



PESTICIDES
utilisation et réduction des risques

COLLOQUE DE RESTITUTION
« Évaluation et Réduction des Risques
liés à l'Utilisation des Pesticides »

& PESTICIDES ENVIRONNEMENT



DE LA CONNAISSANCE AUX OUTILS & À L'ACTION



AMÉRIQUE ÉCONOMIQUE
ET DÉVELOPPEMENT
ET SOCIÉTÉ ÉCONOMIQUE
ET SOCIÉTÉ ÉCONOMIQUE

INERIS
Institut National de l'Environnement
Industriel et de la Santé

Les recherches financées dans le cadre du Programme «Évaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides» ont pour principaux objectifs de mieux évaluer les dangers et les risques pour les organismes non-cibles liés à la présence de pesticides dans l'environnement et de contribuer à la construction d'approches permettant une réduction de l'utilisation de ces substances. L'objectif de ce colloque est de montrer comment les connaissances ainsi générées peuvent contribuer à une meilleure gestion des milieux naturels exposés à ces substances ou susceptibles de l'être. La notion de gestion s'entend ici dans un sens large, qui va de la mise sur le marché des pesticides à la protection et à la restauration des écosystèmes. Le colloque s'adresse à la fois aux chercheurs des thématiques impliquées et à tous les acteurs de cette gestion : services centraux et déconcentrés de l'Etat, profession agricole, agences, industries, associations, etc.

Le but principal de ce colloque est de faire un point de l'avancement des connaissances apportées par le programme et d'appréhender les axes de recherche qui seront à soutenir dans le futur, dans un dialogue privilégié entre praticiens de la décision publique et chercheurs. Pour cela, la rencontre est organisée en trois temps :

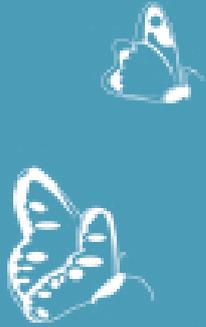
- A partir d'un découpage par thèmes représentant des enjeux pour la recherche et pour l'action publique, des sessions co-animées par des scientifiques et des acteurs publics présenteront les avancées réalisées par les projets soutenus suite à l'Appel à propositions de recherche 2002 et dans l'action de recherche connexe "Indicateurs et Pesticides". Lors de ces présentations, l'accent sera mis sur les éléments susceptibles de faire l'objet d'un transfert à destination des utilisateurs finaux des produits de la recherche et un échange avec la salle est proposé en fin de chacune des sessions.

- Les projets de recherche sélectionnés suite à l'Appel à proposition de recherches 2006 seront présentés pour compléter le panorama des travaux soutenus par le Programme et faciliter la discussion prospective finale. Une discussion avec la salle est prévue en fin de chacune des deux sessions correspondantes.

- Une discussion prospective est attendue en fin de colloque autour d'une table ronde-débat afin d'envisager les domaines de recherche restés orphelins sur ce sujet préoccupant, les besoins en termes de méthodes et d'outils pour une meilleure gestion et préservation des milieux naturels vis-à-vis des pesticides et les nouvelles thématiques de recherche qui émergeraient de ces deux jours d'échange.



& PESTICIDES ENVIRONNEMENT



DE LA CONNAISSANCE AUX OUTILS & À L'ACTION

Document publié sous la coordination de :

Thierry CAQUET
INRA Rennes
et de
Eric THYBAUD
INERIS

avec l'appui de
Catherine GONDCAILLE et **Vanessa VEG**
INERIS

Centre des Congrès de Reims

7-8-9
novembre 2007



Les objectifs du colloque



Avant-propos



Le programme « Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides »

RÉSULTATS DES RECHERCHES ISSUES DE L'APPEL A PROPOSITIONS DE RECHERCHE 2002

11 SESSION 1

DYNAMIQUE DES PESTICIDES DANS L'ENVIRONNEMENT

- 12 • Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture -
Yves-Marie Cabidoche (INRA Antilles Guyanne Guadeloupe)
- 16 • Caractérisation du risque de contamination de la nappe de Beauce par les pesticides : élucidation des mécanismes du transport préférentiel et approche spatiale du risque à l'échelle du bassin hydrologique (ESHEL) -
Yves Coquet (INRA Paris Grignon)
- 22 • Pesticides dans l'atmosphère : étude des cinétiques et mécanismes de dégradation en laboratoire et mesures dans l'atmosphère (PACT) -
Wahid Mellouki (CNRS Orléans)

26 SESSION 2

ÉVALUATION DES EFFETS CHRONIQUES DES PESTICIDES SUR DES SYSTÈMES BIOLOGIQUES INTÉGRÉS

- 27 • Impact des pesticides sur l'environnement marin (IPEM) -
Gaël Durand (IDHESA Plouzané)
- 32 • Ecobilan des luttes chimiques contre les larves phytophages du sol. Recherche de stratégies agronomiquement, écologiquement et socialement acceptables
Patrick Ravanel (Université de Grenoble)
- 36 • Changements d'échelle et évaluation du risque écotoxicologique de mélanges entre substances actives herbicides et adjuvant (CEREMEL) -
Laurent Lagadic (INRA Rennes)



- 42 • Action directe et indirecte des insecticides sur les bactéries endocellulaires altérant la sexualité des insectes -
Myène Weill (Université de Montpellier)

45 SESSION 3

NOUVELLES APPROCHES VISANT A RÉDUIRE LES RISQUES LIÉS A L'USAGE DES PESTICIDES

- 46 • Étude et modélisation des liens entre traitements phytosanitaires, opérations culturales, caractères des fruits ou de la plante et contamination par les monilioses en verger de pêchers en vue d'une protection durable -
Françoise Lescourret (INRA Avignon)

- 50 • Conduite intégrée du colza d'hiver pour une réduction de l'utilisation des pesticides -
Muriel Valantin-Morison (INRA Grignon)

56 SESSION 4

VITICULTURE, VIN ET PESTICIDES

Marie-Claude Belis-Bergouignan (INRA Université de Bordeaux IV)

- 61 INDICATEURS ET PESTICIDES
Philippe Girardin (INRA Colmar)
James Devillers (CTIS Lyon)
Eric Thybaud (INERIS)
Guy Soulas (INRA Bordeaux)

SÉMINAIRE DE LANCEMENT DE L'APPEL A PROPOSITIONS DE RECHERCHE 2006

66 SESSION 1

PESTICIDES ET MILIEUX NATURELS : ÉVALUATION A PRIORI ET SUIVI POST-HOMOLOGATION

- 67 • Étude comparée des effets de phytosanitaires et de produits de lutte ant-vectorielle sur les Communautés Microbiennes aquatiques d'Ecosystèmes Tropicaux (ECOMET) -
Christophe Leboulanger (IRD, Université de Montpellier II)

- 68 • Évaluation du risque pesticides pour les récifs coralliens de La Réunion (ERICOR) -
Jean Turquet (ARVAM – La Réunion)

- 69 • Indicateurs pour l'évaluation de l'impact de produits phytosanitaires sur la composante micro-bienne de la qualité biologique des sols -
Guy Soulas (INRA Bordeaux II)

- 70 • Utilisation de modèles d'exposition aux pesticides pour la reconstitution et la mise en œuvre de scénarios réalistes de contamination de mésocosmes permettant d'étudier les impacts d'itinéraires techniques sur les organismes aquatiques (EMERITAT) -
Laurent Lagadic (INRA Rennes)

71 SESSION 2

RÉDUCTION DE L'UTILISATION DES PESTICIDES : APPROCHES SYSTÉMIQUES ET ANALYSE SOCIO-ÉCONOMIQUE

- 72 • Caractérisation des pratiques de protection des cultures et de leur évolution : méthodologie de diagnostic et propositions visant à améliorer l'impact environnemental des systèmes de culture et d'élevage -
Laurence Guichard (INRA Grignon)

- 73 • Systèmes de culture bananiers sans pesticides : conception et conditions d'adoption aux Antilles françaises -
Philippe Tixier (CIRAD, Martinique)

- 74 • Phytoville, sociologie des usages des pesticides dans les jardins privés urbains -
Denis Salles (CERTOP, CNRS - Université de Toulouse II)

Textes des appels à proposition de recherche (APR 2006 – APR 2002)

76

Après plus d'un demi-siècle d'utilisation intensive, les pesticides sont parmi les substances chimiques qui suscitent le plus d'interrogations quant aux risques qu'ils présentent pour la santé humaine et pour l'environnement. Des plans de réduction des usages des pesticides ont été mis en place progressivement. Il demeure cependant nécessaire de poursuivre l'acquisition de connaissances sur leur devenir dans l'environnement et sur leurs effets. Ces recherches permettront : d'améliorer les procédures d'homologation préalables à leur mise sur le marché, de proposer des outils qui permettent d'accompagner la prise de décision en matière d'usage de ces substances et de réaliser des diagnostics environnementaux. Parallèlement, il convient de poursuivre et d'amplifier les recherches en vue d'optimiser leur utilisation voire même de pouvoir s'en passer grâce au développement de pratiques adaptées. Dans tous les cas, il importe de considérer non seulement les dimensions agronomiques et environnementales de la question, mais aussi ses aspects socio-économiques.

Depuis 1999, le Programme de recherche finalisée Évaluation et Réduction des Risques liés à l'Utilisation des Pesticides du Ministère chargé de l'environnement contribue au soutien des actions de recherche dans ces différents domaines. La structure et l'orientation des Appels à propositions de recherche successifs de ce Programme (3 depuis 1999) ont évolué en réponse aux connaissances disponibles et aux questionnements émergents. C'est ainsi que l'Appel à propositions de recherche émis en 2006 a été l'occasion pour le Programme de mobiliser la communauté scientifique sur certaines des thématiques identifiées comme prioritaires à l'issue de l'Expertise Scientifique Collective réalisée par l'Inra et le Cemagref à la demande des Ministères chargés de l'environnement et de l'agriculture. Il s'agit notamment de la nécessité de proposer et d'évaluer des méthodes/pratiques alternatives économes en pesticides et du choix des modèles utilisés en évaluation des risques.

Le bilan réalisé lors du précédent Colloque du Programme (novembre 2005, Avignon), avait fait ressortir le besoin de connaissances sur les phénomènes propres aux conditions environnementales des régions tropicales. Les crises sanitaires et environnementales anciennes (chlordécone aux Antilles) ou nouvellement survenues dans les départements et territoires ultramarins (chikungunya à la Réunion et aux Comores) ont conforté ce besoin. Près de la moitié des projets retenus en 2006 abordent ce domaine, non seulement en ce qui concerne la caractérisation des effets des pesticides, mais aussi en vue de proposer des pratiques agronomiques innovantes dans ces régions.

Le Colloque de Reims a un double objectif, d'une part faire le point sur les connaissances acquises lors des programmes soutenus jusqu'à ce jour et d'autre part permettre aux équipes dont les projets ont été sélectionnés suite au dernier Appel à propositions de recherche de présenter ces projets au plus grand nombre.

La vocation des Programmes de recherche pilotés par le Service de la Recherche et de la Prospective est le transfert des produits de la recherche vers des utilisateurs impliqués, de quelque manière que ce soit, dans la gestion de l'environnement. Cette préoccupation est, avec l'impératif de l'excellence scientifique, au cœur des travaux du Conseil Scientifique et du Comité d'Orientations lors de la sélection des projets de recherche. C'est pourquoi l'objectif de ces journées est de permettre le dialogue entre scientifiques et praticiens de la décision publique, afin qu'au-delà de l'information réciproque de ces différents groupes d'acteurs puissent s'initier des projets de transfert en vue d'une application opérationnelle des outils issus de la recherche.

6

Eric VINDIMIAN

Chef du Service de la Recherche et de la Prospective, Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, Président du Comité d'Orientations du Programme

Thierry CAQUET

Institut National de la Recherche Agronomique Centre de Rennes, Président du Conseil Scientifique du Programme





MERCREDI 7 NOVEMBRE 2007



13 H - 14 H

Accueil des participants, enregistrement

14 H - 14 H 30

**Discours de bienvenue
et ouverture du colloque****Eric Vindimian,**Ministère de l'écologie de l'aménagement
et du développement durables, D4E, Service
de la recherche et de la Prospective
Philippe Caron, DIREN Champagne-Ardennes

14 H 30 - 15 H 30

Conférence introductive**Jean Marot,** Université Catholique de Louvain
(Belgique)

15 H 30 - 16 H

Pause

**Résultats des recherches issues
de l'Appel à propositions
de recherche 2002**

16 H - 17 H 40

**Dynamique des pesticides dans
l'environnement**Session animée par **Marc Chevreuil** (EPHE Paris)
Enrique Barriuso (INRA Grignon)
Jean-Joël Gril (CEMAGREF Lyon - CORPEN)

Les connaissances sur la dynamique et le comportement des pesticides dans l'environnement sont essentielles pour l'amélioration d'une part des procédures d'évaluation des risques *a priori*, et d'autre part du suivi post-homologation de ces molécules. En effet, ces connaissances constituent un préalable indispensable à toute évaluation des expositions, étape nécessaire pour caractériser les risques liés à l'utilisation des pesticides ou comprendre les impacts observés dans les écosystèmes. Trois projets ont été consacrés à l'étude du devenir et du comportement des pesticides dans les sols, les eaux et l'atmosphère.

