)) varie selon les vergers, ce qui atteste de contextes et de stratégies fort différents. Il a également été observé des niveaux de rendement élevés avec des IFT faibles. Le choix de variétés tardives augmente l'IFT du fait d'une pression biotique plus élevée en fin de saison. ...

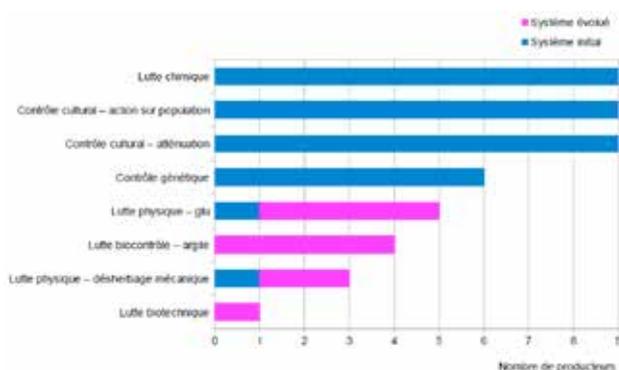
Nb trt moyen



**Figure 2 :** Nombre de traitements moyen selon l'origine du conseil. « Structure d'appro. = Structure d'approvisionnement = fournisseurs d'intrants ; Structure d'apport = organisations de producteurs ou autres structures de mise en marché ; Indépendant = chambres d'agriculture, associations ou sociétés de conseil ; Autonome = l'agriculteur ne reçoit pas de conseils de l'extérieur au moment de l'enquête ».

... Les producteurs en circuits courts utilisent moins de produits phytopharmaceutiques, du fait d'une tolérance plus élevée aux défauts visuels et d'une conservation courte des fruits, mais ne mobilisent pas plus de méthodes alternatives. Les exploitations ayant un conseil non issu des structures d'approvisionnement utilisent également moins de produits phytopharmaceutiques mais ont recours à davantage de méthodes alternatives (Figure 2).

Enfin, l'analyse des changements de pratiques et processus d'apprentissage dans un groupe DEPHY FERME Abricot montre les effets d'une dynamique collective, qui peut permettre de passer le cap sur des techniques alternatives que d'autres ont déjà testées (Figure 3).



**Figure 3 :** Leviers utilisés pour la protection du verger d'abricotier dans le groupe FERME DEPHY : nombre d'agriculteurs utilisateurs en début et fin de programme (2011-2015). Source : bilan 2015, CA 26/07.

De fait, dans ce groupe DEPHY (n=9 exploitations), les IFT 2013 pour la variété régionale Bergeron sont sensiblement inférieurs ( $10.6 \pm 3.2$  IFT contre  $14.4 \pm 5.6$  en moyenne dans l'enquête, n=21) et les taux d'adoption de méthodes alternatives supérieurs.

En fin de projet, trois séminaires de construction d'idéotypes plus « durables » ont été organisés. Ils ont permis de confronter les attentes et partager les regards des acteurs incarnant les maillons du système d'innovation variétale (chercheurs, pépiniéristes, évaluateurs, arboriculteurs, conseillers, metteurs en marché, instituts techniques, station régionale) afin de co-construire une démarche de sélection multicritère ciblant la réduction des risques phytosanitaires et climatiques ainsi que la durabilité des exploitations. Les variétés de demain devront ainsi être non seulement productives et goûteuses, mais aussi rustiques et peu sensibles aux bioagresseurs pour être cultivées sous faibles niveaux d'intrants.

## Perspectives

### Transfert

Les analyses montrent qu'il y a un réel potentiel de réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et qu'il est nécessaire non seulement de développer de nouveaux leviers techniques mais aussi de produire **davantage de références et d'espaces d'échanges sur ces leviers**. Le levier variétal reste majeur (notamment sur les maladies), mais il faut sortir des travaux d'amélioration ciblés sur des caractères ponctuels pour **privilégier une approche multicritère** dans l'innovation variétale. Ce projet montre l'intérêt des démarches multi-acteurs pour mettre en discussion les contraintes et critères des différents maillons du système, ce qui est d'ailleurs remobilisé dans l'actuel projet CASDAR CaRessPrunus.

### Recherche

Ce projet a soulevé des questions à approfondir : comment mobiliser plus largement et conjointement les acteurs des filières et du conseil pour faire jouer les leviers que sont les modes de commercialisation et les réseaux de conseil, d'information et d'échanges ? Des questions nouvelles ont émergé, par exemple sur les impacts des exigences de cahiers des charges de l'aval, telle la limitation du nombre de matières actives dans les résidus sur fruits, sur les pratiques de protection et les risques d'apparition de résistances aux produits phytopharmaceutiques en verger. En sociologie, le rôle des nouvelles « arènes de transition » du système d'innovation variétale reste à examiner plus finement. ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Lamine C., Pluvinage J., Aubenas R., Faugier V., Simon S., Clauzel G., Lamberet M., Penvern S., Stévenin S., Buléon S., Garçon L., Bui S., Audergon J.-M., 2015. Innovation variétale en Prunus, 1960-2013 : les enseignements d'une analyse socio-historique co-construite avec les acteurs. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 65, 5-18.
  - Kouchner C., 2014. Analyse des stratégies de protection en Prunus (pêcher - abricotier) en Rhône-Alpes : Mise en perspective par rapport aux trajectoires d'exploitation dans un contexte de changement d'espèce fruitière et Influences du système socio-technique. Mémoire ingénieur AgroParisTech, 82p.
  - Desgranges M., 2015. Filière de l'innovation variétale de *Prunus armeniaca*. Mémoire de Master2 Université d'Avignon, 32 p.
  - Lamine C., Pluvinage J., Aubenas R., Faugier V., Simon S., Clauzel G., Lamberet M., Penvern S., Stévenin S., Buléon S., Garçon L., Bui S., Audergon J.-M. (2015) Innovation variétale en Prunus, 1960-2013 : les enseignements d'une analyse socio-historique co-construite avec les acteurs. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 65, 5-18.
- <http://www6.paca.inra.fr/ecodeveloppement/Actualites-Ecodev>

## Vers un enseignement pluri-référencé des savoirs agronomiques, opératoire pour des pratiques agricoles compatibles avec le Plan Écophyto

Programme Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Paul OLRY, paul.olry@agrosupdijon.fr  
Unité Développement professionnel et formation, AgroSup  
Dijon/Eduter, Université de Bourgogne-Franche-Comté

### Partenaires

- Agrosup Dijon
- ENSFEA
- Montpellier Sup Agro
- Greenium

### Mots-clés

Didactique, apprentissages, pratiques agricoles économes en produits phytopharmaceutiques, agronomie, formation initiale professionnelle, stages.

### En bref

L'évolution vers des pratiques alternatives aux produits phytopharmaceutiques est exigeante en termes de connaissances et de raisonnements pour passer d'une logique plante, sol, culture par parcelle à une logique système de culture. La traduction et la diffusion des savoirs scientifiques nécessaires posent de nouveaux problèmes : comment sont-ils discutés à l'occasion des formations initiales de l'enseignement agricole ? Comment les formaliser, les organiser pour mieux les transmettre ? Le projet DidacPhyto a tenté d'apporter des réponses, concluant qu'il s'agit là d'une véritable transition pour le système d'enseignement secondaire technique agricole.

## Contexte et objectifs

Les six tâches conduites au cours du projet DidacPhyto (Figure 1) visent à analyser et tester les dispositifs, situations et outils de formation mis en œuvre par les établissements d'enseignement agricole, y compris les exploitations agricoles de ces lycées et celles qui accueillent les apprenants en stage, concernant les pratiques agricoles économes en produits phytopharmaceutiques.

Le projet identifie :

- d'une part, les savoirs opératoires développés par l'expérience chez les agriculteurs, et en particulier ceux qui sont incorporés et qui ne sont pas de rationalité scientifique ;
- d'autre part, les pratiques innovantes des agriculteurs et des enseignants pouvant être modélisées et capitalisées pour l'enseignement.

## Principaux résultats

La prise en compte de l'objectif de réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques conduit à recomposer les savoirs de référence en agronomie. La discipline d'enseignement « agronomie » se construit dans les référentiels de formation selon une double évolution, régulée par les instances institutionnelles responsables des diplômes : (i) une évolution exogène poussée par des pratiques agricoles et les demandes sociétales (Figure 2) ; (ii) une évolution endogène tirée par les résultats de recherche.

Cette recomposition se cristallise autour d'un principe central : la formation professionnelle dans laquelle la situation professionnelle devient la référence de l'enseignement. Cette perspective met en évidence une multi-référentialité des savoirs mobilisables et mobilisés en situation profes-

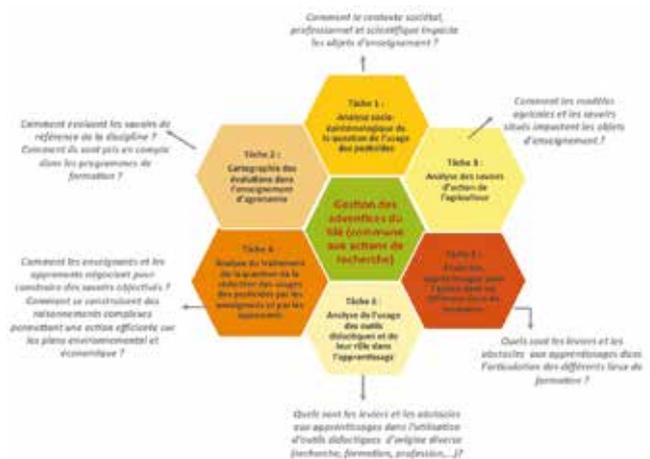
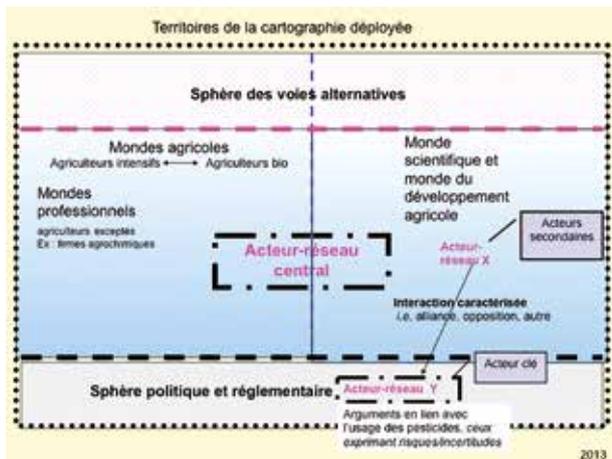


Figure 1 : Organisation de la recherche DidacPhyto.

sionnelle par les agriculteurs. En effet, ces savoirs font à la fois référence à la rationalité scientifique et à la rationalité pratique, mais également aux valeurs et à l'éthique, en cohérence avec la vie au travail dans une exploitation agricole. À l'incertitude de savoirs agronomiques encore instables s'ajoute donc leur multi-référencement. Tous deux doivent être pris en considération dans la conception des dispositifs, situations et contenus d'enseignement.