**Présentation et enjeux de la session
Marc Chevreuil et Enrique Barriuso****Les projets**

- Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles :

relation avec les systèmes de culture
Yves-Marie Cabidoche
(INRA Antilles-Guyane, Guadeloupe)

- Caractérisation du risque de contamination de la nappe de Beauce par les pesticides : élucidation des mécanismes du transport préférentiel et approche spatiale du risque à l'échelle du bassin hydrologique
Yves Coquet (INRA Grignon)

- Pesticides dans l'atmosphère : étude des cinétiques et mécanismes de dégradation en laboratoire et mesures dans l'atmosphère
Abdelwahid Mellouki (CNRS Orléans)

**La vision de l'utilisateur final
Jean-Joël Gril****Débat - discussions**

17 H 40

Fin de la première journée.

JEUDI 8 NOVEMBRE 2007



8 H 30 - 10 H 30

**Évaluation des effets chroniques
des pesticides sur des systèmes
biologiques intégrés**Session animée par
Thierry Caquet (INRA Rennes)
Eric Thybaud (INERIS)**Anne Alix**
(AFSSA - Direction du Végétal et
de l'Environnement)

Les pesticides sont susceptibles de perturber de façon directe ou indirecte les organismes au sein des écosystèmes, avec pour conséquence des altérations des équilibres dynamiques au sein des communautés et des perturbations possibles des services des écosystèmes.

Ces aspects ont été abordés au travers de quatre projets, l'un concernant le phytoplancton côtier, le second le devenir et l'impact du fipronil en milieu terrestre, le troisième les effets de mélanges herbicides-adjuvant en milieu dulçaquicole et le dernier l'action d'insecticides sur les bactéries endocellulaires altérant la sexualité des insectes.

Présentation et enjeux de la session

Thierry Caquet et Eric Thybaud



Les projets

- Impact des pesticides sur l'environnement marin
Gaël Durand (JDHESA Plouzané)
- Écobilan des luttes chimiques contre les larves phytophages du sol. Recherche de stratégies agronomiquement, écologiquement et socialement acceptables
Patrick Ravanel (Université de Grenoble)
 - Changements d'échelle et évaluation du risque écotoxicologique de mélanges entre substances actives, herbicides et adjuvant
Laurent Lagadic (INRA Rennes)
- Action directe et indirecte des insecticides sur les bactéries endocellulaires altérant la sexualité des insectes
Mylène Weill (Université de Montpellier)



La vision de l'utilisateur final

Anne Alix



Débat - discussions

10 H 30 - 10 H 50 - Pause

10 H 50 - 12 H 00

Nouvelles approches visant à réduire les risques liés à l'usage des pesticides

Session animée par

Philippe Lucas (INRA Rennes)

Jean-Marc Meynard (INRA Grignon)

Benoît Réal (ARVALIS Institut du Végétal)

La maîtrise des risques que présentent les pesticides pour l'environnement repose en partie sur le développement de nouvelles pratiques ou itinéraires techniques ou bien de méthodes de production alternatives permettant de limiter, voire de supprimer, le recours à ces substances. Deux programmes se sont intéressés à cette question et ont proposé des itinéraires ou des stratégies culturelles innovants, l'un sur culture fruitière, l'autre sur colza.

Présentation et enjeux de la session

Philippe Lucas et Jean-Marc Meynard



Les projets

- Étude et modélisation des liens entre traitements phytosanitaires, opérations culturales, caractères des fruits ou de la plante et contamination par

les monilioses en verger de pêchers en vue d'une protection durable

Françoise Lescourret (INRA Avignon)

- Conduite intégrée du colza d'hiver pour une réduction de l'utilisation des pesticides
Muriel Valantin-Morison (INRA Grignon)



La vision de l'utilisateur final

Benoît Réal



Débat - discussions

12 H - 13 H 30 - Déjeuner

13 H 30 - 14 H 50

Viticulture, Vin et Pesticides

Session animée par

Christophe David (ISARA Lyon)

Alain Carpentier (INRA Rennes)

Philippe Reulet

(Ministère de l'Agriculture et de la Pêche - Direction Générale de l'Alimentation - DRAF/SRPV Aquitaine)

A un moment où la viticulture traverse une période économiquement difficile, la question de l'utilisation des pesticides dans cette filière se pose en termes non seulement d'impact potentiel sur l'environnement mais aussi en ce qui concerne la qualité des vins, tout en intégrant les dimensions économiques de la problématique. Un projet de recherche pluridisciplinaire a abordé cette question au travers d'une analyse de la perception et du comportement des viticulteurs vis-à-vis de l'adoption d'innovations environnementales, de réflexions sur l'enjeu de nouvelles pratiques réduisant l'utilisation de produits phytosanitaires dans la construction de la qualité du vin et d'une analyse de l'impact d'une qualification environnementale sur la commercialisation des vins.



Présentation et enjeux de la session

Christophe David et Alain Carpentier



Le projet

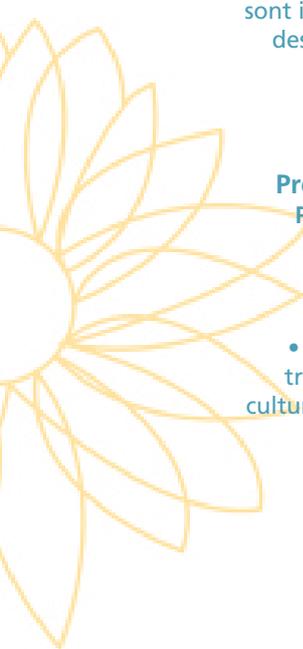
Viticulture, Vin et Pesticides

Marie-Claude Belis-Bergouignan
(INRA Université de Bordeaux IV)



La vision de l'utilisateur final

Philippe Reulet





Débat - discussions

14 H 50 – 16 H 10

Indicateurs et Pesticides : Quelles attentes pour les gestionnaires ? Quelles questions pour la recherche ?

Session animée par
Thierry Caquet (INRA Rennes)

Si l'évaluation des risques est un outil puissant qui permet d'asseoir la prise de décision et la mise en œuvre de la réglementation sur les pesticides sur des bases solides, de nombreuses situations impliquent le recours à des outils dont l'utilisation est *a priori* plus simple et moins onéreuse, regroupés sous le terme générique d'indicateurs.

Après une première phase consacrée à l'établissement d'une synthèse et à l'analyse critique des indicateurs composites existants qui a abouti à la publication d'un ouvrage de référence dans le domaine, la seconde phase du programme "Indicateurs et Pesticides" a permis d'aborder divers aspects plus proches de l'utilisation opérationnelle de certains de ces outils (faisabilité de leur mise en œuvre, tests de sensibilité, comparaison de leurs sorties avec des données de terrain).

Une démarche d'amélioration de leur construction a aussi été initiée. Enfin, de nouveaux indicateurs permettant de mieux prendre en compte la biodiversité de bord des champs ou certains organismes non-cibles (abeilles, vers de terre) ont été proposés.



Le projet

James Devillers (CTIS Lyon)
Philippe Girardin (INRA Colmar)
Guy Soulas (INRA Bordeaux)
Eric Thybaud (INERIS)



Débat – discussions

Représentants à la tribune, accompagnés du président du Conseil Scientifique du programme :

CORPEN – MEDAD / Direction de l'Eau – MAP / Direction Générale de la Forêt et des Affaires rurales – INRA

16 H 10 – 16 H 30- Pause

16 H 30 – 17 H 30

Mini table ronde - Premier bilan de l'APR 2002 et introduction de l'APR 2006

Représentants à la tribune :

Anne Lieutaud

(Ministère de l'écologie, de l'aménagement et du développement durables / D4E / Service de la recherche et de la Prospective)

un représentant du Ministère de l'agriculture et de la pêche

Jean-Joël Gril et Philippe Lucas
(coordinateurs de l'expertise collective
INRA CEMAGREF)

Thierry Caquet,
président du Conseil Scientifique
du programme

17 H 30 : Fin de la deuxième journée

20 H 00

Dîner du colloque (centre de Reims)

Présentation des projets sélectionnés suite à l'Appel à propositions de recherche 2006

VENDREDI 9 NOVEMBRE 2007



8 H 30 – 9 H 40

Pesticides et milieux naturels : Évaluation *a priori* et suivi post-homologation

Session animée par

Michel Marchand (IFREMER Nantes)
Marcel Guiho (DIREN Bretagne)



L'homologation des produits phytosanitaires est un processus complexe reposant notamment sur une évaluation *a priori* des risques pour l'environnement liés à l'utilisation de ces composés. Aussi complexe et détaillée soit-elle, cette évaluation réglementaire se doit d'être améliorée en permanence tant en ce qui concerne l'estimation des expositions que celle des effets potentiels de ces produits.

Par ailleurs, l'utilisation dispersive de ces substances implique de se doter des moyens nécessaires à une évaluation *a posteriori* des risques qu'elles présentent pour l'environnement. Quatre projets axés sur cette problématique ont été sélectionnés. Trois concernent des organismes peu étudiés, les organismes coralliens et les microorganismes, aquatiques et terrestres. Le quatrième est centré sur l'utilisation de modèles d'exposition pour la détermination de scénarios réalistes de contamination des milieux aquatiques en vue d'évaluer les impacts d'itinéraires techniques.



Présentation et enjeux de la session Michel Marchand



Les projets

- Étude comparée des effets de phytosanitaires et de produits de lutte anti-vectorielle sur les communautés microbiennes aquatiques d'écosystèmes tropicaux

Christophe Leboulanger (IRD - Université Montpellier II)

- Évaluation du risque pesticides pour les récifs coralliens de La Réunion

Jean Turquet (ARVAM – La Réunion)

- Indicateurs pour l'évaluation de l'impact de produits phytosanitaires sur la composante microbienne de la qualité biologique des sols

Guy Soulas (INRA Bordeaux)

- Utilisation de modèles d'exposition aux pesticides pour la reconstitution et la mise en œuvre de scénarios réalistes de contamination de mésocosmes permettant d'étudier les impacts d'itinéraires techniques sur les organismes aquatiques

Laurent Lagadic (INRA Rennes)



La vision de l'utilisateur final

Marcel Guiho



Débat - discussions

9 H 40 – 10 H 40

Réduction de l'utilisation des pesticides – Approches systémiques et analyse socio-économique -

Session animée par **Ramon Laplana**

(CEMAGREF Bordeaux)

Brigitte Dubeuf (DIREN Corse)

La réduction de l'utilisation des pesticides est le moyen *a priori* le plus simple pour réduire leur dispersion, et de façon plus générale le risque présenté par ces substances pour

l'environnement. Diverses propositions en ce sens ont été faites, mais elles présentent un niveau d'adoption globalement faible.

Trois projets s'attacheront respectivement à identifier les freins à cette adoption et les leviers d'action possibles dans le domaine des grandes cultures, à proposer des stratégies innovantes dans le cas de la culture de la banane et à caractériser la sociologie des usages des pesticides dans les jardins privés urbains.



Présentation et enjeux de la session

Ramon Laplana



Les projets

- Caractérisation des pratiques de protection des cultures et de leur évolution : méthodologie de diagnostic et propositions visant à améliorer l'impact environnemental des

systèmes de culture et d'élevage

Laurence Guichard (INRA Grignon)

- Systèmes de culture bananiers sans pesticides : conception et conditions d'adoption aux Antilles françaises

Philippe Tixier (CIRAD, Martinique)

- "Phytoville" : sociologie des usages des pesticides dans les jardins privés urbains

Denis Salles (CERTOP, CNRS - Université Toulouse II)



La vision de l'utilisateur final

Brigitte Dubeuf



Débat - discussions

10 H 40 – 11 H 00 - Pause

11 H 00 – 12 H 30

Table ronde de clôture des 3 journées Quels nouveaux besoins de recherche pour les politiques publiques ?