Le projet DidacPhyto a mis également en évidence les difficultés à concilier l'accompagnement des élèves dans l'apprentissage de raisonnements complexes et la gestion du risque couru ou perçu par certains enseignants, ces derniers n'étant pas à l'aise dans l'enseignement de pratiques économes en produits phytopharmaceutiques parfois encore controversées.

...



**Figure 2 :** Le modèle de cartographie utilisé pour l'analyse de la controverse sur les pesticides, qui impacte l'évolution des savoirs de la discipline.

... Les travaux ont ainsi identifié une évolution contrastée des raisonnements des élèves sur la gestion des adventices. Alors que, dès le niveau Bac Pro, ils ont une réelle capacité à raisonner la complexité de la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques, cette capacité est en tension avec un modèle dominant rencontré lors des stages de formation en exploitation agricole ou vécu dans les exploitations familiales.

Les résultats questionnent enfin la conception des dispositifs et scénarios de formation en cohérence avec les trajectoires d'évolution des pratiques agricoles, fondés sur des raisonnements à faire construire par les élèves ou des scénarios d'apprentissage à concevoir. L'alternance école-entreprise, via les visites et les stages, mérite d'être approfondie pour que la diversité des situations professionnelles agricoles et la complexité des raisonnements agronomiques soient mieux prises en compte dans la formation. Cette approche n'est pas sans exigence sur la définition des contenus à enseigner et leur organisation (de l'approche

descriptive à l'approche systémique) sur la programmation de ces contenus pour rendre optimale l'acquisition du raisonnement, la cohérence des choix didactiques et des objets d'apprentissage. L'incertitude relative aux savoirs à enseigner retentit sur les objets et situations d'apprentissage mis en place.

## Perspectives

### Transfert

#### Initiatives pour organiser la capitalisation des savoirs agronomiques :

- rédaction d'un guide méthodologique pour l'usage des outils didactiques à destination des enseignants. Il vise également à aider les chercheurs à produire de nouveaux outils pouvant servir l'enseignement ;
- rédaction d'un ouvrage de référence pour l'enseignement d'agronomie : « L'agronome en action ; mobiliser concepts et outils de l'agronomie dans une démarche agroécologique », Editions Educagri, janvier 2017.

#### Situations d'apprentissage :

construction d'une carte de controverses sur les pesticides, situation-problème sur la gestion des adventices dans une étude de cas où il y a résistance au vulpin, la mise en scène du schéma décisionnel, la situation de bout de champ. Ce sont des situations de formation prototypiques pouvant aider les enseignants à construire des études de cas contextualisées.

### Recherche

Ce projet a abouti à la construction d'un **cadre théorique et méthodologique pour une didactique des savoirs agronomiques**, qui reste encore à éprouver, mais qui a montré une richesse dans la production de connaissances originales et d'outils innovants pour la formation. Cette collaboration va se poursuivre dans les prochaines années autour de travaux portant sur les différentes sciences biotechniques de l'enseignement agricole (zootechnie, foresterie, viticulture, agroéquipements,...), toujours avec l'objectif de contribuer au plan « Enseigner à produire autrement ». ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Valorisation : Guide méthodologique pour la conception et l'usage des outils didactiques.
- Cancian N., 2015. Approche didactique d'une Question Socialement Vive Agronomique : la réduction de l'usage des pesticides - modélisation du raisonnement agro-écologique et socioéconomique d'élèves et d'étudiants : appuis et obstacles à l'enseigner à produire autrement. Thèse de doctorat. Université de Toulouse.
- Métral J-F., Olry P., David M., Prévost P., Chrétien F., Cancian N., Frère N., Simonneaux L., 2016. Ruptures ou ajustements provoqués entre pratiques agricoles et enseignement de ces pratiques - Implantation et gouvernance de la réforme « Produire autrement », *Formation - Emploi* N°135 53-75.
- Prévost P., Cancian N., Simonneaux L., Métral J-F., David M., Olry P., 2017, accepté. Elaboration curriculaire pour l'enseignement des sciences techniques en formation professionnelle : l'exemple de l'agronomie. *Education & didactique*.
- Cancian N., Prévost P., Chrétien F., Simonneaux L., Métral J-F., David M., Olry P., 2016, accepté. Les savoirs agronomiques dans les itinéraires de conception de référentiels de diplômes - Comment sont pris en compte les nouveaux enjeux sociétaux et les savoirs émergents ? Et quels rôles pour les agronomes ? *Agronomie, environnement & sociétés*, vol. 6 n°2, <http://www.agronomie.asso.fr/?id=858>

## Intermédiation et transition : processus de généralisation et d'institutionnalisation d'expériences locales de réduction de pesticides

Pour et Sur le Plan Écophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses). Méta-programme INRA SMACh

### Responsable scientifique

Marianne Cerf  
cerf@agroparistech.fr  
INRA

### Partenaires

- INRA : UMR Agronomie, UR Ecodéveloppement, UMR LISIS, UMR SAD-APT, UE Gotheron, UE Alenya, UMR SVQV
- RAD-CIVAM
- Ocealia
- RMT Systèmes de Cultures Innovants
- Eau de Paris

### Mots-clefs

Politique publique, acteur intermédiaire, accompagnement, objet intermédiaire, système de culture, conception, innovation

### En bref

Pestimute-Gen étudie la façon dont des initiatives encadrées par l'État ou portées par des acteurs agricoles s'organisent pour soutenir l'évolution des pratiques des agriculteurs vers la réduction des pesticides et cadrent le travail des intermédiaires. Il explore avec ces derniers la façon dont ils développent leur pratique qui ne se résume ni dans la mise en œuvre d'un plan (Écophyto) ni dans la diffusion d'expériences réussies. Le travail d'intermédiation implique de problématiser et d'évaluer différentes façons d'envisager la réduction des pesticides, de mettre en synergie les projets des agriculteurs et l'objectif de 50 % de réduction, et de construire la reconnaissance d'expériences réussies.

### Contexte et objectifs

Les débats internationaux sur l'écologisation des agricultures industrielles, comme le soutien à l'agro-écologie porté par l'ONU pour l'alimentation et l'agriculture, illustrent l'importance à accorder aujourd'hui aux processus de changement sociotechnique lors d'une transition agro-écologique. Les travaux sur la gouvernance ou l'analyse des transitions restent néanmoins peu explicites sur ces processus et notamment sur les pratiques et dispositifs qui soutiennent ces changements. Pestimute-Gen vise à comprendre comment s'opère l'intermédiation dans les transitions. Il met en regard différentes actions collectives qu'elles soient portées par les politiques publiques (FERME DEPHY, Aires d'Alimentation de Captage), ou par les coopératives, ou des réseaux d'agriculteurs (RAD-CIVAM, BASE) et analyse les cadres d'action qu'elles mettent en place pour soutenir une dynamique de réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques tant localement que nationalement. L'attention portée aux acteurs et objets qui opèrent l'intermédiation est de nature à renseigner et aider les acteurs de la réduction dans le contexte Écophyto.

### Principaux résultats

Quel accompagnement de la réduction de l'usage des pesticides à l'interface entre soutien à l'innovation dans les exploitations agricoles et contribution à la mise en œuvre d'une politique publique ? Quels ferments d'une institutionnalisation de la réduction et quelles possibilités de généralisation de systèmes de culture écologisés issus de processus d'innovation locaux ? Pour traiter ces questions, Pestimute-Gen se focalise sur la dynamique de l'action collective dans diffé-

rentes configurations organisationnelles (FERME DEPHY, RAD-CIVAM, BASE, coopératives, AAC) et sur l'analyse des acteurs et objets d'intermédiation liés à la réduction de l'usage des pesticides. Il apporte une méthode pluridisciplinaire associant : (i) une étude longitudinale des dynamiques d'action collective à partir d'entretiens et de traces écrites ; (ii) un espace mobilisant des acteurs intermédiaires pour analyser avec eux la visée et les moyens mis en œuvre pour leur intermédiation ; (iii) des données issues du travail de longue date de certains chercheurs avec les collectifs étudiés ou de leur participation à des instances du Plan Écophyto. Mises en récit et analyses transversales pointent les cadres d'action des collectifs et leur évolution, les trajectoires des acteurs et objets intermédiaires (Figure 1).



**Figure 1** : Illustration d'un objet intermédiaire étudié : le « tour de bassin » qui permet de discuter des circulations d'eau et de la réussite ou non des actions engagées avec les acteurs d'une aire d'alimentation de captage.

... En allant à la rencontre des acteurs intermédiaires, le projet a permis d'éclairer la diversité de leurs trajectoires, des arènes publiques qu'ils contribuent à configurer, des objets intermédiaires qu'ils mobilisent, les difficultés rencontrées pour réaliser leur activité, se repositionner, asseoir leur légitimité. Il a été montré qu'acteurs et objets intermédiaires exercent un rôle d'interface favorisant les interactions autour de la problématique de réduction des pesticides. Ils articulent des connaissances agronomiques dont le choix dépend de la façon de faire tenir ensemble : (i) soutien à la problématisation de l'enjeu de réduction des pesticides au niveau local, (ii) soutien à l'exploration de solutions par les agriculteurs eux-mêmes, (iii) implication dans la construction d'instruments (indicateurs, démarches, références) mobilisables par les pouvoirs publics pour mettre en œuvre une politique de réduction des produits phytopharmaceutiques.

La mise en regard des différentes dynamiques collectives permet de mettre en lumière l'instauration d'arènes publiques au sein desquelles les transformations visées sont problématisées en restituant la réduction dans le contexte plus large de l'écologisation des systèmes. Elle pointe la diversité des modes d'organisation de la production du service en lien avec une problématique de réduction. Ces derniers évoluent en particulier en lien avec l'émergence du réseau FERME DEPHY conçu *de novo* et développant de nouveaux outils et règles de production de services (vers les agriculteurs, vers les pouvoirs publics). Se dessine alors un repositionnement stratégique des acteurs du conseil par rapport à ce dont le réseau FERME DEPHY est porteur sur le plan des objectifs, de la production des connaissances, du rôle des acteurs pour affirmer et faire reconnaître d'autres façons d'accompagner les agriculteurs ou de produire et mettre à disposition des connaissances sur les pratiques et les changements opérés. Ainsi, l'arrivée du réseau FERME DEPHY dans le champ du conseil accroît les logiques de concurrence, peut limiter les synergies utiles à la généralisation de systèmes écologisés en réduisant l'usage de produits phytopharmaceutiques.

## Perspectives

### Transfert

Ce projet a privilégié un rapport étroit aux collectifs étudiés et un transfert construit via les itérations au fil de la

recherche. Il a installé un espace d'échange sur l'intermédiation permettant à des intermédiaires de rendre visible leur activité, mal définie et réalisée dans les interstices des organisations, d'affiner leurs méthodes pour être plus efficaces et de prendre du recul sur leur cadre d'action. Un site web (Figure 2) en rend compte et prolonge ce retour d'expérience.