Représentants à la tribune :

Associations de protection de l'Environnement

Jean-Charles Bocquet (Union des industries de la protection des plantes) -

Bernard Chevassus-au-Louis (président du conseil scientifique du programme « Agriculture et développement durable » de l'ANR)

Joël Mathurin (Ministère de l'agriculture et de la pêche / Direction générale de l'alimentation)

Pascale Robineau (AFSSA / Direction du végétal et de l'environnement)

Eric Vindimian (Ministère de l'écologie, de l'aménagement et du développement durables / D4E / Service de la recherche et de la Prospective)

12 H 30 – 12 H 45

Clôture des journées par **Thierry Caquet**
Président du Conseil Scientifique

12 H 45 – 14 H 00 - Déjeuner

14 H 00 – 17 H 30

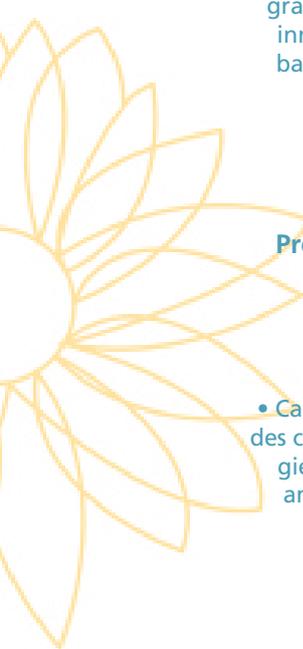
Visite de terrain organisée par **Joël Rochard**,
ITV France

Exploitation du Lycée viticole d'Avize
Aire collective de lavage des pulvérisateurs de la CSGV Avize

Départ prévu vers 14 h 00 -

Trajet en bus réservé pour les participants

17 H 30 - Fin de la troisième journée



Les connaissances sur la dynamique et le comportement des pesticides dans l'environnement sont essentielles pour l'amélioration d'une part des procédures d'évaluation des risques *a priori*, et d'autre part du suivi post-homologation de ces molécules. En effet, ces connaissances constituent un préalable indispensable à toute évaluation des expositions, étape nécessaire pour caractériser les risques liés à l'utilisation des pesticides ou comprendre les impacts observés dans les écosystèmes. Trois projets ont été consacrés à l'étude du devenir et du comportement des pesticides dans les sols, les eaux et l'atmosphère.



12

- Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux fde zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture - **Yves-Marie Cabidoche** (INRA Antilles Guyane Guadeloupe)



16

- Caractérisation du risque de contamination de la nappe de Beauce par les pesticides : élucidation des mécanismes du transport préférentiel et approche spatiale du risque à l'échelle du bassin hydrologique (ESHEL) - **Yves Coquet** (INRA Grignon)

22

- Pesticides dans l'atmosphère : étude des cinétiques et mécanismes de dégradation en laboratoire et mesures dans l'atmosphère (PACT) - **Abdelwahid Mellouki** (CNRS Orléans)



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

Yves-Marie CABIDOCHÉ - INRA,
Unité de Recherche Agropédoclimatique
Centre Antilles-Guyane
Unité Agropédoclimatique de la Zone
Caraïbe
Domaine Duclos
97170 Petit-Bourg
05 90 25 59 64
cabidoch@antilles.inra.fr

PARTENAIRES

Unité de Recherche Agropédoclimatique
Centre Antilles-Guyane
**C. Clermont-Dauphin, A. Lafont,
J. Sansoulet**
CIRAD-FLHOR GUADELOUPE
P. Cattan
PRAM/CIRAD FLHOR
R. Achard, A. Caron, C. Chabrier

STOCKAGE DANS LES SOLS ET DISSIPATION DANS LES EAUX DE ZOOCIDES ORGANOCHLORÉS AUTREFOIS APPLIQUÉS EN BANANERAIES AUX ANTILLES : RELATION AVEC LES SYSTÈMES DE CULTURE

**MOTS CLÉS**

Guadeloupe – Martinique – Chlordécone – Contamination
– Sols – Racines – Tubercules – Lessivage - Culture banna-
nière

**OBJECTIFS**

Donner des éléments de diagnostic scientifique pour la gestion d'une crise de pollution des sols, des eaux et des végétaux aux Antilles françaises par un pesticide organochloré persistant (POP), la chlordécone (C₁₀Cl₁₀O). Cette molécule a été appliquée entre 1972 et 1993 pour lutter contre le charançon *Cosmopolites sordidus*, dont la larve attaque les bulbes des bananiers. Interdite aux USA dès 1976, son devenir n'a pas fait l'objet de recherches dans ce pays depuis les années 80. Malgré des alertes précoces sur son accumulation dans les sols et sa capacité à contaminer les eaux¹ et les biontes², l'application de cette molécule a été autorisée entre 1982 et 1990 en France, uniquement sur les bananeraies (dérogation prolongée jusqu'en 1993). Aucune recherche n'a accompagné cette décision. Les données scientifiques concernant cette molécule sont donc rares et anciennes. Sa composition chimique laissait présumer :

- Une stabilité thermodynamique élevée, et une résistance à la dégradation chimique ou biologique : photodégradation aux UV seulement après mobilisation par l'éthylène-diamine, biodégradation minime par des *Pseudomonas* sp. conduisant à une hydrogénation de 2 sur 10 des atomes de chlore, en milieu de culture³.
- Une hydrophobie particulièrement élevée, entraînant une faible solubilité et une forte sorption sur la matière organique des sols : le coefficient de partage (Koc) entre la fraction adsorbée sur le carbone du sol et la fraction en solution dans l'eau serait de 17 500 L/kg⁽⁴⁾.

**DATES REPÈRES DE LA CRISE**

- Détection de multiples pollutions par la chlordécone des eaux captées aux Antilles (1998, DSDS).
- Détection de la contamination d'un lot de patates douces exportées de Martinique à Dunkerque (2002, Douanes).
- Principe de précaution : arrêtés préfectoraux en Guadeloupe et Martinique (2003) conditionnant la production des « légumes-racines » à une analyse de sol, et, si conta-

1-Snegaroff J., 1977. Les résidus d'insecticides organochlorés dans les sols et les rivières de la région bananière de Guadeloupe. *Phytiatrie-Phytopharmacie*, 26: 251-268.

2-Kermarrec A. et al, 1980. Niveau actuel de contamination des chaînes biologiques en Guadeloupe : pesticides et métaux lourds. INRA Antilles-Guyane, rapport de contrat avec le Ministère de l'Ecologie, 155p.

mination, leur commercialisation à une analyse de récolte négative.

• Production par l'AFSSA (2005) de Limites Maximales provisoires : 50 µg/kg PF pour les « racines » igname, taro, patate douce.



LE PROJET

L'INRA et le CIRAD-FIhor ont mis en œuvre en 2003 un projet de diagnostic sur les deux îles (3 ETP chercheurs, 2 VCAT, co-financé par le programme « Pesticides » du MEDAD), pour apporter des réponses claires à des questions clés :

- La chlordécone se dégrade-t-elle dans les sols tropicaux volcaniques ?
- La chlordécone s'est-elle fortement stockée dans les sols en fonction des systèmes de culture, passés et actuels ?
- Quelles sont les zones polluées ?
- Quelle est l'incidence de la pollution des sols sur la contamination des racines ?
- Quelles sont les voies de décontamination des sols, et combien de temps cela prendra-t-il ?
- Peut-on envisager une bio-remédiation ?



PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Les sols ont été analysés sur une sélection d'un réseau de parcelles de cultures bananières en andosols, dont le choix avait été antérieurement commandé par la diversité des systèmes de culture bananiers (Clermont-Dauphin *et al.*, 2004) : depuis les bananeraies renouvelées tous les trois ans après de profonds travaux du sol, recevant des quantités massives d'engrais et de pesticides, jusqu'à des bananeraies dites pérennes, dont on laisse les rejets se relayer depuis plusieurs décennies, et parfois sans intrant. Sur les couches 0-30 cm, 30-50 cm, et parfois 50-80 cm ont été déterminés les densités apparentes, le pH, les teneurs en carbone (SOC) et en chlordécone. Des prélèvements de 6 échantillons par couche ont été réalisés sur deux positions topographiques de chaque parcelle : haut convexe et bas concave, respectivement zone de départ et d'accumulation de terre en situation éventuelle d'érosion hydrique ou mécanique superficielles. Quelques parcelles supplémentaires déjà analysées par les Services de la Protection des Végétaux de Guadeloupe et Martinique, sur des sols différents, ont fait l'objet d'analyses et d'enquêtes complémentaires.

La sélection a été orientée par la fiabilité et la diversité des chroniques rétrospectives d'apport de chlordécone et plus généralement d'itinéraires techniques pratiqués pendant et après la période d'apport. Pour 50 parcelles, ont été établis :

- les calendriers de successions d'occupation des sols par la végétation naturelle ou spontanée et les cultures,
- pour ces dernières les rythmes et profondeurs de travail du sol,

- les dates et doses d'apport de la chlordécone dans les phases de bananeraies, de densité de plantation connue.

Dès l'instant qu'une régression multiple expliquait plus de 90 % de la variabilité des teneurs résiduelles par trois facteurs - teneur en carbone des sols, profondeur des labours, et quantités de chlordécone cumulées épandues (sans prendre en compte le temps) - un modèle simple de simulation du lessivage de la chlordécone dans les sols a été développé. Il prend en compte la stabilité de la molécule (pas de biodégradation), sa très forte affinité pour la matière organique des sols, la dilution mécanique plus ou moins forte du carbone et de la chlordécone par le travail du sol, et son lent lessivage par les eaux de drainage, selon une cinétique de premier ordre. Les eaux de drainage sont concentrées les 3 à 5 premières années sous les pieds de bananiers, près desquels la molécule avait été apportée.

Dans la collection de parcelles retenues, certaines étaient en culture de « racines », sur lesquelles un échantillonnage soigneux des tubercules et racines et du sol contaminé au contact a permis d'explorer la relation entre la contamination des « racines » et celle des plantes. Sur deux de ces parcelles enfin, ont été menés des essais de culture de « racines » sur couches profondes peu contaminées, après excavation locale des couches contaminées (cultures en crêneaux). Les analyses de chlordécone ont toutes été effectuées au Laboratoire Départemental d'Analyses de la Drôme (LDA26).

Il y a très peu de contamination interparcellaire, ou de transferts superficiels intra-parcellaires : la chlordécone reste où on l'a épandue. Les parcelles n'ayant jamais reçu de chlordécone n'en contiennent pas, sauf quelques traces mesurables sur quelques dizaines de mètres dans les talwegs collecteurs du ruissellement de parcelles d'amont contaminées. Le ruissellement, rapide et fugace malgré une pluviométrie élevée, ne contient pas de quantités notables de chlordécone. Les transferts ne sont significatifs que si le ruissellement concentré transporte des agrégats. Les seuls transferts intra-parcellaires notés sont liés à l'érosion mécanique sèche. Les seules contaminations amont→aval en solution, faibles, sont associées à des zones d'émergence de nappes (arrières-mangroves, terrasses).

Le modèle de lessivage a été validé pour les andosols. La comparaison des teneurs en chlordécone calculées par le modèle et des teneurs mesurées dans les 30 premiers centimètres de sol (Figure 1) est remarquable pour les andosols des bananeraies pérennes, où l'essentiel de la chlordécone est contenu dans le premier décimètre, la couche 0-30 cm contenant la totalité détectable. Elle est encore très bonne, dans l'intervalle d'incertitude de profondeur de labour, pour des parcelles en bananeraie ou autres occupations, travaillées

au moins une fois. Les teneurs mesurées dans les eaux, sur lysimètres, sont conformes aux teneurs calculées. Le modèle reste valide pour les sols contenant des argiles vraies (phyllosilicates) à condition de leur attribuer des coefficients de partage sol/solution plus faibles. Ces derniers sont confirmés par des concentrations plus élevées dans les eaux de drainage, à mêmes concentrations dans les sols. Si les coefficients de partage sols/solutions différents selon les matrices restent à expliquer, la validité de ce modèle de lessivage tend indirectement à montrer que nul **phénomène de dégradation, en particulier biodégradation** n'a eu lieu depuis les épandages de la chlordécone, après 10 à 30 ans.

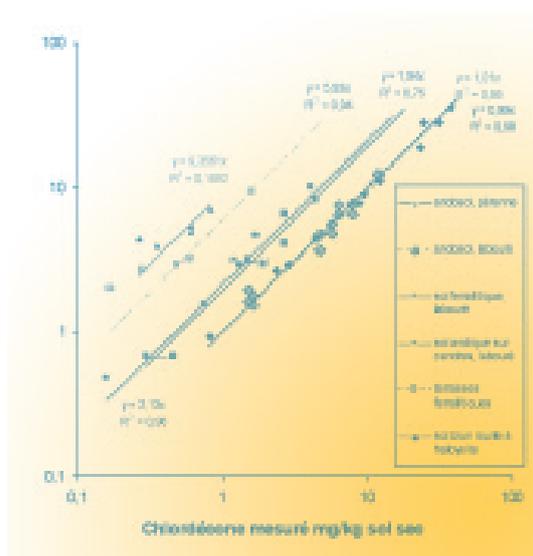


Figure 1. Comparaison des teneurs en chlordécone calculées par le modèle d'éluion de premier ordre et des teneurs mesurées sur la couche 0-30 cm de sols contaminés de Guadeloupe et Martinique ($K_{oc} = 17500 \text{ L kg}^{-1}$).

La validité du modèle a permis son extrapolation temporelle, qui montre que la contamination des sols est très durable (entre 1 et 7 siècles selon les types de sols et les apports passés sur les zones contaminées).

La contamination des racines et tubercules est proportionnelle à celle des sols. Elle se fait essentiellement par contact. Les cortex sont ainsi au moins 10 fois plus contaminés que les pulpes. Cette contamination est majorée par une force de puits équivalente de la matière sèche des racines et du sol encaissant. Aucune des plantes testées n'a montré une bio-accumulation, nous n'avons pour l'instant pas de piste de phyto-remédiation concernant cette molécule non polaire, très hydrophobe.

Les décapages de couches de sols contami-

nées sont irréalistes. A titre d'exemple, les labours ont incorporé en général la chlordécone à une profondeur telle qu'il faudrait décaper puis stocker (où ?) 25 millions de mètres de cube de terre à la Martinique, sans évoquer les risques d'infertilité et d'érodibilité des sols ainsi tronqués. Les cultures en créneaux sont techniquement possibles, mais les surfaces candidates combinant des possibilités de mécanisation et des contaminations superficielles sont très rares.

ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Compte tenu de la crise environnementale que provoque la pollution des sols, des eaux et des « racines » par la chlordécone aux Antilles, les résultats ont été communiqués en temps réel :

- Aux groupes d'acteurs concernés par les conséquences des applications de produits phyto-sanitaires, GREPP en Guadeloupe et GREPHY en Martinique, animés par les services extérieurs de l'Etat (DAF, DIREN, DSDS, DGCCRF).

- A la mission interministérielle chargée de l'évaluation et du renforcement des actions engagées.

- A la mission d'information parlementaire chargée d'analyser la crise et d'évaluer les moyens déployés pour en sortir.

Devant le désarroi des services de l'État face à la crise de la pollution par la chlordécone, les cinq Ministres en charge de l'agriculture, de l'écologie, de l'outre-mer, de la répression des fraudes et de la santé ont commandé en avril 2005 à l'AFSSA, à l'INRA et au CIRAD, un diagnostic de la pollution et une approche prospective de gestion de crise. L'INRA a désigné le coordinateur de ce projet pour le représenter dans ce « Groupe d'Étude et de Prospective » (GEP³), qui a remis son rapport en mai 2006. Après accord des Ministères sur une version publiable, le rapport du GEP a été mis en ligne sur le site web du Cirad en octobre 2006. Les principales contributions opérationnelles en aval de ce projet ont été :

- La conviction des autorités que la pollution était installée dans le long terme, et qu'il fallait prendre des décisions courageuses et cohérentes dans le continuum agriculture – environnement – santé.

- La circonscription des risques de contamination (cartographie rétrospective des soles bananières entre 1969 et 1993)

- La proposition d'un outil de gestion fondé sur le plafonnement des relations de contamination sol \Rightarrow plante : définition d'un seuil de contamination des sols en deçà duquel les « racines » ne seront pas contaminées au-delà des Limites Maximales de Résidus définies par l'AFSSA (et l'UE).

VALORISATION

Articles scientifiques

Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.-M. & Meynard J.-M., 2004. Effects of intensive mono-cropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French West Indies. *Soil Use and Management*, 20: 105-113.

Cattan P., Cabidoche Y.-M., Lacas J.-G. & Voltz M., 2006. Occurrence of runoff on high infiltrability andosol under two banana cropping systems. *Soil Tillage Research*, 86: 38-51.

Cattan P., Voltz M., Cabidoche Y.-M., Lacas J.-G. & Sansoulet J., 2007. Spatial and temporal variations in percolation fluxes in a tropical Andosol influenced by banana cropping patterns. *Journal of Hydrology*, 335: 157-169.

Sansoulet J., Cabidoche Y.-M. & Cattan P., 2007. Adsorption and transport of nitrate and potassium in an Andosol under banana (Guadeloupe, French West Indies). *European Journal of Soil Science*, 58: 478-489.

Publications de transfert

Lesueur Jannoyer M., Cabidoche Y.-M. & Vannière H., 2007. Synthèse sur la pollution par les organochlorés aux Antilles. Aspects agronomiques. Conclusions du Groupe d'Étude et de Prospective (GEP). *Phytoma*, 606 : 29-31.

Communications dans des congrès

Sansoulet J., Cabidoche Y.-M., Cattan P., Clermont Dauphin C., Desfontaines L. & Malaval C., 2004. Solute transfert in an andisol of the French West Indies after application of KNO₃ : from the aggregate to the field experiment. "Volcanic Soil Resources in Europe", COST Action 622 final meeting, June 4-8 2004, Reykjavik, Iceland (poster). *Rala Report*. 214: 111-112 (résumé).

Cabidoche Y.-M., Achard R., Caron A., Cattan P., Chabrier C., Clermont-Dauphin C. & Laffont A., 2005. Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture. In Actes du Colloque du Programme Évaluation et réduction des Risques Associés à l'Utilisation des Pesticides, Pesticides – *Comment réduire les risques associés*, Avignon, 14-16 novembre 2005. Poster + Résumé étendu. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Paris, 5 p.

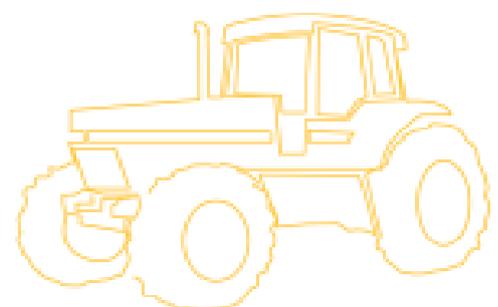
Cabidoche Y.-M., Lehmann S., Martin M. & Tillieut O., 2006. Spatialisation du risque de contamination des sols par un pesticide organochloré rémanent autrefois appliqué sur des sols tropicaux volcaniques : la chlordécone aux Antilles françaises. Journée GISsol, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Paris, 20 novembre 2006. (Conférence Invitée, Diaporama).

Rapports d'expertise

Cabidoche Y.-M., Jannoyer M. & Vannière H., 2006. Conclusions du Groupe d'Étude et de Prospective « Pollution par les organochlorés aux Antilles ». Aspects agronomiques. Contributions CIRAD - INRA remises aux Ministères en charge de l'Agriculture, de l'Écologie, de l'Économie, de la Santé, et de l'Outre-mer, 55p. + annexes. Disponible sur Internet à l'adresse : www.cirad.fr/fr/prest_produit/pdf/pollution_par_les_organochlores_aux_Antilles-juin2006.pdf

Communication grand public

35 conférences, 14 interviews (presse écrite et audiovisuelle, locale et nationale).



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

Yves COQUET,
BP 01
78850 Thiverval-Grignon
01 30 81 52 04
yves.coquet@agroparistech.fr

PARTENAIRES

UMR 1091 INRA/AGROPARISTECH
Environnement et Grandes Cultures,
Grignon

E. Vaudour, P. Benoit, V. Bergheaud,
P. Garnier, C. Labat, P. Vachier,
J.M. Gilliot, J. Michelin, L. Alletto,
J. Moeys, M. Delmas, B. Cheviron,
L. Berthier, G. Le Bail, J.C. Pitres,
Z. El Krimy, M. Mel, A. Longuet,
UR 272 INRA Science du Sol, Orléans
I. Cousin, B. Nicoullaud, A. Dorigny,
A. Bobachev, O. Duval, D. King
UMR 5564 CNRS/INPG/IRD/UJF LTHE,
Grenoble

R. Angulo-Jaramillo, I. Mubarak,
D. Fernandez

CHAMBRE D'AGRICULTURE D'EURE ET
LOIR, Chartres

B. Ailliot, S. Sallé

CARACTÉRISATION DU RISQUE DE CONTAMINATION DE LA NAPPE DE BEAUCE PAR LES PESTICIDES : ÉLUCIDATION DES MÉCANISMES DU TRANSPORT PRÉFÉRENTIEL ET APPROCHE SPATIALE DU RISQUE À L'ÉCHELLE DU BASSIN HYDROLOGIQUE (ESHEL)

MOTS CLÉS

Sols - Couverture pédologique - Herbicide - Isoproturon -
Transport préférentiel - Eau mobile/eau immobile -
Dégradation - Variabilité spatiale - Spatialisation -
Carbone organique - Sorption

OBJECTIF

Le projet de recherches ESHEL a pour objectif principal de comprendre les raisons de la contamination diffuse de la nappe de Beauce par les pesticides d'origine agricole. Cet objectif implique de bien caractériser les mécanismes de dissipation⁶ des pesticides dans les sols de Beauce, d'une part, et d'être en mesure de représenter la variabilité spatiale de ces processus de dissipation en relation avec l'organisation spatiale des sols, d'autre part.

D'un point de vue appliqué, le projet vise à mettre au point une méthode permettant de prévoir spatialement le risque de contamination à l'échelle d'un bassin hydrologique, le bassin de Ouarville (2 500 ha).

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Les recherches sont menées selon deux axes :

- L'étude détaillée des mécanismes de dissipation d'un pesticide-référence présent dans la nappe de Beauce, l'isoproturon.
- L'analyse de l'hétérogénéité spatiale de la couverture pédologique à deux échelles : échelle parcellaire (25 ha) et échelle du bassin hydrologique (2 500 ha).

Pour chacun de ces deux axes, deux étapes se succèdent :

- L'acquisition de données sur la dissipation de l'isoproturon ou sur l'organisation spatiale des sols
- La modélisation des processus de dissipation de l'isoproturon ou celle de la répartition spatiale des sols.

Les résultats finalisés sont un ensemble de recommandations pour la représentation spatiale de la dissipation des pesticides dans le sol aux deux échelles, parcelle et bassin hydrologique, adaptée au contexte de la Beauce.

⁶On entend par « mécanismes de dissipation » l'ensemble des processus susceptibles de faire varier la concentration en pesticide dans le sol (volatilisation, adsorption, dégradation, transfert, absorption, ...)



MÉCANISMES DE DISSIPATION DE L'ISOPROTURON DANS LES SOLS DE LA BEAUCE

Nous nous sommes attachés à caractériser l'ensemble des processus de dissipation de l'isoproturon dans les sols, aux deux échelles : celle de la parcelle et celle du bassin hydrologique. Les processus de dégradation, de rétention par la phase solide du sol et de transport via la solution du sol ont été étudiés. La volatilisation à partir du sol n'a pas été étudiée car c'est un processus négligeable pour l'isoproturon, compte tenu de sa très faible pression de vapeur saturante.

Un processus de transport préférentiel démontré : la partition « eau mobile/eau immobile »

Des travaux préliminaires sur les transferts de solutés dans les sols limoneux de la Beauce avaient montré que le transport préférentiel par macropores (trous de vers de terre, de racines) n'était pas efficace en raison d'une conductivité hydraulique élevée de la matrice du sol. En revanche, les vitesses de circulation de solutés inertes conservatifs (anion bromure) étaient incompatibles avec un déplacement de l'ensemble de l'eau contenue dans le sol. Les recherches menées dans le cadre du programme ESHÉL ont permis de démontrer l'existence d'un transport de type « eau mobile/eau immobile ». Les sols de Beauce se caractérisent par **une fraction d'eau immobile importante**, de l'ordre de 50 % de la teneur en eau du sol lorsque celui-ci est à un état proche de la saturation. Il s'ensuit une vitesse de déplacement des solutés plus importante que si l'ensemble de l'eau contenue dans le sol participait au transport. Cette fraction d'eau immobile est variable dans l'espace, avec des caractéristiques similaires quelle que soit l'échelle (Tableau 1).

Tableau 1. Variabilité spatiale des principaux facteurs de dissipation de l'isoproturon aux deux échelles d'étude (parcelle agricole, bassin hydrologique de Ouarville).