En élargissant le cercle des participants, ce site propose les conditions de la capitalisation de ce qui est construit et mobilisé pour agir comme intermédiaire vers la réduction des produits phytopharmaceutiques.



**Figure 2 :** Page du futur site Internet sur l'intermédiation qui doit devenir un site permettant de confronter des expériences et des points de vue sur l'intermédiation pour la réduction des pesticides.

### Recherche

Les perspectives consistent à :

- développer des approches centrées sur les pratiques d'intermédiation étudiées à différents niveaux organisationnels interagissant dans une transition agroécologique ;
- continuer d'éclairer les connaissances agronomiques, qui sont mobilisées et utiles à l'intermédiation pour la réduction de produits phytopharmaceutiques, pour aller vers la conception d'objets intermédiaires qui soutiendront la réduction des produits phytopharmaceutiques.

Elles s'inscrivent dans la structuration d'une communauté de recherche interdisciplinaire au niveau national (ex. : projet ANR IDAE) et international (ex. : action COST déposée dans H2020). ■

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Cerf M., Le Bail M., Lusson J.M., Omon B. Contrasting intermediation practices in various advisory service networks in the case of the French Ecophyto Plan. Soumis à Journal of Agricultural Education and Extension.
- Gaudinat G., Le Bail M., 2015. Evolution du conseil technique des coopératives dans un contexte de transition écologique. 4p. pour Coop de France.
- Guichard L., Dedieu F., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., Reau R., Savini I. Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer. sous presse à Cahiers Agricultures.
- Goulet F. (à paraître). Explorer et partager. Les expériences de réductions des pesticides dans une revue professionnelle agricole. Economie Rurale.
- Paravano L., Prost L., Reau R., 2016. Brienon-sur-Armançon : pilotage dynamique des actions d'un territoire à enjeu nitrate, à l'aide d'un observatoire et d'un tableau de bord, AES, Vol.6, n°1, 15 en ligne.

## Approches juridiques des protections alternatives contre les ennemis des cultures

Programme Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Philippe Billet  
phbillet\_sfde@yahoo.fr  
Université de Lyon 3,  
Institut de droit de l'environnement

### Partenaires

- Institut de droit de l'environnement (CNRS-UMR 5600 – EVS-IDE) U. Lyon 3
- Institut de recherches philosophiques de Lyon (Irphil U. Lyon 3 - EA 4187)
- CNRS (Laboratoire IODE – U. Rennes 1)

### Mots-clefs

Produits phytopharmaceutiques, alternatives, droit, incitations, participation citoyenne, éthique, lutte intégrée, services écosystémiques, autorisation de mise sur le marché, mesures agro-environnementales et climatiques

### En bref

Le projet Alterphyto propose une approche juridique des alternatives à l'usage actuel des produits phytopharmaceutiques dans la protection des cultures et la lutte contre les ravageurs. Alterphyto identifie les mécanismes éthiques et juridiques permettant de mieux comprendre les impératifs et les modalités de la définition d'une réglementation spécifique aux produits et pratiques alternatifs aux produits phytopharmaceutiques, en vue de la mise en place d'une réglementation adaptée à même de réduire le déséquilibre entre agriculture conventionnelle et exigences environnementales, et de satisfaire les ambitions du plan Écophyto.

## Contexte et objectifs

Dans le contexte du plan Écophyto et de son ambition de réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques, la dimension juridique est restée en marge, alors qu'elle apparaît essentielle au soutien de la mise en œuvre d'alternatives, les cultures devant, quoi qu'il en soit, être protégées. Une approche historique du droit de la lutte contre les ennemis des cultures met en évidence le développement d'un régime juridique entièrement tourné vers les produits phytopharmaceutiques, porté par le dogme du progrès et de la nécessité d'assurer la sécurité alimentaire. Une approche éthique rejetant les conséquences de la maxime « détruire pour produire », tant sur le plan humain qu'environnemental (l'agriculteur garant de cette sécurité devient victime de son activité et porte atteinte au milieu qu'il valorise), conduit à envisager le développement d'un régime juridique mettant les techniques conventionnelles et alternatives sur un pied d'égalité. Alterphyto ambitionne de permettre de mieux comprendre les impératifs et modalités de la définition d'une réglementation spécifique aux produits et techniques alternatifs aux produits phytopharmaceutiques, en vue de proposer des outils à même de garantir l'effectivité de leur mise en œuvre.

## Principaux résultats

La promotion des alternatives aux produits phytopharmaceutiques impose de revisiter un droit de la production agricole soutenu par un régime dédié qui ne laisse que très peu de place à d'autres perspectives. Alterphyto s'est attaché à identifier ces blocages et à proposer des solutions pour lever ces verrous.

Tout d'abord, une analyse historique de l'évolution de la réglementation a été conduite afin de mieux comprendre les

causes de la construction de ces verrous pour voir s'ils conservaient leur légitimité. Elle s'est doublée d'une analyse des causes de la revendication d'une évolution (agriculteurs, riverains, associations) et des possibilités de son expression (lanceurs d'alerte) ainsi que des moyens de les renforcer. Les solutions proposées pour cette promotion des alternatives se sont appuyées sur une série de huit études générales mettant en évidence le rôle décisif des acteurs concernés par les produits phytopharmaceutiques, en tant que victimes (utilisateurs ou tiers) ou défenseurs de l'environnement, dans la prise de conscience des risques de l'agriculture conventionnelle et l'accompagnement du droit existant ou souhaité. Le contexte communautaire de la PAC a imposé l'étude du glissement d'un droit communautaire, soutien d'une agriculture productiviste, vers la lutte intégrée et les moyens de la promouvoir. La solution devrait passer par une hiérarchisation des modes de protection des cultures, fondée sur les principes de précaution et d'action préventive, la lutte conventionnelle ne devant constituer que le dernier recours.

La question de la reconnaissance et de la disponibilité des alternatives s'est naturellement posée, imposant une analyse du régime des autorisations de mise sur le marché, fondement de l'usage de ces produits. Celle-ci a mis en évidence l'ambiguïté d'un dispositif destiné à apporter des garanties du fait de l'usage de ces produits phytopharmaceutiques mais fait obstacle à l'utilisation d'autres produits, dès lors que les normes de référence sont l'efficacité et la performance. L'étude conclut au fait que ces critères comparatifs, qui se fondent sur des produits déjà sur le marché, devraient être révisés pour intégrer une analyse des avantages environnementaux comme élément modérateur. Cette question de la performance environnementale permet d'introduire les services écosystémiques comme élément d'un bilan ...

... « performantiel », une balance des coûts (santé et environnement) et des avantages (production) qui permet de rééquilibrer le bilan en faveur des alternatives. Ce constat et ces propositions de solutions étant établis, il convenait non seulement de les formaliser en proposant des dispositions juridiques permettant de les intégrer dans les modalités d'évaluation avant autorisation de mise sur le marché, mais également de les pérenniser en les rattachant au régime de l'exploitation agricole pour en faire une composante à part entière de ce régime. Cette option a permis de proposer un objectif de « politique agricole durable » dont la satisfaction peut passer par une intégration des alternatives dans le statut des baux ruraux (fermage), le contrôle des structures, les transferts de propriété agricole via les SAFER (cahier des charges imposant des modes culturaux) et la politique de l'Union européenne en matière agricole et environnementale. Au-delà des questions de développement durable qui sont ainsi posées, celle de la « production éthique » induit un nouveau rapport à l'environnement et à l'humain.

## Perspectives

### Transfert

Les réflexions développées dans le cadre du projet Alterphyto ont permis d'identifier et de proposer des perspectives d'évolution de la réglementation, destinées à favoriser l'utilisation des alternatives aux produits phytopharmaceutiques, qui peuvent être reprises et développées par les ministères concernés. Une série de dix recomman-

datations concluent ainsi le rapport et synthétisent les propositions de façon opérationnelle. Au titre de celles-ci, notamment, la formalisation d'une approche hiérarchisée de la lutte intégrée, une évaluation environnementale du recours aux dynamiques naturelles dans le processus de production agricole, l'organisation de la coexistence des cultures traitées par produits phytopharmaceutiques et cultures bénéficiant d'alternatives, la révision des critères de l'évaluation des produits alternatifs fondée sur une analyse coûts/bénéfices et intégrant un paquet environnemental à l'activité agricole.

### Recherche

Ces propositions restent spéculatives dans la mesure où elles n'ont pas subi l'épreuve du terrain, à même d'envisager des ajustements. Certains points de blocage identifiés appellent d'ores et déjà des recherches complémentaires dépassant le cadre juridique (sociologie, économie...). Une approche économique permettrait ainsi de mesurer la pertinence des propositions et de voir, sur la base d'un bilan coûts/avantages du recours aux alternatives (intégrant notamment la préservation des services écosystémiques, des paiements associés et des coûts de certaines mesures), quels outils financiers et fiscaux pourraient être développés pour supporter les choix. De même, une analyse croisée des compétences des collectivités territoriales en vue du soutien des actions en faveur de ces alternatives et des coûts et modes de financement associés permettrait d'assurer de façon formelle la promotion de ces alternatives. ■

---

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Billet Ph., The price of co-viability: pollination at all costs. Legal approach of the new relationship between man and pollinators in O. Barrière (éd), Co-viability of Social and Ecological Systems: Reconnect Man to the Biosphere in an Era of Global Change, à paraître aux éditions Springer 2017.
- Langlais A., 2016. « Les paiements pour services environnementaux comme réponse pertinente en faveur d'une agriculture durable ? » in M.-L. Demeester et V. Mercier (dir.), « Agriculture durable : Essai d'élaboration d'un cadre normatif », PUAM. Thévenot G., « Utilisation durable des pesticides : quel rôle pour les paiements pour services environnementaux ? », in LANGLAIS (A.), (dir.), L'agriculture et les paiements pour services environnementaux : quels questionnements juridiques ? Presses Universitaires de Rennes (à paraître 2017).
- Peut-on prendre le risque des alternatives aux pesticides ? Approches éthique et juridique. Colloque de restitution du projet de recherche Alterphyto, Lyon, le 23 juin 2016 (ss. dir. scientifique Ph. Billet).