		Conductivité hydraulique au potentiel -1 cm	Fraction d'eau immobile	Coefficient d'adsorption	Durée de demi-vie
		mm/h	%	L/kg	j
Échelle parcellaire	Moyenne	72	53	1,1	11
	Coefficient de variation (%)	85	61	10	10
Échelle bassin hydrologique	Moyenne	71	54	1,1	12
	Coefficient de variation (%)	95	47	23	91

Il s'agit, à notre connaissance, de la première étude de ce type de phénomène menée à l'échelle d'un bassin hydrologique. Nos résultats montrent qu'il s'agit d'un phénomène important à prendre en compte dans la prévision du devenir des pesticides dans les sols.

La dégradation de l'isoproturon est très sensible à l'état hydrique du sol

La dégradation des pesticides par les micro-organismes est une des voies majeures de leur dissipation dans les sols. La dynamique de la dégradation des pesticides dans les sols est généralement décrite par une cinétique d'ordre 1, caractérisée par la durée de demi-vie du pesticide dans le sol. Cette durée de demi-vie est le plus souvent mesurée au laboratoire, dans des conditions standard idéales pour l'activité microbienne (température de 20°C, teneur en eau à 90 % de la capacité au champ). Or, ces conditions ne sont pas représentatives de celles rencontrées sur le terrain, où la teneur en eau et la température du sol varient fortement au cours du temps, particulièrement en surface.

Nos résultats montrent que la durée de demi-vie (ou persistance) de l'isoproturon, proche de 10 j dans les sols de Beauce, peut être multipliée par 15, lorsque l'on passe de 90 à 50 % de la teneur en eau à la capacité au champ, conditions couramment rencontrées en surface du sol. Pour obtenir une estimation réaliste de la dissipation des pesticides dans les sols, il est donc indispensable de prendre en compte la dépendance de la dégradation vis-à-vis des conditions du sol, elles-mêmes dépendantes du climat. Ceci implique le recours à des modèles de dissipation.

Prévision du risque de contamination de la nappe de Beauce par l'isoproturon : importance de la prise en compte du transport préférentiel dans les modèles

La complexité des processus intervenant dans la dissipation des pesticides et leur caractère couplé implique l'utilisation de modèles numériques permettant la prévision de leur devenir dans les sols et des risques environnementaux qui lui sont liés. De fait, divers modèles sont utilisés à cette fin, en particulier

dans le cadre de l'homologation. Toutefois, aucun de ces modèles ne prend en compte le transport préférentiel de type « eau mobile/eau immobile » (MIM). Cette situation s'explique par une difficulté conceptuelle, liée à son application aux états hydriques transitoires, caractéristiques des sols en place soumis aux aléas climatiques. Dans le cadre du projet ESHEL, nous avons évalué une version récente du modèle de transport des solutés dans les sols HYDRUS-1D, qui prend en compte le transport préférentiel de type MIM en conditions transitoires.

L'analyse de sensibilité du modèle HYDRUS-1D, réalisée à partir de l'ensemble des paramètres de dissipation recueillis dans le cadre de cette étude, a montré une sensibilité importante des concentrations simulées aux valeurs des paramètres MIM.

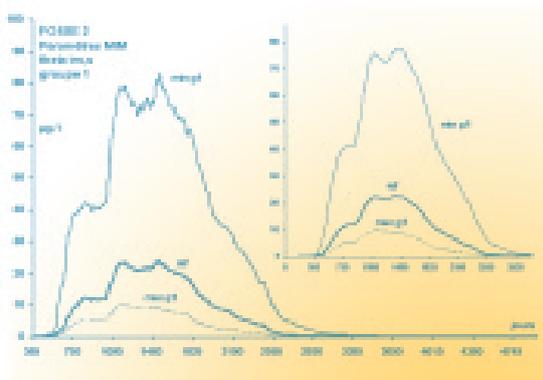


Figure 1. Simulation de la concentration en isoproturon dans la solution du sol à 1 m de profondeur.

La ligne grasse représente le scénario de base utilisant les valeurs mesurées localement. Les lignes min et max correspondent à des variations de - et + 80 % de la valeur de la teneur en eau immobile à saturation (en moyenne glissante annuelle dans l'encadré).

Les résultats des simulations indiquent la présence d'isoproturon dans la solution du sol à la profondeur d'1 m à des concentrations maximales de l'ordre de 20 µg/L, ce qui est en accord avec les concentrations effectivement mesurées *in situ* lors du suivi de la dissipation de l'isoproturon à l'échelle de la parcelle.

Les résultats de cette étude montrent l'importance du transport préférentiel de type MIM dans les sols de Beauce. Négliger ce processus revient à sous-estimer de manière significative le risque de transport de l'isoproturon vers les eaux souterraines et pourrait expliquer les contaminations diffuses de la nappe de Beauce observées pour ce pesticide.

VARIABILITÉ SPATIALE DES PROCESSUS DE DISSIPATION EN RELATION AVEC L'ORGANISATION SPATIALE DES SOLS

Afin de pouvoir réaliser une caractérisation et une gestion spatiale du risque de contamination des eaux par les pesticides, il est nécessaire d'appréhender correctement la variabilité spatiale des processus qui déterminent ce risque. Deux échelles spatiales ont été abordées dans le cadre du projet ESHEL : l'échelle de la parcelle agricole (25 ha) et l'échelle du bassin hydrologique (2 500 ha). A ces deux échelles, la variabilité spatiale des paramètres de dissipation de l'isoproturon a été quantifiée (Tableau 1) et sa relation à l'organisation spatiale des sols étudiée.

La Beauce, une organisation spatiale des sols plus complexe qu'il n'y paraît

Contrairement à ce que laisse supposer le paysage homogène d'openfields de la Beauce, les sols de cette région présentent une organisation spatiale complexe, avec des variations importantes de profondeur et de nature sur des distances de quelques mètres. Cette organisation est le résultat de l'histoire géologique de la région. L'horizon de surface des sols présente un caractère assez homogène en raison du recouvrement des substrats géologiques par un dépôt uniforme de limons au Quaternaire. En revanche, les horizons de subsurface présentent une forte hétérogénéité spatiale, avec des transitions rapides entre limons profonds, calcaires altérés, poches de cryoturbation et argiles de décarbonatation. L'utilisation de techniques géophysiques (prospection en résistivité électrique) à l'échelle de la parcelle (1/6 500) a permis une représentation cartographique fine de l'hétérogénéité intraparcélaire de la couverture pédologique. Toutefois, l'analyse d'une carte pédologique réalisée à l'échelle du bassin hydrologique (1/25 000) a révélé une situation d'impossibilité cartographique : aucune clé de représentation cartographique des types de sol n'a pu être trouvée à cette échelle ; les variations spatiales du sol ont lieu à une échelle locale qui ne peut pas être représentée à l'échelle des 2500 ha du bassin hydrologique et aucun critère cartographique discriminant n'émerge à cette échelle.

Une relation peu marquée entre paramètres de dissipation et caractéristiques des sols

La variabilité spatiale des paramètres de dissipation de l'isoproturon dans l'horizon de surface des sols présente des caractéristiques très similaires entre les deux échelles (parcelle et bassin hydrologique, Tableau 1). Ce résultat surprenant est toutefois cohérent avec

l'absence d'émergence d'une structure spatiale des sols à l'échelle du bassin hydrologique autre que celle observée à l'échelle locale. Cette variabilité spatiale des paramètres de dissipation n'a pas pu être reliée à celle des caractéristiques de constitution des sols (texture, masse volumique apparente, charge en cailloux, teneur en carbonates, ...), hormis la relation classique entre coefficient d'adsorption et teneur en matière organique du sol. Ce résultat s'explique vraisemblablement par le caractère peu contrasté des horizons de surface des sols dans la zone d'étude (couverture limoneuse homogène).

Nous avons étudié la possibilité d'utiliser des images satellitales de réflectance des sols à des fins de cartographie des paramètres de dissipation de l'isoproturon dans les sols. Les résultats montrent là encore qu'il est difficile d'appréhender la variabilité spatiale des sols à l'aide d'images de télédétection, principalement en raison de la relative homogénéité de l'horizon de surface. Toutefois, nous avons pu montrer que les images satellitales de réflectance visible/proche infrarouge permettaient une cartographie précise des teneurs en matière organique des sols, qui jouent un rôle important dans la rétention des pesticides par la phase solide du sol (adsorption).

Figure 2. Prédiction de la teneur en carbone organique de l'horizon de surface des sols du bassin hydrologique de Ouarville (28) à l'aide d'une image de télédétection Spot5.

Stratégie pour la spatialisation du risque de contamination de la nappe de Beauce par les pesticides

Les recherches réalisées sur la caractérisation de la variabilité spatiale des sols de Beauce nous permettent de définir une stratégie pour la spatialisation et la gestion des risques de contamination des eaux souterraines en Beauce par les pesticides.

La caractéristique principale de l'organisation spatiale des sols dans le secteur de Beauce étudié est une forte variabilité des horizons

de subsurface et des types de sols à l'échelle locale (à quelques mètres de distance). La représentation cartographique de cette variabilité n'est possible qu'à grande échelle (supérieure à 1/10 000), c'est-à-dire à l'échelle de la parcelle, et au prix d'un investissement important en prospections pédologique et géophysique. Une telle stratégie est envisageable à l'échelle parcellaire, mais pas à une échelle plus petite (i.e., échelle du bassin hydrologique ou échelle régionale). L'information acquise à l'échelle de la parcelle sur l'organisation spatiale des sols pourrait être utilisée pour moduler les intrants phytosanitaires dans un contexte d'agriculture de précision. Il faut toutefois avoir conscience du fait que, malgré l'effort considérable de caractérisation de l'organisation des sols que cette stratégie implique, il subsistera une part de variabilité irréductible, qu'il sera nécessaire de prendre en compte dans l'évaluation du risque de perte de pesticides vers les eaux souterraines.

À l'échelle du bassin hydrologique de Ouarville (1/25 000), l'absence de structure spatiale dans l'organisation des sols et dans la variabilité de la plupart des paramètres de dissipation ne permet pas une approche géographique du risque (i.e., réduction des doses pour certaines zones du bassin). Mais elle implique l'utilisation d'une approche stochastique, basée sur les lois de distribution empiriques établies à la fois pour les propriétés de dissipation (Tableau 1) et pour l'organisation spatiale des sols (gamme de profondeur des horizons, fréquence d'occurrence). Dans le cas du bassin de Ouarville, cette stratégie devrait reposer sur l'utilisation stochastique, de type « Monte-Carlo », d'un modèle de dissipation incluant le processus « eau mobile/eau immobile » (du type HYDRUS-1D) et faisant appel aux lois de distribution des paramètres de dissipation établies à l'échelle du bassin. Notons toutefois que le processus d'adsorption pourrait être spatialisé de façon explicite à l'aide d'images satellitales. Cette démarche générique peut être appliquée à tout pesticide.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

L'étude de la dissipation de l'isoproturon dans les sols limoneux de la Beauce nous a permis de mettre en exergue un processus de transport préférentiel encore mal connu : le transport de type « eau mobile/eau immobile ». Si ce type de transport a déjà été mis en évidence pour des sols en régime hydrique permanent, c'est-à-dire en conditions contrôlées, on connaît encore très peu de choses sur son existence en régime hydrique transitoire, qui est pourtant celui du terrain. De toute évidence, nous sommes confrontés à une situation où la recherche fondamentale sur les sols accuse un certain





retard par rapport aux besoins exprimés par l'expertise des risques. La compréhension précise de l'origine et des facteurs contrôlant le transport préférentiel de type MIM (relation avec l'état structural du sol, rôle de l'état hydrique du sol au moment de l'application) pourrait à terme déboucher sur de nouvelles pistes de gestion du risque.

Une gestion fiable des risques de contamination des eaux souterraines passe par une caractérisation fiable des processus de dissipation dans les sols. Cette caractérisation reste coûteuse, alors même que, dans ce projet, nous ne nous sommes intéressés qu'à un unique pesticide. Toutefois, les processus de dissipation dominants varient vraisemblablement avec le profil physicochimique des molécules, ce qui permettrait une approche par typologie de molécules. Cependant, compte tenu de la grande variété de comportements physicochimiques des diverses molécules de pesticides, la tâche reste énorme, mais nécessaire, si l'on veut pouvoir continuer d'utiliser les pesticides tout en diminuant les risques que leur utilisation entraîne pour l'environnement.

PERSPECTIVES DE TRANSFERT

Les résultats du projet ESHEL seront communiqués à deux types de public :

- Les agriculteurs du bassin de Ouarville seront informés, à l'occasion d'une journée organisée à la Chambre d'Agriculture d'Eure-et-Loir, des principaux résultats du projet. Deux axes de communication sont envisagés :
 - un axe « connaissance de la variabilité spatiale des sols » : le message étant que les sols de Beauce présentent une forte variabilité à l'échelle intraparcellaire et à l'échelle du bassin.
 - un axe « stratégies de réduction des risques de pertes en pesticides vers la nappe de Beauce », l'accent étant mis sur l'intérêt d'une démarche de réduction de dose.
- Les instances chargées de l'homologation (AFSSA, DGAL) seront informées des stratégies d'évaluation du risque proposées à l'issue du projet ESHEL. Le message principal portera sur la nécessité et les intérêts d'une approche stochastique des processus et donc probabiliste du risque, dans les cas où une approche par typologie ou par scénarios n'est pas possible.

CONTRIBUTION A LA FORMATION

Thèse de Doctorat

Moeys J., 2007. Variabilité spatiale et déterminismes agro-pédologiques du devenir d'un herbicide dans l'horizon de surface du sol. Application au cas de l'isoproturon sur un secteur agricole de Beauce Chartraine. Thèse de Doctorat d'AgroParisTech, Paris. Soutenance prévue Décembre 2007.

Rapports de stage

Alletto L., 2004. Dissipation des pesticides à l'échelle de la parcelle agricole. Étude des mécanismes d'adsorption, de dégradation et de transport de l'isoproturon sur une parcelle agricole hétérogène de la Beauce. Mémoire de DEA National de Science du Sol, Univ. Nancy I, INAPG, ENSAR, ENSAM.

Millot G., 2004. Caractérisation du transport préférentiel des pesticides dans les sols de Beauce. Étude de la variabilité spatiale de la teneur en eau immobile à l'échelle d'une parcelle cultivée. Stage d'option scientifique, École Polytechnique.

Moeys J., 2004. Variabilité des sols et risques de contamination des aquifères : intérêts d'une prospection géophysique – résistivité et organisation spatiale des sols. Mémoire de DEA National de Science du Sol, Univ. Nancy I, INAPG, ENSAR, ENSAM.

Fernandez D., 2005. Caractérisation hydrodynamique des sols non-saturés par la méthode Beerkan et par modélisation inverse : application à une parcelle expérimentale de Beauce. Mémoire de Master 2 « Mécanique des fluides et transferts », LTHE, INP Grenoble, ENSHMG.

Mubarak I., 2005. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des sols non-saturés et leur variabilité spatiale à l'aide de la méthode Beerkan : application à une parcelle expérimentale de la Beauce. Mémoire de Master 2 « Terre, Univers, Environnement », spécialité « Océan, Atmosphère et Hydrologie », Univ. J. Fourier Grenoble, LTHE.

Le Bail G., 2006. Classifications ISODATA d'images SPOT en vue de l'étude de l'évolution des surfaces des sols du bassin versant de la commune de Ouarville. Mémoire de Master 2 Mention Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Spécialité Environnements Continentaux, Hydrosociétés, Parcours Télétection Appliquée aux Problèmes d'Environnement, Université P. & M. Curie Paris 6.

Pitres J.C., 2006. Étude des propriétés de surface des sols de Beauce Chartraine par spectroradiométrie visible - proche infrarouge. Mémoire de Master 2 Sciences et Technologies du Vivant, Mention « Sciences Agronomiques, de l'Environnement et du Paysage », Univ. P. & M. Curie Paris 6/AgroParisTech.

El Krimy Z., 2006. Évaluation de la teneur en eau immobile dans les sols insaturés. Mémoire de Master 1 « Physique et applications », Physique Générale, Univ. P. & M. Curie Paris 6.

Mel M., 2006. Évaluation de la teneur en eau immobile dans les sols insaturés. Mémoire de Master 1 « Physique et applications », Physique Générale, Univ. P. & M. Curie Paris 6.

Berthier L., 2007. Prédiction spatiale des teneurs en carbone organique des sols par télédétection visible-proche infrarouge, à l'échelon du bassin versant. Mémoire de DAA "Sol et aménagement rural", ENSAR.

Cheviron B., 2007. Analyse de sensibilité du modèle HYDRUS. Simulation du devenir des pesticides dans le sol. Étude de la partition MIM eau mobile/immobile. Stage postdoctoral, UMR INRA/AgroParisTech EGC.

Delmas M., 2007. Évaluation d'une carte pédologique à moyenne échelle. Mémoire de Master 2 Sciences et Technologies du Vivant, Mention « Sciences Agronomiques, de l'Environnement et du Paysage », Univ. P. & M. Curie Paris 6/AgroParisTech.

Longuet A., 2007. Mise au point d'un protocole de mesures spectroscopiques de sols en laboratoire. Mémoire de Master 1 « Physique et applications », Spécialité « Physique fondamentale », Université P. & M. Curie Paris 6.

VALORISATION

Articles scientifiques

Coquet Y., Vachier P. & Labat C., 2005. Vertical variation of near-saturated hydraulic conductivity in three soil profiles., *Geoderma*, 126: 181-191

Coquet Y., Milliot G., Alletto L., Labat C. & Vachier P., 2005. Variabilité spatiale de la fraction d'eau immobile dans les sols à l'échelle d'une parcelle cultivée. *Milieux Poreux et Transferts Hydriques (Bulletin du GFHN)*, 50: 32-38.

Alletto L., Coquet Y., Benoit P. & Bergheaud V., 2006. Effects of temperature and water content on degradation of isoproturon in three soil profiles. *Chemosphere*, 64: 1053-1061.

Alletto L., Coquet Y., Vachier P. & Labat C., 2006. Hydraulic conductivity, immobile water content and exchange coefficient in three soil profiles. *Soil Science Society of America Journal*, 70:1272-1280.

Moeys J., Nicoullaud B., Dorigny A., Coquet Y. & Cousin I., 2007. Cartographie des sols à grande échelle : intégration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique. *Étude et Gestion des Sols*, 13: 269-286.

Vaudour E., Moeys J., Gilliot J.M. & Coquet Y., 2007. Spatial retrieval of soil reflectance from SPOT multispectral data using the empirical line method. *International Journal of Remote Sensing* (accepté).

Berthier L., Vaudour E. & Pitres J.C., 2007. Prédiction spatiale des teneurs en carbone organique des sols par télédétection visible-proche infrarouge, à l'échelon du bassin versant. *Étude et Gestion des Sols* (soumis).

Mubarak I., Angulo-Jaramillo R., Coquet Y., Lassabatère L. & Antonino A., 2007. Effective topo-textural soil hydraulic characteristics using Beerkan method on a cultivated soil. *Vadose Zone Journal* (soumis).

Communications dans des congrès

Alletto L., Coquet Y., Benoit P. & Bergheaud V., 2004. Propriétés d'adsorption et de dégradation vis-à-vis de l'isoproturon des horizons de surface et de subsurface d'une parcelle agricole hétérogène de la Beauce. *Actes des 8es Journées Nationales de l'Étude des Sols 2004*, Bordeaux, 26-28 octobre 2004, pp. 63-64.

Moeys J., Nicoullaud B., Dorigny A., Coquet Y. & Cousin I., 2004. Cartographie des sols d'une parcelle de Beauce : Apports et limites de la résistivité électrique. *Actes des 8èmes Journées Nationales de l'Étude des Sols 2004*, Bordeaux, 26-28 octobre 2004., pp. 167-168.

Coquet Y., Millot G., Alletto L., Labat C. & Vachier P., 2004. Variabilité spatiale de la fraction d'eau immobile dans les sols à l'échelle d'une parcelle cultivée. *29èmes journées du Groupe Francophone d'Humidimétrie et des Transferts en Milieux Poreux GFHN*, 24-25 novembre 2004, Grenoble, p. 16.

Alletto L., Coquet Y., Vachier P. & Labat C., 2005. Preferential flow in surface and subsurface soils in the recharge area of a groundwater aquifer. *Third International Conference on Water Resources Management 2005*, 11-13 April 2005, Algarve, Portugal.

Moeys J., Coquet Y., Hadjar D., Gilliot J.M. & Charnay M.P., 2005. Spatial estimation of pesticide fate in soils at the local catchment scale: can one rely on Koc and DT50 databases? *ModelCARE 2005 – From uncertainty to decision making, 5th international conference on calibration and reliability in groundwater modelling*, 6-9 June 2005, The Hague, The Netherlands.

Alletto L., Coquet Y., Benoit P. & Bergheaud V., 2006. Temperature and water content effects on degradation of isoproturon in surface and subsurface soils. *Pesticide Behaviour in Soils, Water and Air*, 27-29 March 2006, University of Warwick, UK.

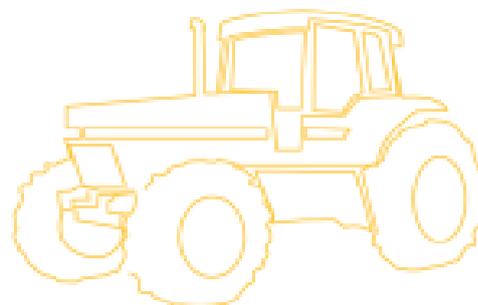
Coquet Y., Alletto L. & Vachier P., 2006. Variations of immobile water content and first-order mass exchange coefficient in three soil profiles. *European Geophysical Union General Assembly 2006*, Vienna, Austria, 2-7 April 2006, *Geophysical Research Abstracts*, 8: 1381.

Coquet Y., Hadjar D., Gilliot J.M., Charnay M.P. & Moeys J., 2006. Spatial estimation of pesticide fate in soils at the catchment scale : can one rely on Koc and DT50 databases ? *Pesticide Behaviour in Soils, Water and Air*, 27-29 March 2006, University of Warwick, UK.

Cousin I., Nicoullaud B., Lefebvre M.P., Dorigny A., Moeys J., Pasquier C., Courtemanche P., Giot G., Bobachev A. & Coquet Y., 2007. Apport de la résistivité électrique pour l'estimation spatialisée du drainage à l'échelle parcellaire. *9èmes Journées Nationales d'Étude des Sols*, Angers, 3-5 avril 2007.

Coquet Y., El Krimy Z., Mel M., Vachier P. & Labat C., 2007. Caractérisation de la fraction d'eau mobile dans un sol de Beauce. *9èmes Journées Nationales d'Étude des Sols*, Angers, 3-5 avril 2007.

Garnier P., Fabra Aguilera F., Bergheaud V. & Coquet Y., 2007. Influence of soil water potential on isoproturon dynamic in laboratory. *13th Symposium "Pesticide Chemistry - Environmental fate and ecological effects of pesticides"*, Del Re A.A.M., Capri E., Fragoulis G. & Trevisan M. (eds.), 3-6 September 2007, Piacenza, Italy, pp. 134-141.



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Abdelwahid MELLOUKI**

ICARE-CNRS (Orléans)

1C, Avenue de la Recherche Scientifique

45071 Orléans cedex 02

02 38 25 76 12

mellouki@cnrs-orleans.fr

PARTENAIRES**ICARE-CNRS, Orléans**

A. Le Person, V. Daële, G. Le Bras

LIG'AIR, Orléans

A. Yahyaoui, O. Petrique, C. Robin, P. Colin

MICROPOLLUANTS TECHNOLOGIE SA

A. Hachimi, S. Peter, P.E. Lafargue

PESTICIDES DANS L'ATMOSPHÈRE : ÉTUDES DES CINÉTIQUES ET MÉCANISMES DE DÉGRADATION EN LABORATOIRE ET MESURES DANS L'ATMOSPHÈRE (PACT)

**MOTS CLÉS**

Pesticides - Mesures dans l'air ambiant - Dégradation atmosphérique

**OBJECTIFS**

Le projet PACT avait pour objectifs :

- De construire une base de données décrivant le comportement atmosphérique (annuel et journalier) en atmosphère urbaine et rurale d'une trentaine de substances actives en région Centre,
- D'étudier les processus de dégradation atmosphérique de certains pesticides.

**PRÉSENTATION DES TRAVAUX**

Dans l'atmosphère, les pesticides sont distribués entre les phases gazeuse, aqueuse et particulaire. Cette distribution dépend fortement des paramètres physico-chimiques des composés ainsi que des conditions météorologiques. Les pesticides sont éliminés de l'atmosphère par dépôts sec et/ou humide et par réactions chimiques. En phase gazeuse les pesticides sont éliminés par réactions avec des oxydants atmosphériques et par photolyse par le rayonnement solaire. Alors que plusieurs études ont été menées sur la dégradation des pesticides dans le sol et l'eau, il n'existe que peu de données sur leur dégradation en phase gazeuse. D'autre part, peu de données sont disponibles sur le suivi des concentrations journalières ou mensuelles des pesticides dans l'air. Or, la connaissance de leurs concentrations dans l'air ambiant ainsi que des données cinétiques et mécanistiques de dégradation sont nécessaires pour évaluer les impacts de ces espèces sur l'environnement et la santé de la population exposée.