## 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 Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Laure Mamy  
laure.mamy@inra.fr  
INRA

### Partenaires

• INRA : Enrique Barriuso, Carole Bedos, Pierre Benoit, Caroline Colnenne, Thierry Doré, Eric Hanocq, Eric Justes, Michel Leleu, David Makowski, Nicolas Munier-Jolain, Valérie Pot, Natalie Strehl, Jésus-Maria Marín-Benito, Sabine Karen Lammoglia • ACTA : François Brun  
• Agrosup Dijon : Bernard Nicolardot, Marjorie Ubertosi, Romain Dairon, Claudia Carolina Ugarte Nano • INP El-Purpan : Lionel Alletto • Université d'Uppsala – Suède : Julien Moeys, Mats Larsbo, Nick Jarvis • FERA – United-Kingdom : Marc C. Kennedy, Andy D.M. Hart

### Mots-clés

Systèmes de culture, pesticides, pratiques, pression, impact, IFT, modélisation, environnement, santé

### En bref

Dans le contexte de la diminution du recours aux pesticides, le projet ECoPESt a permis d'évaluer et de comparer les performances environnementales et sanitaires de systèmes de culture conçus avec l'objectif de réduire l'usage des pesticides et d'identifier les systèmes permettant de réduire les impacts liés à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques, notamment concernant la qualité de l'eau. Une démarche d'évaluation *a priori* des performances des systèmes, basée sur des approches de modélisation, a ainsi été élaborée.

## Contexte et objectifs

Pour répondre aux objectifs du plan Écophyto, il est nécessaire de concevoir et d'introduire de nouveaux systèmes de culture (SdC). Cependant, compte tenu de la diversité des contextes agronomiques et pédoclimatiques, il est impossible d'étudier *in situ* tous les systèmes potentiels. Il est donc indispensable de développer des outils de modélisation pour évaluer les impacts des pesticides utilisés dans les SdC.

Les objectifs du projet ECoPESt consistent à (1) évaluer les impacts sur l'environnement et la santé de SdC permettant de réduire l'usage des pesticides, (2) établir un lien entre pratiques (systèmes de culture), pressions et impacts des pesticides et (3) identifier les systèmes permettant notamment de préserver les services écosystémiques d'approvisionnement et de régulation.

Ce projet a été mené en parallèle du projet Perform (APR PSPE1) qui a permis le développement d'un outil couplant un modèle de culture et un modèle « pesticides », d'analyser la sensibilité des outils de modélisation aux paramètres décrivant les systèmes de culture et de traiter les incertitudes associées aux paramètres les plus influents.

## Principaux résultats

Dans un premier temps, 4 modèles (MACRO, PEARL, PRZM, STICS-MACRO) décrivant le devenir des pesticides dans l'environnement ont été testés en comparant les résultats des simulations à des mesures de concentrations en pesticides réalisées dans 3 sites expérimentaux (Dijon, Auzeville, Lamothe, Figure 1) pour identifier le(s) modèle(s) le(s) plus performant(s).

Quatorze SdC ont été étudiés : 11 systèmes innovants déri-

vant de 3 systèmes conventionnels (rotation colza-blé-orge, rotation blé dur-tournesol en sec, monoculture de maïs irriguée). MACRO, PEARL et PRZM ne décrivent pas bien la dynamique observée des concentrations et ils ont tendance à sous-estimer les concentrations des pesticides peu mobiles (car ils ne représentent pas le transport particulaire) ou peu persistants. Inversement, ils tendent à surestimer les concentrations en pesticides très mobiles et persistants. Au final, MACRO s'avère être le modèle le plus performant, suivi de PEARL puis de PRZM. Ces trois modèles ne permettant pas de représenter des pratiques agricoles complexes (mulch, cultures associées, fertilisation...), le modèle STICS-MACRO, basé sur l'utilisation d'un modèle de culture, STICS, et de MACRO, a été également testé (cf. projet Perform). STICS-MACRO reproduit mieux, sans calage, les flux d'eau et de pesticides que le modèle MACRO calé.

Dans un second temps, les effets de la variabilité des SdC et de la variabilité pédoclimatique sur les concentrations en pesticides dans l'environnement ont été étudiés avec STICS-MACRO, modèle le plus performant. Les résultats obtenus ont 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. Enfin, les caractéristiques des sols prépondérantes sont les teneurs en carbone organique, argile et sable et le pH.

Dans un troisième temps, la pression liée aux pesticides (caractérisée par l'IFT) a été reliée à leurs impacts sur l'environnement (estimés par le nombre de pesticides détectés et les niveaux observés et simulés de concentrations dans l'eau drainée) et la santé (estimés avec un modèle d'évaluation de l'exposition de la population humaine aux produits phyto- ...

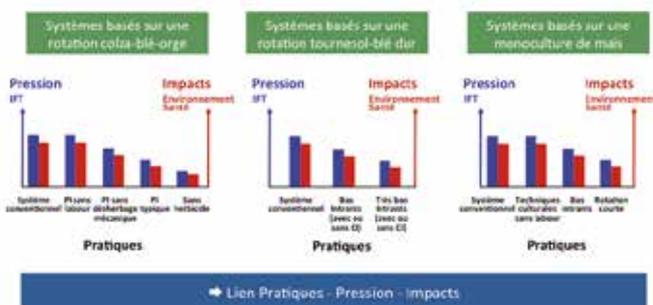


**Figure 1** : (a) Site expérimental de Lamothe (© Lionel Alletto, INP - El Purpan) ; (b) Site expérimental de Dijon (© Pascal Farcy, INRA) ; (c) Site expérimental d'Auzeville (© Eric Justes, INRA).

... pharmaceutiques, BROWSE) pour les différents systèmes. Le lien entre pratiques, pressions et impacts des pesticides a été établi. D'une manière générale, la pression liée aux pesticides (IFT) et les impacts sur l'environnement sont corrélés. De même, des impacts sur la santé sont plus susceptibles de se produire dans les systèmes où l'IFT est le plus élevé (Figure 2).

L'ensemble des résultats a permis de classer les SdC du plus performant (aux points de vue environnement et santé) au moins performant :

- Systèmes basés sur une rotation colza-blé-orge : « Sans herbicide » > « Protection intégrée (PI) typique » > « PI sans désherbage mécanique » > « Conventuel », « PI sans labour ».
- Systèmes basés sur une rotation blé dur-tournesol en sec : « Bas intrants » (avec ou sans cultures intermédiaires, CI), « Très bas intrants avec cultures associées » (avec ou sans CI) > « Conventuel ».



**Figure 2** : Synthèse des résultats obtenus dans le projet ECoPESt : relation entre pratiques agricoles, pression et impacts sur l'environnement et la santé. PI : Protection intégrée, CI : Cultures intermédiaires. Cette figure est une illustration qui représente des tendances, elle n'a aucun caractère quantitatif.

- Systèmes basés sur une monoculture de maïs irriguée : « Rotation courte » > « Bas intrants » > « Conventuel » > « Techniques culturales sans labour ».
- Une démarche d'évaluation *a priori* des performances des systèmes, basée sur la modélisation, a ainsi été élaborée.

## Perspectives

### Transfert

Ce projet a permis (1) de confirmer le lien direct entre usage des pesticides et impacts sur l'environnement et la santé, (2) de fournir une méthode d'évaluation des performances environnementale et sanitaire de SdC conçus pour réduire l'usage des pesticides, (3) d'identifier les systèmes permettant d'atteindre les objectifs du plan Écophyto, donc d'aider à réduire l'exposition de la population et du milieu aux pesticides. Par ailleurs, les participants au projet sont prêts à contribuer à des sessions de formation afin de diffuser les outils et les résultats obtenus et de guider les professionnels dans le choix des systèmes de culture. Enfin, plusieurs articles ont été publiés.

### Recherche

Une large diversité de systèmes de grandes cultures a été étudiée, mais d'autres systèmes restent à explorer, en particulier des systèmes incluant des cultures pérennes. Afin d'approfondir l'évaluation des risques liés aux pesticides utilisés dans les systèmes de culture, des simulations à long terme pour estimer leurs concentrations dans les eaux souterraines, mais aussi dans le sol ou l'air, devront être réalisées. La prise en compte plus large de la variabilité des sols et des climats permettra d'étendre la démarche d'évaluation des risques aux outre-mer, par exemple. Il faudra aussi inclure, dans la comparaison des systèmes, l'évaluation des impacts écotoxicologiques des pesticides. ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Giuliano S., Ryan M.R., Véricel G., Rametti G., Perdreux 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.
- Lammoglia S.K., Makowski D., Moeys J., Justes E., Barriuso E., Mamy L., 2016. Sensitivity analysis of the STICS-MACRO model to identify cropping practices reducing pesticides losses. *Sci Tot Environ* (en ligne). DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.10.010.
- Lammoglia S.K., Kennedy M.C., Hart A.D.M., Barriuso E., Alletto L., Justes E., Munier-Jolain N., Mamy L. Human health risk assessment of pesticides use in conventional and innovative cropping systems with the BROWSE model (soumis).
- Marín-Benito J.M., Pot V., Alletto L., Mamy L., Bedos C., Barriuso E., Benoit P., 2014. Comparison of three pesticide fate models with respect to the leaching of two herbicides under field conditions in an irrigated maize cropping system. *Sci Tot Environ* 499 : 533-545.

## 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

Pour et Sur le Plan Écophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Laure Mamy  
laure.mamy@inra.fr  
INRA

### Partenaires

• INRA : Enrique Barriuso, Carole Bedos, Pierre Benoit, Eric Justes, David Makowski, Nicolas Munier-Jolain, Valérie Pot, Jésus Marín-Benito, Sabine Karen Lammoglia • ACTA : François Brun • AgroParisTech : Benoit Gabrielle • Agrosup Dijon : Bernard Nicolardot, Marjorie • Ubertosi • INP El-Purpan : Lionel Alletto • Université d'Uppsala – Suède : Julien Moeys, Mats Larsbo, Nicholas Jarvis • FERA – United-Kingdom : Marc C. Kennedy, Andy D.M. Hart

### Mots-clefs

Systèmes de culture, pesticides, modélisation, variabilité, incertitudes, environnement, santé

### En bref

Lors de la conception de systèmes de culture permettant de réduire l'utilisation des pesticides, il est nécessaire de prendre en compte des critères liés aux impacts environnementaux et sanitaires de ces systèmes. De nouvelles approches de modélisation ont donc été développées pour permettre une évaluation *ex ante* des impacts liés aux pesticides. Le projet Perform a montré que les systèmes impliquant un travail du sol simplifié auraient tendance à augmenter les impacts (multiplication des traitements herbicides), tandis que les systèmes réduisant l'IFT de 50 % et les systèmes avec désherbage mécanique permettraient de réduire ces impacts.

## Contexte et objectifs

Pour atteindre les objectifs du plan Écophyto, il faut notamment concevoir de nouveaux systèmes de culture moins dépendants des PPP. Les outils d'aide à la décision intégrant l'évaluation *ex ante* des performances agronomiques et socio-économiques de systèmes de culture prédéfinis présentent une évaluation des impacts environnementaux et sanitaires des pesticides soit inexistante, soit imprécise et qualitative.

Dans ce contexte, l'objectif du projet Perform consiste à développer une démarche d'évaluation globale par système de culture permettant de comparer les impacts des pesticides sur l'environnement et sur la santé. Cette démarche tient compte (1) de la complexité des systèmes, (2) de l'utilisation des pesticides dans la rotation, (3) de la variabilité spatio-temporelle des conditions agro-pédoclimatiques et (4) des principales sources d'incertitude affectant les flux de pesticides.