Au cours de ce travail, nous avons conduit des mesures de terrain pour suivre les profils de concentration d'un certain nombre de pesticides utilisés en Région Centre. Parallèlement, des études ont été réalisées en laboratoire sur le devenir atmosphérique de 4 pesticides et d'une série de composés organiques azotés utilisés comme modèles de pesticides.

Les études de terrain ont été menées par Lig'Air avec l'appui analytique de Micropolluant Technologie SA. Ces études ont été effectuées en deux phases complémentaires. La première phase a consisté à mettre en évidence





la variabilité saisonnière des pesticides sur deux sites de typologies différentes. Elle a été menée parallèlement sur les deux sites de février 2003 à février 2004, à l'aide de prélèvements hebdomadaires. Le site urbain est localisé dans la ville d'Orléans. Le site rural est situé sur la commune de Mareau-aux-Prés au sud-ouest d'Orléans. La deuxième phase avait pour but la mise en évidence des variations diurne/nocturne susceptibles d'être observées sur certaines molécules et mettre ainsi en relief les mécanismes gouvernant ces variations. Cette deuxième phase a été menée uniquement sur le site rural du 6 juin au 4 juillet 2005. Deux prélèvements par jour ont été réalisés, l'un diurne et l'autre nocturne.

Les premiers résultats montrent que les pesticides sont présents aussi bien en atmosphère rurale qu'en atmosphère urbaine. Toutefois, les niveaux les plus importants sont enregistrés en milieu rural. La concentration moyenne annuelle (tous pesticides confondus) est environ 2 fois supérieure en atmosphère rurale par rapport à l'atmosphère urbaine. D'autres différences de comportement ont aussi été observées dans ces deux atmosphères. En effet, certaines molécules telles que l'azoxystrobine (fongicide) ont été observées uniquement en milieu rural alors que d'autres molécules telles que le diuron (herbicide) ont été observées uniquement en atmosphère urbaine. Néanmoins, 44 % des pesticides recherchés ont été détectés parallèlement sur les deux sites.

L'analyse comportementale des pesticides détectés montre la présence d'une variation saisonnière bien distincte en fonction de l'usage de ces molécules (Fig. 1). Les herbicides sont largement présents à partir de l'automne jusqu'au début du printemps.

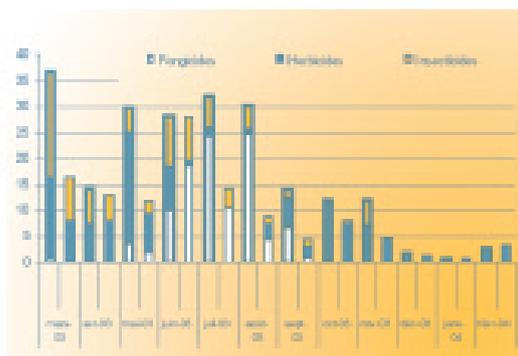


Figure 1. Comportements annuels des pesticides suivant l'usage sur les sites de Mareau-aux-Prés et Orléans (année 2003).

Les fongicides se retrouvent essentiellement durant l'été alors que les insecticides ont tendance à être plus présents dans l'air ambiant durant le printemps et l'été. Les variations an-

nelles ainsi observées montrent qu'elles sont largement gouvernées par les pratiques agricoles.

L'analyse individuelle de chaque molécule détectée montre l'existence d'une variation saisonnière spécifique à chacune des molécules étudiées, comportement qui résulte de la compétition entre les sources et les puits de la substance active. Ainsi, certaines molécules font une brève apparition annuelle, uniquement pendant le mois de leur utilisation, puis disparaissent complètement, montrant ainsi leur faible persistance environnementale. C'est le cas par exemple des composés suivants : propargite, phosmet, tébuconazole, captane, métolachlore. D'autres molécules disparaissent de l'atmosphère uniquement pendant la saison hivernale, c'est le cas par exemple du lindane, de l'oxadiazon et de l'endosulfan. Enfin, certaines molécules telles que la trifluraline sont caractérisées par une forte présence durant toute l'année sauf pendant la période estivale au cours de laquelle leurs concentrations deviennent faibles voire indétectables.

L'étude de la variation journalière de la trifluraline a montré que, pendant les périodes caractérisées par une forte activité photochimique, la présence de cette molécule n'est observée que dans les prélèvements nocturnes. Aucune variation nette journalière de cette molécule n'est observée lors des périodes où la photochimie est moins active. Ceci indique que la trifluraline est susceptible de disparaître par voie photochimique dans le compartiment aérien. Ce résultat est confirmé par les études en chambre de simulation et montre, par conséquent, que la disparition de cette molécule pendant la saison estivale est conditionnée par l'activité photochimique.

Le comportement journalier du chlorothalonil est inverse de celui de la trifluraline. Les concentrations diurnes sont plus importantes que les niveaux nocturnes. L'absence de ce composé a été aussi notée durant les événements pluvieux. La forte humidité nocturne liée à sa solubilité suggère que le dépôt humide de ce composé est l'un des facteurs prédominants dans la détermination de ses variations journalières.

La réactivité des pesticides dans l'atmosphère a fait l'objet d'un nombre très limité d'études. Celles présentées dans ce travail constituent pour la plupart des premières investigations. Elles ont été conduites par l'ICARE (ex LCSR) CNRS d'Orléans. L'utilisation de la grande chambre de simulation atmosphérique européenne EUPHORE (Valencia-Espagne) a permis de conduire de telles études. Ainsi, les déterminations des constantes de vitesse de



réaction ont montré que les pesticides étudiés réagissent rapidement avec les radicaux OH et que ce processus représente un puits potentiellement important dans la troposphère. Leur photolyse par le rayonnement solaire semble être aussi un processus important notamment pour la trifluraline pour laquelle ce processus est le puits atmosphérique dominant.

Des produits gazeux et particulaires ont été détectés dans certaines études, ce qui suggère des mécanismes de dégradation. Ainsi, l'observation du monoxyde de carbone et du phosgène, comme produits de l'oxydation du dichlorvos amorcée par les radicaux OH, a permis de proposer un mécanisme de sa dégradation atmosphérique.

Un mécanisme a également été proposé pour la photolyse de la trifluraline, en se basant sur l'observation de quelques produits en phases gazeuse et particulaire, ainsi que sur les études antérieures en phase condensée. Concernant la diéthylaniline, les quelques produits détectés témoigneraient des voies d'arrachement des atomes d'hydrogène, mais pas de l'addition de OH sur le cycle benzénique, qui est pourtant en principe la voie majoritaire.

(amine, amides, imides). Les données obtenues fournissent des informations sur la réactivité de pesticides azotés de structure moléculaire comparable.

Les résultats des mesures de constantes de vitesse de réaction (réaction avec OH et photolyse) ont permis de déterminer les durées de vie troposphériques des molécules de pesticides étudiées et d'estimer leur persistance dans la troposphère. Les durées de vie typiques des composés étudiés sont de l'ordre de quelques heures. La connaissance de ces durées de vie permet aussi d'avancer des explications partielles sur les variations diurne/nocturne et saisonnières observées pour un certain nombre de pesticides.

En conclusion de ce projet, combinant des mesures de terrain et des études de réactivité, il est clair que les conditions météorologiques jouent un rôle clé aussi bien dans les variations saisonnières que dans les variations journalières. Les profils annuels ainsi observés, peuvent être avancés ou décalés dans le temps suivant les conditions climatiques qui vont conditionner le développement des adventices et les parasites et donc conditionnent indirectement l'utilisation des pesticides. L'approvisionnement du compartiment air en pesticide par re-largage est aussi déterminé par les conditions météorologiques. Ces dernières jouent également un rôle important dans les termes puits des pesticides en un lieu donné (dispersion, dégradation photochimique, dépôts sec et humide, transport...). Cependant, la mise en évidence de la prédominance d'un mécanisme par rapport aux autres, source ou puits, semble être difficile compte tenu du faible nombre d'observations et le manque d'informations sur les pratiques agricoles et les périodes réelles d'utilisation. Cette difficulté est accentuée par la rareté, voire l'inexistence, des études comportementales des pesticides dans l'air ambiant. Il nous manque des outils de compréhension et une maîtrise de tous les facteurs. Néanmoins, des tendances ont pu être mises en évidence. En particulier, celles de quelques molécules telles que la trifluraline et la fenpropidine pourraient refléter la dégradation photochimique qui a été révélée en laboratoire. Ces éléments d'interprétation entre les mesures de terrain et de laboratoire doivent être considérés avec une certaine réserve. L'étude comparative qui a été menée ici n'est qu'une première étape. Elle montre la difficulté et la complexité des systèmes. Elle fait ainsi ressortir la nécessité de poursuivre ce type de campagnes de mesures, tout en connaissant au mieux l'ensemble des paramètres. Elle montre aussi le besoin en études additionnelles de réactivité, au moyen d'outils tels que la chambre EUPHORE, qui s'est révélée être bien adaptée à l'étude de pesticides peu volatils.

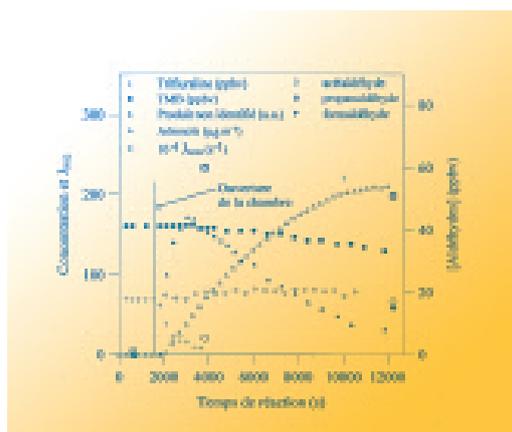


Figure 2. Dégradation atmosphérique des pesticides : exemple de la photolyse de la trifluraline par le rayonnement solaire.

Par ailleurs, certains des processus de dégradation étudiés s'accompagnent de la formation d'aérosols : il s'agit des réactions de OH avec le diazinon, la trifluraline, la N,N-diéthylaniline, la fenpropidine ainsi que de la photolyse de la trifluraline. Ces résultats sont d'une grande importance et méritent des recherches complémentaires pour identifier la composition chimique de ces aérosols, ce qui permettrait de renseigner au moins en partie les effets toxiques de ces produits.

Parallèlement aux études de réactivité des pesticides, des travaux ont été menés sur la réactivité de molécules azotées modèles

CONTRIBUTION A LA FORMATION

Thèses de Doctorat

Solignac G., 2005. Cinétiques et mécanismes d'oxydation atmosphérique de composés organiques volatils azotés et perfluorés (amides, imides, amine, fluoroalcool et fluoroaldéhydes). Thèse de doctorat, Université Paris 7-Denis Diderot.

Le Person A., 2006. Pesticides et composés aromatiques : Étude des cinétiques et mécanismes de leur dégradation en atmosphère simulée. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans.

VALORISATION

Articles scientifiques

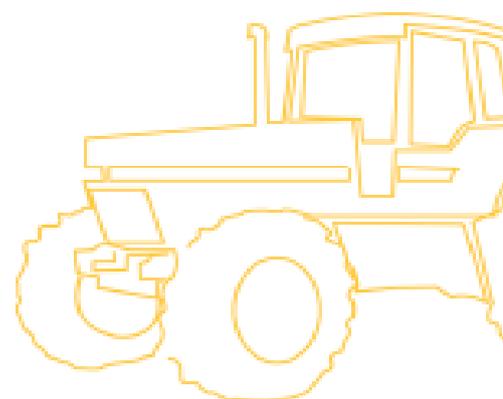
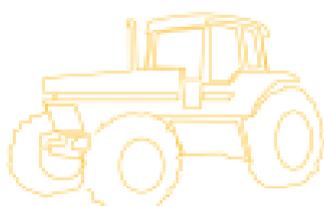
Chakir A., Solignac G., Mellouki A. & Daumont D., 2005. Gas phase UV absorption cross sections for a series of amides. *Chemical Physics Letters*, 404: 74-78.

Solignac G., Mellouki A., Le Bras G., Barnes I. & Benter Th., 2005. Kinetics of the OH and Cl reactions with N-methylformamide, N,N-dimethylformamide and N,N dimethylacetamide. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, 176: 136-142.

Feigenbrugel V., Le Person A., Le Calvé S., Mellouki A., Muñoz A. & Wirtz K., 2006. The atmospheric fate of dichlorvos: photolysis and OH-initiated oxidation studies. *Environmental Science and Technology*, 40: 850-857.