Le projet ECoPEst (APR Pesticides 2011) a été mené en parallèle de ce projet pour compléter l'évaluation des outils de modélisation existants, permettre l'acquisition d'observations de terrain et établir le lien pratiques-pressions-impacts.

## Principaux résultats

Dans un premier temps, une nouvelle approche de modélisation basée sur une utilisation séquentielle du modèle de culture STICS et du modèle « pesticides » MACRO a été développée afin de simuler les flux de pesticides vers les eaux souterraines, dans des systèmes de culture complexes. Le modèle ainsi conçu, STICS-MACRO, a été testé en confrontant les résultats des simulations à des mesures de

concentrations en pesticides dans l'eau du sol. Ces mesures ont été faites dans des lysimètres implantés sur plusieurs sites où sont expérimentés des systèmes de culture innovants (Figure 1).

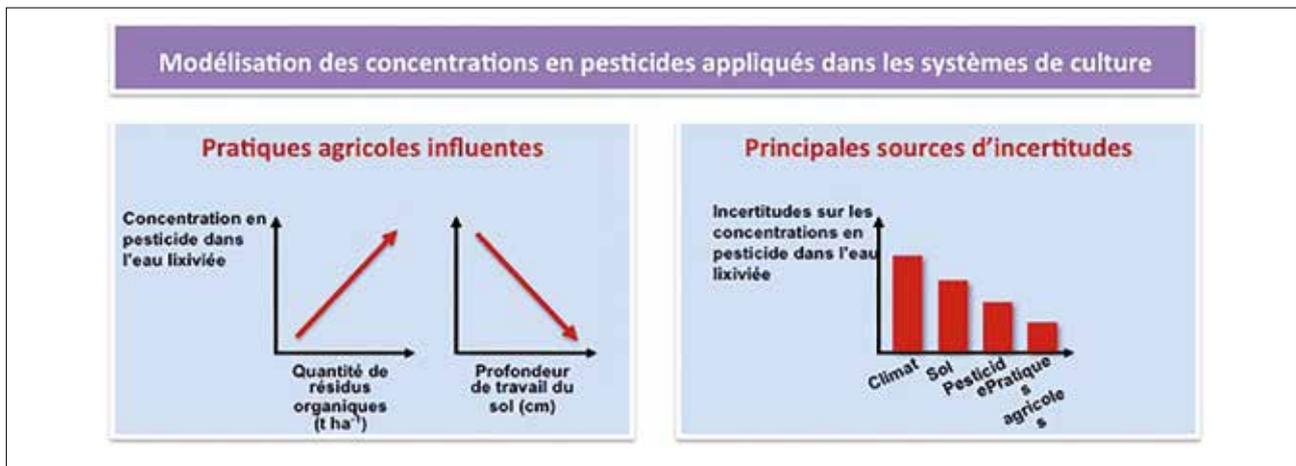


**Figure 1** : (a) Site expérimental de Lamothe (© Lionel Alletto, INP - El Purpan) ; (b) Site expérimental d'Auzeville (© Eric Justes, INRA) ; (c) Site expérimental de Dijon (© Pascal Farcy, INRA).

Les résultats ont montré que la performance de STICS-MACRO était correcte, sans phase de calage, même si elle dépend des conditions pédoclimatiques. Par rapport aux modèles « pesticides » existants, STICS-MACRO permet, en outre, d'accéder à d'autres sorties d'intérêt environnemental (dynamique des composés azotés) et agronomique (rendements).

Une analyse de sensibilité globale de STICS-MACRO, basée sur la méthode de Morris, a ensuite permis d'évaluer et de comparer les effets d'un grand nombre de pratiques agricoles sur les flux de pesticides. L'apport de résidus organiques au sol et le travail du sol simplifié ont été identifiés comme étant les pratiques qui conduisent à une augmentation des flux d'eau et de pesticides vers les eaux souterraines, essentiellement parce qu'elles modifient le bilan hydrique dans les sols (Figure 2).

Dans une troisième étape, une analyse d'incertitudes, basée sur la méthode d'échantillonnage par hypercube latin, a été réalisée afin de déterminer le niveau de confiance qui ...



**Figure 2 :** Synthèse des principaux résultats obtenus dans le projet Perform : identification par modélisation des pratiques agricoles les plus influentes et étude de leurs effets sur les concentrations simulées en pesticides dans l'eau lixiviée ; identification des principales sources d'incertitudes des concentrations en pesticides dans l'eau lixiviée.

... peut être accordé aux résultats des simulations de STICS-MACRO. Cette analyse a été focalisée sur les caractéristiques du sol, du climat et des pesticides et sur les pratiques agricoles. Au final, les incertitudes liées au sol, aux pesticides et aux pratiques agricoles semblent avoir moins d'influence sur la prédiction des concentrations en pesticides dans les eaux souterraines que les incertitudes liées au climat (précipitations en particulier) (Figure 2).

Enfin, un modèle d'évaluation de l'exposition de la population humaine aux pesticides, BROWSE, a été utilisé afin d'estimer les risques pour la santé des applicateurs et des riverains liés à la totalité des pesticides utilisés dans un système de culture. Comme BROWSE ne peut traiter qu'un seul pesticide à la fois, il a été élaboré une méthode d'agrégation des résultats obtenus pour l'ensemble des pesticides appliqués dans un même système. Cette méthode permet ainsi de comparer les différents systèmes étudiés. Elle a montré que les systèmes basés sur un travail du sol simplifié tendent à augmenter les impacts sanitaires en raison de la multiplication du nombre de traitements herbicides. Les résultats de l'analyse de sensibilité avaient par ailleurs montré que ces systèmes présentaient aussi les risques les plus élevés de contamination des eaux souterraines par les pesticides. En revanche, les systèmes 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 ont aussi un impact plus faible sur l'environnement.

## Perspectives

### Transfert

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

### Recherche

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

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Lammoglia S.K., 2016. Approches de modélisation pour évaluer et comparer les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine des pesticides utilisés dans des systèmes de culture conçus pour réduire l'usage des pesticides. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 196p.
- Lammoglia S.K., Moeys J., Barriuso E., Larsbo M., Marin-Benito J.M., Justes E., Alletto L., Ubertosi M., Nicolardot B., Munier-Jolain N., Mamy L., 2016. Sequential use of the STICS crop model and of the MACRO pesticide fate model to simulate pesticides leaching in cropping systems. *Environ Sci Pollut Res* (en ligne). DOI 10.1007/s11356-016-6842-7.
- Lammoglia S.K., Kennedy M.C., Hart A.D.M., Barriuso E., Alletto L., Justes E., Munier-Jolain N., Mamy L., Human health risk assessment of pesticides use in conventional and innovative cropping systems (soumis).
- Lammoglia S.K., Brun F., Moeys J., Quemar T., Barriuso E., Gabrielle B., Mamy L., Modelling pesticides leaching in cropping systems : effect of uncertainties in soil, climate and pesticide properties, and in agricultural practices (en préparation).

## Analyse et modélisation des effets des pratiques agricoles sur les services et disservices écosystémiques dépendant des adventices : Application à l'évaluation et la conception de systèmes de culture économes en herbicides

Programme Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Nathalie Colbach  
nathalie.colbach@inra.fr  
INRA

### Partenaires

- Agrosup Dijon
- INRA
- Université Bourgogne Franche-Comté
- Université Lorraine

### Mots-clefs

Adventice, modèle, système de culture, évaluation multicritère, conception multi-objectifs, biodiversité, nuisibilité, IFT herbicide, processus biophysique

### En bref

Les adventices peuvent engendrer des pertes de production agricole mais sont essentielles pour la conservation de la biodiversité. FLORSYS analyse et modélise les processus biophysiques responsables des effets des techniques culturales sur la flore adventice ainsi que son impact sur la production agricole (perte de rendement, salissement du champ, etc.) et des composantes biotiques bénéfiques (abeilles, oiseaux, etc.) et nuisibles (par exemple, la plante parasite orobanche rameuse) de l'agroécosystème. Des outils et méthodes de simulation ont été développés afin d'évaluer et de concevoir des systèmes de culture conciliant production agricole, biodiversité et réduction d'usage herbicide.

### Contexte et objectifs

Si les adventices (mauvaises herbes) peuvent causer d'importantes pertes de production agricole et promouvoir d'autres bioagresseurs, elles sont indispensables pour la biodiversité végétale sauvage dans les paysages agricoles et nourrissent d'autres composantes de la biodiversité (abeilles, oiseaux...). Elles sont gérées surtout à l'aide d'herbicides dont l'utilisation doit être réduite pour des raisons environnementales, sanitaires et réglementaires. Les stratégies de gestion économes en herbicides doivent combiner toutes les techniques culturales pour profiter de tous les effets préventifs possibles, être raisonnées à l'échelle pluriannuelle et concilier plusieurs objectifs (souvent antagonistes) en termes d'impact de la flore adventice.

L'objectif de ce projet était d'analyser et modéliser la nuisibilité et les bénéfices de la flore adventice, puis de développer des méthodes pour utiliser ce modèle afin de proposer des systèmes de culture (rotation, techniques culturales) permettant de réduire les herbicides et préserver la biodiversité tout en maintenant la production agricole.

### Principaux résultats

Ce projet combine expérimentation, modélisation et simulation des effets des techniques culturales sur la flore adventice des champs cultivés. Ces travaux ont produit de nouvelles connaissances sur le fonctionnement de l'agroécosystème, le modèle « parcelle virtuelle » FLORSYS qui permet d'évaluer et concevoir des systèmes de culture innovants, et des recommandations issues de simulations sur des cas d'étude.

#### La promotion de bioagresseurs par les adventices

Les interactions entre adventices et deux bioagresseurs, la

plante parasite orobanche rameuse *Phelipanche ramosa* L. et le champignon *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* responsable du piétin-échaudage des céréales, ont été modélisées. Les crucifères, à long cycle, développement racinaire printanier/estival et forte biomasse favorisent l'orobanche rameuse. D'autre part, la gestion intégrée des adventices en rotations d'hiver (en Bourgogne et dans le Nord) n'augmente pas le piétin-échaudage des céréales et peut même le diminuer.

#### La résistance des adventices aux herbicides

La résistance aux inhibiteurs de synthèse des lipides acétyl CoA carboxylase (ACCases) dans une adventice graminée automnale, (le vulpin, *Alopecurus myosuroides*) et celle au glyphosate dans l'ensemble des familles botaniques à risque, ont été modélisées. Des simulations montrent qu'appliquer un herbicide inhibiteur des ACCases dans des rotations d'hiver (colza/blé/orge, Bourgogne) entraîne l'apparition de résistance en moyenne après 18 ans (probabilité de 40 %). Augmenter la fréquence d'application des inhibiteurs des ACCases ou réduire les doses appliquées avancent la résistance de plusieurs années. En revanche, introduire du labour ou un pois de printemps retarde la résistance. L'application de glyphosate en monoculture (maïs, Aquitaine et Catalogne) n'entraîne la résistance au glyphosate que si d'autres facteurs culturaux favorisent les adventices (ex. : semis direct). Le glyphosate sélectionne surtout des traits d'espèces permettant d'éviter l'exposition des plantes à l'herbicide ou de compenser les coûts de la résistance<sup>1</sup>. ...

1. Les populations résistantes produisent souvent moins de semences en l'absence d'herbicides que les populations sensibles.

Impact	Signification	A partir de ...	Importance (%) pour les agriculteurs*
Nuisibilité			0 100
Directe	Perte de rendement	Rendement avec vs sans adventices	
	Contamination de récolte	Semences et biomasse adventice	
Indirecte	Promotion de pathogènes	Céréales malades avec vs sans adventices	
	Promotion de parasites (orobanche rameuse)	Biomasse d'adventices stimulatrices ou fixatrices	
Technique	Ralentissement des chantiers de récolte	Biomasse adventice à la récolte	
Sociologique	Un champ "sale" réduit la réputation de l'agriculteur auprès de ses pairs, indépendamment de l'effet sur la production	Biomasse adventice en culture	
<b>Biodiversité sauvage</b>			
Végétale	Richesse spécifique	Nombre d'espèces adventices	
	Équitabilité de la flore	Indice de Pielou	
Ressources trophiques pour	Abelles & autres pollinisateurs	Fleurs adventices appâtissantes de printemps à automne	
	Lépidoptères		
	Carabes	Semences riches en lipides en surface du sol de printemps à automne	
	Oiseaux	Semences en surface du sol en hiver	
<b>Environnement physique</b>			
Réduction d'impact	Lixiviation d'azote	Surface foliaire et biomasse des adventices nitrophiles en interculture	
environnemental	Erosion	Taux de couverture par les adventices en interculture	
	Transfert de pesticides	Surface foliaire, taux de couverture, biomasse des adventices pendant et après l'application de pesticides	

\* Pourcentage d'agriculteurs trouvant cet indicateur utile ou très utile (basé sur Colas, Cordeau, Jeuffroy, Villerd, Colbach, 2015. In: 17th European Weed Research Society Symposium: "Weed management in changing environments", Montpellier, France).

**Tableau 1** : Développement d'indicateurs d'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité sauvage et l'environnement physique.

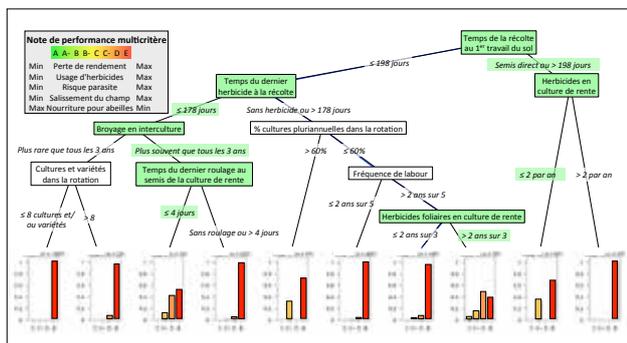
### ... Les multiples effets des adventices

Pour faciliter l'évaluation des systèmes de culture, des indicateurs d'impact de la flore adventice ont été développés avec des écologues et des agriculteurs (Tableau 1). Deux cent cinquante systèmes de culture de 7 régions provenant d'enquêtes, statistiques agricoles, dire d'experts ont été évalués par simulation avec FLORSYS.

Quelques systèmes permettent de concilier production et biodiversité, ou production et faible usage d'herbicide mais aucun ne concilie les trois objectifs (Figure 1).

### Des outils et méthodes pour améliorer les pratiques agricoles

Les nouvelles connaissances ont été intégrées dans FLORSYS, puis son domaine de validité et des pistes d'amélioration (ex. : prédiction des dates de floraison aux latitudes du sud) ont été



**Figure 1** : Arbre de décision prédisant l'impact multicritère des adventices sur la production agricole et la biodiversité en fonction de combinaisons de pratiques culturales. Les histogrammes montrent les probabilités des niveaux de performance. La ligne bleue correspond aux pratiques et à la performance du système de culture à améliorer, les cases en vert indiquent les changements potentiellement intéressants.

établies. Des méthodes de diagnostic et conception multicritère de systèmes de culture ont été développées combinant des arbres de décision (Figure 1) et des simulations avec FLORSYS. Les objectifs et contraintes des agriculteurs ont été intégrés, lors du développement des indicateurs d'impact de la flore adventice, par des tests de règles de décision en simulation, et des ateliers d'utilisation de FLORSYS.

## Perspectives

### Transfert

Les recommandations sont souvent spécifiques à une région et un type de système de culture. La propagation des outils et des méthodes auprès des instituts techniques et conseillers va être mise en place. Le modèle « parcelle virtuelle » FLORSYS et les arbres de décision commencent à être utilisés dans des ateliers de co-construction de systèmes de culture économes en herbicides. Leur utilisation est ralentie par l'absence d'interface graphique pour FLORSYS et par le nombre d'objectifs et de techniques culturales à optimiser.

### Recherche

Le travail entamé dans le présent projet continue dans le cadre de l'ANR CoSAC ([www.projet-cosac.fr](http://www.projet-cosac.fr)), notamment pour développer des outils d'aide à l'évaluation et la conception de systèmes de culture. Ce développement se fait avec la profession pour améliorer le transfert des outils et solutions proposées par la recherche. Les nouveaux outils devront être plus simples et plus rapides pour les utiliser dans des ateliers de conception de systèmes de culture et en tant qu'outil pédagogique dans des formations. À terme, seront adaptées des méthodes d'optimisation numériques pour prendre en compte plus efficacement les multiples objectifs et techniques culturales. ■

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Colas F., Cordeau S., Jeuffroy M.-H., Granger S., Queyrel W., Pointurier O., Rodriguez A., Villerd J., Colbach N., 2016. Développement d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des adventices. In: AFPP (Ed.), AFPP - 23ème Conférence du COLUMA - Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Dijon, France.
- Colbach N., Biju-Duval L., Gardarin A., Granger S., Guyot S.H.M., Mézière D., Munier-Jolain N., Petit S., 2014. The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. *Weed Research* 54, 541–555, 10.1111/wre.12112.
- Colbach N., Colas F., Pointurier O., Queyrel W., Villerd J.. Proposing a methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. *Soumis à Eur. J. Agron.*
- 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. *Eur. J. Agron.* 68, 22-37.
- Moreau D., Gibot-Leclerc S., Girardin A., Pointurier O., Reibel C., Strbik F., Fernández-Aparicio M., Colbach N., 2016. Trophic relationships between the parasitic plant species *Phelipanche ramosa* (L.) and different hosts depending on host phenological stage and host growth rate. *Frontiers in Plant Science* 7, 1033, 10.3389/fpls.2016.01033.

## Evaluation des services écosystémiques et potentiels effets non intentionnels liés à une plante méditerranéenne, l'inule visqueuse – Implication en protection intégrée sous serres et en oléiculture

Programme Pesticides, APR 2011 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsables scientifiques

Nicolas Ris, nicolas.ris@sophia.inra.fr  
 et Alexandre Bout, alexandre.bout@sophia.inra.fr,  
 INRA PACA-CNRS-Université de Nice Sophia Antipolis

### Partenaires

- INRA (UMR « Institut Sophia-Agrobiotech »)
- GRAB

### Mots-clefs

Biodiversité, cultures sous serres, *Dittrichia viscosa*, *Eupelmus*, lutte biologique, *Macrolophus*, oléiculture, services écosystémiques

### En bref

Le projet INULA visait à évaluer l'intérêt d'une plante méditerranéenne commune, l'inule visqueuse *Dittrichia viscosa*, (L.), pour la protection contre des insectes ravageurs de deux agrosystèmes : l'oléiculture et les cultures maraîchères ou ornementales sous serres. Les résultats obtenus mettent en évidence une diversité insoupçonnée au niveau des taxons susceptibles d'héberger les auxiliaires de lutte biologique, remettant en cause les mécanismes régulateurs initialement escomptés et modérant l'intérêt de l'inule en tant que plante de service.

## Contexte et objectifs

La réduction attendue des produits phytopharmaceutiques requiert la promotion de solutions alternatives reposant notamment sur l'optimisation de services écosystémiques. La mise en pratique de ces stratégies alternatives induit une complexification de la composante biotique et l'exploitation de plantes de services (Figure 1).

Le programme INULA visait à évaluer, voire optimiser, l'utilisation de l'inule visqueuse pour la protection des cultures susmentionnées (Figure 2). Concernant l'oléiculture, le mécanisme régulateur envisagé repose sur l'augmentation du contrôle exercé par des parasitoïdes du genre *Eupelmus*

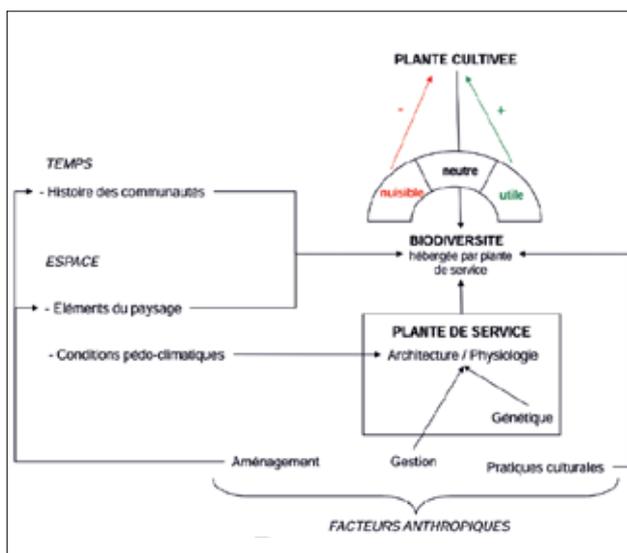
sur la mouche de l'olive, *Bactrocera oleae*. En effet, l'inule est connue pour héberger un diptère appelé *Myopites stylata* (mouche de l'inule), susceptible donc de servir d'hôte-relais complémentaire pour *Eupelmus*.

Concernant les productions sous serres, l'inule est décrite comme un réservoir potentiel de différents insectes phytophages piqueurs-suceurs (pucerons, aleurodes) qui peuvent servir de proies-relais à des punaises prédatrices, en particulier de la famille des Miridae et du genre *Macrolophus*.

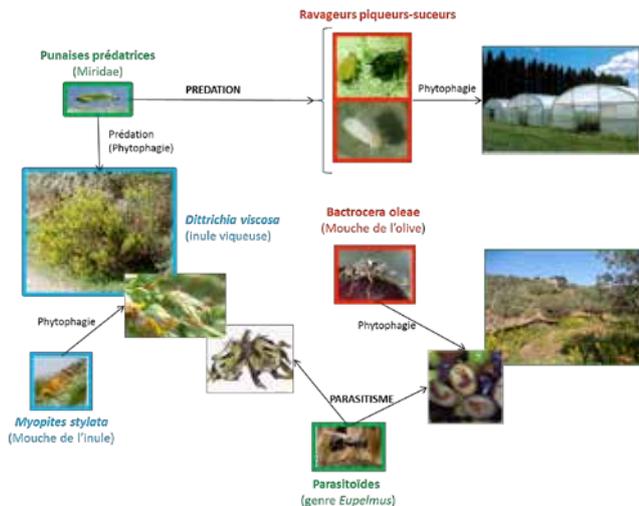
## Principaux résultats

Le premier objectif était d'identifier les espèces pertinentes (bioagresseurs ciblés, auxiliaires et hôtes/proies relais) et mieux comprendre leurs écologies. Pour le volet « oléiculture », un objectif complémentaire était de comparer les abondances de la mouche de l'olive entre des sites présentant des abondances contrastées en inule visqueuse. Parallèlement, un volet « botanique » a été développé afin de comprendre l'influence de facteurs locaux et de certaines pratiques sur la phénologie de l'inule.

En tout, plus de trente sites ont été sélectionnés en France (Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon) et en Italie, et suivis pendant deux ans. Une caractérisation moléculaire et/ou morphologique a été réalisée sur les taxons susceptibles d'inclure des auxiliaires (genres *Eupelmus* et *Macrolophus*). Des expérimentations en conditions plus contrôlées ont également été menées afin de préciser l'écologie d'espèces potentiellement utiles mais peu connues (*E. confusus* et *Macrolophus melanotoma*). Sur le volet « botanique », trois sites géographiquement proches mais présentant notamment des conditions climatiques différentes ont été suivis.



**Figure 1 :** Principaux déterminants de la biodiversité hébergée par une plante de service (Source : Ris et al. 2014).



**Figure 2 :** Synthèse des services de régulation attendus de l'inule visqueuse. En vert : auxiliaires potentiels ; en rouge : ravageurs ciblés, en bleu : plante de service et hôte-relais.

... D'une façon générale, le résultat principal du projet INULA est la mise en évidence d'une diversité insoupçonnée ou mal perçue dans les taxons incluant les auxiliaires potentiels. Dans le cadre du volet « serres », les travaux de caractérisation confirment la distinction entre les espèces *M. pygmaeus* et *M. melanotoma*, deux punaises prédatrices morphologiquement très proches. Sur les sites étudiés, ces deux espèces montrent une ségrégation de niche importante. *M. pygmaeus* étant relativement rare et inféodée aux cultures (probablement souvent en lien avec des lâchers intentionnels) et *M. melanotoma* étant particulièrement abondante mais essentiellement restreinte à l'inule et ne présentant donc pas un rôle de régulation des bioagresseurs concernés. Des expérimentations complémentaires en conditions simplifiées et contrôlées montrent également que *M. melanotoma* semble peu attirée par d'autres plantes (tomates) par rapport à l'inule.

Dans le cadre du volet « Oléiculture », la révision de la systématique du genre *Eupelmus* met en évidence une diversité insoupçonnée avec, notamment, la description de deux espèces nouvelles, *E. confusus* et *E. gemellus*. Sur les sites

considérés, trois espèces d'*Eupelmus* sont capables de parasiter la mouche de l'olive (*E. confusus*, *E. gemellus* et *E. urozonus*), aucune d'entre elles n'étant toutefois fréquemment associée avec la mouche de l'inule. Des lâchers augmentatifs de l'espèce *E. confusus* ne montrent pas d'impacts notables de cette espèce sur le parasitisme des mouches de l'olive et de celles de l'inule.

Ces deux faisceaux de résultats ne soutiennent donc pas, pour la zone géographique considérée, le rôle « central » de l'inule visqueuse dans la régulation des bioagresseurs considérés via les mécanismes initialement identifiés.

## Perspectives

### Transfert

Les résultats obtenus incitent à une certaine « réserve » vis-à-vis de l'intérêt de l'inule visqueuse, tel qu'il avait été initialement perçu.

Ces résultats n'excluent toutefois pas complètement un intérêt de l'inule pour contribuer à la régulation de bioagresseurs des cultures dans d'autres zones géographiques et/ou en association avec d'autres plantes de services et/ou via d'autres mécanismes.

Ces résultats n'excluent pas non plus le rôle de l'inule à fournir d'autres services écosystémiques (ex. : sources de nourriture pour pollinisateurs).

### Recherche

Concernant le volet « oléiculture », les données accumulées dans le cadre du projet INULA et d'initiatives connexes (Thèse de Fadel al Khatib, 2015) invitent à repenser assez profondément la diversité floristique aux abords des olive-rais afin de tenter de mettre effectivement en place une régulation de *B. oleae* par une communauté d'*Eupelmus*.

Concernant le volet « serres », les résultats obtenus ont incité à la recherche d'autres plantes de service alternatives (projet Macroplus porté par le GRAB). De façon plus prospective, des études sur *M. melanotoma* seraient bienvenues pour mieux comprendre son écologie et, éventuellement, mobiliser, malgré son apparente inféodation à l'inule, les populations présentes aux abords des cultures sous serres. ■

## Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Site web : <https://www6.paca.inra.fr/inula>
- Al khatib F., 2015. Apports des marqueurs moléculaires à la systématique, biogéographie et écologie des espèces euro-méditerranéennes du genre *Eupelmus* - implications pour leur utilisation en lutte biologique. Thèse de Doctorat, Diplôme délivré par Montpellier Sup Agro (ED SIBAGHE). Soutenance le 20/11/2015.
- Al khatib F., Cruaud A., Fusu L., Genson G., Rasplus J-Y., Ris N., Delvare G. (in press) : Multilocus phylogeny and ecological differentiation of the "*Eupelmus urozonus* species group". BMC Evolutionary Biology.
- Parolin P., Ion Scotta M. & Bresch C., 2014: Biology of *Dittrichia viscosa*, a Mediterranean ruderal plant. International Journal of Experimental Botany (Phyton) 83:7.14.
- Ris N., Ion-Scotta M., Al Khatib F., Lambion J., Warlop F., Bout A., 2014. Biodiversités « utile » et « nuisible » dans les agrosystèmes : importance pour la lutte biologique par conservation. Mémoires de la SEF n°9, 2014: 35-43.

## Développement d'un outil d'évaluation de la durabilité de systèmes de culture commun aux différentes filières arboricoles et au service des acteurs des réseaux

Pour et Sur le Plan Écophyto, PSPE1 (financement : Écophyto, redevance pollutions diffuses)

### Responsable scientifique

Aude Alaphilippe  
aude.alaphilippe@inra.fr  
INRA Gotheron

### Partenaires

- INRA : Frédérique Angevin
- CTIFL : Franziska Zavagli
- IFPC : Anne Guérin
- AGROCAMPUS OUEST : Pascale Guillermin

### Mots-clés

Outil, évaluation, durabilité, système de culture fruitière

### En bref

DEXiFruits est un outil informatique d'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture en arboriculture fruitière. Il a été développé par l'INRA, le CTIFL, l'IFPC et AGROCAMPUS OUEST, principalement avec les données des réseaux Écophyto. Il permet d'évaluer les performances économiques, environnementales et sociales des pratiques d'un verger dans son contexte et permet d'identifier ses forces et ses faiblesses. L'utilisateur peut comparer les performances de son système avec d'autres ou avec un système référent livré avec l'outil. Il peut ainsi servir à faire un autodiagnostic et peut également accompagner l'animation d'un groupe.



### Contexte et objectifs

L'évaluation de la durabilité d'un système de culture (SdC) est complexe. En grandes cultures, l'outil MASC<sup>1</sup> a fait ses preuves mais son utilisation reste à optimiser (temps de calcul important). En parallèle, des outils DEXiPM<sup>2</sup> destinés à la recherche sont développés dans les différentes filières. Ces outils permettent de concevoir<sup>3</sup> a priori des SdC innovants et durables. En arboriculture, les professionnels souhaitent bénéficier de ce type d'outil, **adapté au terrain**, mais pour évaluer leur SdC a posteriori.

En réponse à cette demande, le projet DEXiFruits avait pour ambition de fournir à cette filière **un outil d'évaluation multicritère de la durabilité dédié**.

### Principaux résultats

L'outil DEXiFruits a été développé et testé principalement en regard des connaissances et données des réseaux Écophyto. DEXiFruits est un arbre hiérarchique à l'arborescence transparente et dont tous les critères de base, « les feuilles », sont facilement accessibles pour un arboriculteur. Ceci permet de l'utiliser pour faire, dans un premier temps, le diagnostic des forces et faiblesses d'un système (Figure 1) et de proposer ultérieurement des modifications ou des innovations tout en évaluant leurs conséquences du point de vue

économique, environnemental et social. L'utilisateur peut comparer les performances de son système (Figure 2) avec d'autres systèmes existants ou innovants et avec un système référent moyen livré avec l'outil ou modifiable selon le contexte.

Les livrables du projet (mis en ligne sur le Wiki DEXi-MASC, dans une partie dédiée à DEXiFruits) :

- **Les outils DEXiFruits**, à savoir :
    - Une version générique pour les cultures fruitières à noyaux et à pépins métropolitaines, utilisable avec une interface utilisateur IZIEval disponible en ligne.
    - Trois déclinaisons de l'outil adaptées à trois espèces fruitières : la pomme à couteau, la pomme à cidre et la pêche.
  - **Les documents d'accompagnement** :
    - Le tutoriel d'utilisation et ses fiches « critère ».
    - Les 3 extensions du tutoriel (une par déclinaison d'espèce).
  - **Les supports de formation** :
    - Le support de formation à DEXiFruits (présentation ppt).
    - Le parcours d'autoformation mis en ligne sur la page wiki dédiée à DEXiFruits.
- Par ailleurs, des documents pour accompagner l'évolution de l'outil ont été créés :
- Le cadre de paramétrage de DEXiFruits à d'autres espèces.
  - La méthodologie de couplage de DEXiFruits avec des indicateurs.

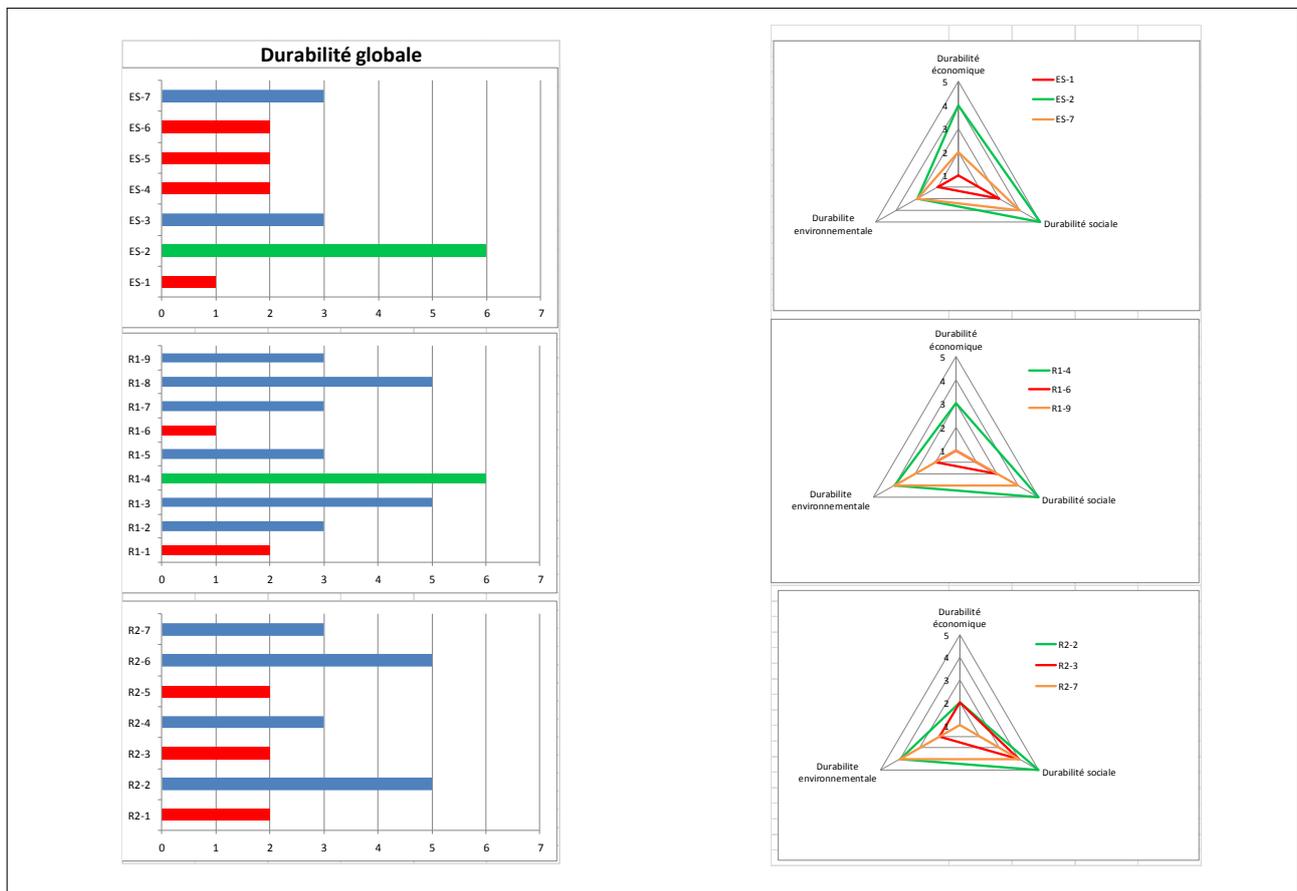
Avant la livraison de l'outil, deux stratégies ont été menées pour tester l'outil et ses documents d'accompagnement pour vérifier leur ergonomie et leur facilité d'utilisation :

- (1) des **utilisations à grande échelle** : 40 SdC du réseau EXPE (stages INRA et Ctifl) testés pour évaluer l'intérêt de mobiliser un tel outil dans le cadre Écophyto ; à savoir identifier (i) des systèmes durables et (ii) des stratégies de production intéressantes pour les objectifs Écophyto. ...

1. Sadok et al., 2009, MASC: a qualitative multi attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. Agron. Sustain. Dev. 29, 447-461.

2. [wiki.inra.fr/wiki/deximasc/Présentation+de+DEXi-PM/](http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/Présentation+de+DEXi-PM/) WebHome

3. Messéan et al, 2010, Outils d'évaluation et d'aide à la conception de stratégies innovantes de protection des grandes cultures, Innovations Agronomiques, 8, 69-81



**Figure 1 :** Notes de durabilité globale de DEXiFruits obtenues pour les systèmes de cultures du réseau national EXPE Écophyto.

**Figure 2 :** Exemple de comparaison de systèmes selon les trois piliers de la durabilité globale de DEXiFruits.

... (2) des **tests d'utilisation de l'outil** par des acteurs de terrain, ingénieurs réseaux (GRCETA), techniciens (INRA), chercheurs et professeurs internationaux (congrès INNOHORT, SIVAL...)

## Perspectives

### Recherche

Un outil dédié aux systèmes de culture de fruits a été créé avec l'objectif de faire progresser la production arboricole française vers des systèmes de culture de plus en plus durables et ce, sur les trois piliers de la durabilité. Les porteurs du projet et ses partenaires espèrent que DEXiFruits soit un outil vivant, avec une communauté d'utilisateurs qui le fasse évoluer en intégrant les nouvelles connaissances et de nouvelles cultures fruitières.

### Transfert

Pour permettre une utilisation de l'outil dans les réseaux FERME DEPHY, une formation des ingénieurs territoriaux « arbo » a été organisée et des documents d'accompagnement fournis. Le travail se poursuit avec la cellule d'action nationale DEPHY Écophyto pour une utilisation de DEXiFruits dans le repérage des systèmes multiperformants.

Il est également envisagé de développer, avec des organismes de formation, des contenus pédagogiques qui pourraient mobiliser DEXiFruits, dans le cadre de travaux pratiques sur l'approche système, la durabilité en agriculture et/ou l'évaluation multicritère.

Enfin, DEXiFruits pourrait contribuer à l'animation de groupes, voire au conseil, en offrant un diagnostic de systèmes de culture en moins de 30 minutes. ■

### Publications scientifiques et autres valorisations du projet

- Site internet de l'outil : <http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/DEXiFruits/1-+Accueil>
- Film Écophyto diffusé au salon de l'agriculture 2016 : <https://webtv.agriculture.gouv.fr/dexifruits-recherche-et-innovation-au-service-d-ecophyto-video-5450.html>
- InfoCTIFL, n°320, Avril 2016. P 45-50. DEXiFruits, un outil d'évaluation de la durabilité des vergers – application aux systèmes du réseau national Expé – Ecophyto Pomme.
- Alaphilippe A., Angevin F., Guérin A., Guillermin P., Vêlu A., Zavagli F.. DEXiFruits: an easy-to-use tool to evaluate the sustainability of fruit productions system. ISHS International Symposium INNOHORT: Innovation in Integrated and organic • Horticulture. 8-12 June 2015. Avignon. France. Book of abstracts pp 51.
- Article France Agricole, janv. 2016, DEXiFruits : un outil pour évaluer la durabilité du système, n°3623, p 30. <http://www.lafranceagricole.fr/dexifruits-un-outil-pour-evaluer-la-durabilite-du-systeme-1,0,233703447.html>

# Glossaire

- AAC** : Aire d'alimentation de captage
- ACTA** : Association de coordination technique agricole – Tête de réseau des instituts des filières animales et végétales
- ACV** : Analyse du cycle de vie
- ANR** : Agence nationale pour la recherche
- ANSES** : Agence nationale sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- AOP** : Association d'organisations de producteurs
- APR** : Appel à projets de recherche
- BASE** : Réseau biodiversité agriculture sol et environnement
- BSV** : Bulletin de santé du végétal
- CA** : Chambre d'agriculture
- CASDAR** : Compte d'affectation spéciale développement agricole et rural
- CER-France** : Réseau de conseil et d'expertise comptable en France
- CGAAER** : Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux
- CGDD** : Commissariat général au développement durable
- CIRAME** : Centre d'information régional agro-météorologique et économique
- CIVAM** : Centre d'initiative pour valoriser l'agriculture et le milieu rural
- CNRS** : Centre national de la recherche scientifique
- CRA** : Chambre régionale d'agriculture
- CRAMP** : Chambre régionale d'agriculture Midi-Pyrénées
- CTIFL** : Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes
- CTIS** : Centre de traitement de l'information scientifique
- DEPHY** : Démonstration, expérimentation et production de références sur les systèmes économes en phytosanitaires
- DGER** : Direction générale de l'enseignement et de la recherche
- EFSA** : European food safety authority
- ENSFEA** : Ecole nationale supérieure de formation de l'enseignement agricole
- FEDER** : Fonds européen de développement régional
- FERA** : Food and environment research agency
- FRB** : Fondation pour la recherche sur la biodiversité
- FREDON** : Fédération régionale de défense contre les organismes nuisibles
- GEVES** : Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences
- GRAB** : Groupe de recherche en agriculture biologique
- IDELE** : Institut de l'élevage
- IFPC** : Institut français des productions cidricoles
- IFT** : Indice de fréquence de traitement
- IFV** : Institut français de la vigne et du vin
- INP** : Institut national polytechnique
- INRA** : Institut national de la recherche agronomique
- IRSTEA** : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
- ITAB** : Institut technique de l'agriculture biologique
- MAAF** : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt
- MAEt** : Mesure agro-environnementale territorialisée
- MEEM** : Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer
- ONCFS** : Office national de la chasse et de la faune sauvage
- PFI** : Production fruitière intégrée
- PIC** : Protection intégrée des cultures
- PSPE** : Pour et sur le plan Écophyto
- RAD** : Réseau pour une agriculture durable
- RFSV** : Réseau français de la santé des végétaux
- RMT** : Réseau mixte technologique
- SBT** : Surveillance biologique du territoire
- SCEP** : Système de culture économe et performant
- SdC** : Système de culture
- SIG** : Système d'information géographique
- Terres Inovia** : Institut technique de référence des professionnels de la filière des huiles et protéines végétales et de la filière chanvre
- UE** : Unité expérimentale
- UMR** : Unité mixte de recherche
- UMR LISIS** : Laboratoire interdisciplinaire sciences innovations sociétés
- UMR SAD-APT** : Sciences action développement – activités produits territoires
- UMR SVQV** : Santé de la vigne et qualité du vin
- UR** : Unité de recherche



Date de parution: 22 mars 2017 • Contacts : Laure Dreux (ACTA): [laure.dreux@acta.asso.fr](mailto:laure.dreux@acta.asso.fr) • Gérard Gautier-Hamon (Ministère chargé de l'agriculture) : [gerard.gautier-hamon@agriculture.gouv.fr](mailto:gerard.gautier-hamon@agriculture.gouv.fr) • Robin Goffaux (FRB): [robin.goffaux@fondationbiodiversite.fr](mailto:robin.goffaux@fondationbiodiversite.fr) • Anne-Sophie Carpentier (Ministère chargé de l'environnement) : [anne-sophie.carpentier@developpement-durable.gouv.fr](mailto:anne-sophie.carpentier@developpement-durable.gouv.fr) • Imprimeur : BiPrint • Maquette : [m.factory@free.fr](mailto:m.factory@free.fr)