Solignac G., Magneron I., Mellouki A., Muñoz A., Martin Reviejo M. & Wirtz K., 2006. A study of the reaction of OH radicals with N-Methyl Pyrrolidinone, N-Methyl Succinimide and N-Formyl Pyrrolidinone. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 54: 89-102.

Le Person A., Mellouki A., Muñoz A., Borrás E., Martin-Reviejo M. & Wirtz K., 2007. Trifluralin: photolysis under sunlight conditions and reaction with HO radicals. *Chemosphere*, 67: 376-383.



ÉVALUATION DES EFFETS CHRONIQUES DES PESTICIDES SUR DES SYSTÈMES BIOLOGIQUES INTÉGRÉS

Les pesticides sont susceptibles de perturber de façon directe ou indirecte les organismes au sein des écosystèmes, avec pour conséquence des altérations des équilibres dynamiques au sein des communautés et des perturbations possibles des services des écosystèmes. Ces aspects ont été abordés au travers de quatre projets, l'un concernant le phytoplancton côtier, le second le devenir et l'impact du fipronil en milieu terrestre, le troisième les effets de mélanges herbicides-adjurant en milieu dulçaquicole et le dernier l'action de bactéries endocellulaires altérant la sexualité des insectes.



26

26

• Impact des pesticides sur l'environnement marin (IPEM) -
Gaël Durand (IDHESA Plouzané)

32

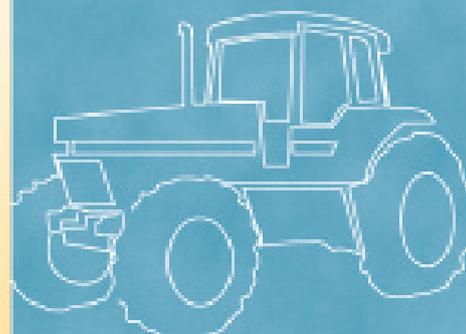
• Ecobilan des luttes chimiques contre les larves phytophages du sol. Recherche de stratégies agronomiquement, écologiquement et socialement acceptables -
Patrick Ravanel (Université de Grenoble)

36

• Changements d'échelle et évaluation du risque écotoxicologique de mélanges entre substances actives herbicides et adjuvant (CEREMEL) -
Laurent Lagadic (INRA Rennes)

42

• Action directe et indirecte des insecticides sur les bactéries endocellulaires altérant la sexualité des insectes -
Mylène Weill (Université de Montpellier)



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE
Gaël DURAND
 IDHESA BRETAGNE OCEANE
 Pôle Analytique des Eaux
 Technopôle Brest-Iroise, B.P. 52
 120 avenue Alexis de Rochon
 29280 Plouzané
 02 98 34 11 02
 gael.durand@idhesa.fr

PARTENAIRES
IDHESA BRETAGNE Océane, Plouzané
 C. Videau, D. Hureau, G. Limon
IFREMER
 Département Biogéochimie et
 Écotoxicologie, Plouzané
 G. Arzul, F. Quiniou
UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE-UBO Laboratoire de biotechnologie
 et physiologie végétales (BPV), Brest
 A. Hourmant
Laboratoire Universitaire de Microbiologie Appliquée (LUMAQ), Quimper
 D. de la Broise, S. Stachowski

IMPACT DES PESTICIDES SUR L'ENVIRONNEMENT MARIN (IPEM)

MOTS CLÉS

Pesticides – Environnement – Phytoplancton – PNEC – ISO – Mésocosme – PICT – ATP - Protéome

OBJECTIFS

Les objectifs de ce programme étaient de connaître les concentrations en biocides tolérées par les organismes marins, de les comparer aux valeurs trouvées lors d'analyses réalisées *in situ*, et d'étudier les effets de ces substances sur les assemblages phytoplanctoniques. Pour atteindre ces objectifs, plusieurs séries d'expérimentations ont été réalisées. L'impact des pesticides sur les caractéristiques des communautés de chacun des sites étudiés a été évalué en milieu enrichi, en conditions standards de laboratoire. L'impact de doses « réalistes » de pesticides couramment rencontrés, a aussi été évalué sur des populations naturelles (eucaryotes et procaryotes) de phytoplancton marin (eau de mer non modifiée) lors de bioessais *in situ*. Les cinétiques ont été réalisées, en microcosmes, en conditions proches des conditions naturelles (lumière, température, agitation), par l'utilisation de bouteilles fermées immergées dans le milieu naturel, à quelques mètres de profondeur, en zone côtière. L'évolution des populations a été suivie par l'analyse des profils pigmentaires par HPLC, de l'empreinte génétique de la communauté TTGE (*Temporal Thermal Gradient gel Electrophoresis*) et en cytométrie de flux. Enfin, la méthode PICT (*Pollution-Induced Community Tolerance*) jusqu'ici utilisée principalement en milieu dulçaquicole comme indice de pollution spécifique par les pesticides a été mise en œuvre pour identifier les milieux impactés par les pesticides.

L'étude des modifications physiologiques induites par l'exposition aux pesticides chez des espèces tolérantes a été abordée avec des souches pures en laboratoire par deux méthodes complémentaires :

- Analyse de la teneur en pigments photosynthétiques et du métabolisme énergétique chez ces espèces avant et après le stress dû à l'apport de biocide
- Étude en parallèle du protéome, au moyen de techniques de biologie moléculaire.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Pour étudier l'impact des pesticides sur l'environnement marin, nous avons considéré le premier niveau trophique qui constitue la base de la chaîne alimentaire, représenté par le phytoplancton. Les pesticides sélectionnés ont été : quatre herbicides (bentazone, diméthénamide, sulcotrione, nicosulfuron), un fongicide (époxyconazole), et un insecticide (chlorpyrifos éthyl). Ces produits ont été testés

purs, en formulations commerciales, et en mélanges de formulations. Leur impact était suivi à plusieurs niveaux, depuis l'échelle de la communauté naturelle jusqu'à la culture monospécifique, sur la cellule et son contenu. Les effets de la contamination ont été étudiés à court et à moyen terme, les effets à long terme étant évalués sur les sites naturellement contaminés. Enfin, le rôle de la richesse du milieu en sels nutritifs sur la sensibilité des cultures à la toxicité des contaminants a également été étudié.

Des populations naturelles prélevées sur le site de référence des îles des Glénan, ont été contaminées artificiellement par des pesticides apportés à concentrations proches de celles mesurées *in situ* puis incubées en microcosmes *in situ* (réacteurs de verre de 2 L, immergés) durant deux semaines. Les profils pigmentaires (HPLC) et génomiques (TTGE : *Temporal Thermal Gradient Gel Electrophoresis*) de produits PCR des communautés procaryotes et eucaryotes ont été suivis. L'analyse des données montre pour l'époxiconazole, le chlorpyrifos-éthyl, et le glyphosate à $1\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, des modifications sensibles de la communauté par rapport au témoin, ce dernier étant très similaire au milieu naturel. Une autre série d'expériences concernait le site de référence (Glénan), et les estuaires de Bélon, de Penzé, et d'Elorn, où les prélèvements ont été traités en laboratoire en conditions *in situ* simulées (réacteurs de 10 L en Nalgène). Le suivi des espèces phytoplanctoniques, en présence des pesticides durant cinq jours a montré que certaines espèces, dont le taux de croissance est d'abord accéléré, disparaissent tandis que d'autres se montrent plus tolérantes et résistent à la toxicité des contaminants auxquels elles ont été exposées. La tolérance des communautés « naïves » prélevées sur le site de référence, est notablement moindre que celle des communautés exposées à une contamination chronique par les pesticides. Le concept de PICT (tolérance induite des communautés) est ici vérifié, les CE_{50} les plus élevées ayant été calculées pour les populations de Penzé et Bélon où le nombre d'espèces chimiques détectées simultanément dans le prélèvement naturel était le plus élevé (30). Inversement la CE_{50} la plus faible était calculée pour le prélèvement de référence (Glénan).

Pour l'étude des effets des pesticides sur les cellules phytoplanctoniques, les expériences ont été faites sur des cultures monospécifiques.

- Le protocole expérimental décrit dans la norme ISO 10253 était adapté aux deux espèces testées : la diatomée *Chaetoceros gracilis* et le dinoflagellé *Alexandrium minutum*. Les effets se traduisent en général par une inhibition de croissance, plus marquée en présence de

concentrations élevées en pesticides. Cependant certaines molécules testées pures n'ont pas eu d'effet sur la croissance des microalgues : le nicosulfuron chez les deux espèces, et le chlorpyrifos-éthyl chez la diatomée. La sensibilité aux pesticides dépend de l'espèce phytoplanctonique, ainsi que de la richesse du milieu en sels nutritifs. Ainsi, pour la croissance d'*Alexandrium minutum*, la CE_{50} de la bentazone est de $41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en milieu appauvri (simulant les conditions nutritives estivales) et $99\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en milieu plus riche (simulant les conditions post-hivernales). Cependant, la tolérance des algues n'est pas toujours améliorée en milieu plus riche et il n'a pas été possible de définir les caractéristiques saisonnières d'un milieu plus favorable aux microalgues, en présence de contaminants. La toxicité des pesticides est augmentée lorsqu'ils sont testés en mélange de molécules actives et en formulations commerciales. Celles-ci étaient : Basamaïs pour le bentazone, Frontière pour le diméthénamide, Mikado pour la sulcotrione, Milagro pour le nicosulfuron, Opus pour l'épiconazole et Dursban pour le chlorpyrifos-éthyl. Les formulations contiennent un mélange d'adjuvants qui contribuent entre autres, à faciliter le transit des molécules actives à travers la membrane agale, et à toucher des fonctions métaboliques particulières. Ainsi pour la diatomée, la CE_{50} du bentazone pur est de $136\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en milieu post-hivernal et celle de la formulation Basamaïs est de $0,05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Parmi les perturbations étudiées au niveau cellulaire, il faut mentionner, dès 24 h d'exposition, une accélération des activités métaboliques : respiration, photosynthèse ; une accumulation des réserves énergétiques et du contenu en pigments, qui accompagnent une augmentation de la taille et un retard de division cellulaire.

- En présence de Basamaïs à doses proches de la CE_{50} , une levée d'inhibition a pu être observée après trois à cinq jours, avec reprise du développement de la culture, de la taille normale des cellules, et des contenus cellulaires plus faibles que la normale en ATP et en pigments. Ces résultats suggèrent un phénomène d'adaptation ou de détoxification mis en place par la cellule. Il semblerait que chez les cellules phytoplanctoniques, le mécanisme d'action des pesticides soit complexe et pas seulement identique à celui prévu au niveau des organismes terrestres. Ainsi, l'insecticide chlorpyrifos-éthyl pur et en formulation, agit sur la croissance du dinoflagellé (CE_{50} respectives $2,1$ et $0,13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). D'autres mécanismes d'actions ont été observés, comme l'oxydation des lipides avec formation de malondialdéhyde et la cassure des brins d'ADN, mis en évidence par le test des comètes appliqué chez une autre espèce phytoplanctonique.



De plus, le projet a permis le développement d'un incubateur simulant les conditions naturelles pour l'étude des communautés d'une part, et de tester une méthode de renouvellement partiel de l'eau dans les incubateurs d'autre part. Cette méthode assure un développement identique des communautés phytoplanctoniques dans les incubateurs et à l'extérieur de ceux-ci. Enfin, cette étude aide à la compréhension des mécanismes d'actions des pesticides au niveau des producteurs primaires, et souligne la toxicité accrue des pesticides en mélange et en formulation, principalement vis-à-vis des communautés naturelles.

CONTRIBUTION A LA FORMATION

Thèse de Doctorat

Stachowski S., 2007. Impact des pesticides sur le phytoplancton marin et le naissain d'huîtres. Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale.

Mémoires de stage

Pouline P., 2003. Effet d'un herbicide, le bentazone, sur une diatomée présente dans la rade de Brest, *Chaetoceros gracilis*. Mémoire de stage de DESS Gestion et expertise des littoraux, Université de Bretagne Occidentale, Brest.

Anseume H., 2004. Mise en place de microcosmes *in situ* et étude de l'impact de pesticides sur les communautés naturelles de phytoplancton, analyse des pigments par HPLC. Mémoire de stage de fin d'études, Intechmer, Cherbourg.

Collignon S., 2004. Mémoire de stage de Maîtrise, Université de Bretagne Occidentale, Brest.

Laisné C., 2004. Mémoire de stage de Maîtrise de Biochimie, Université de Rouen.

Lassus M., 2004. Essais pour l'évaluation de l'impact des phytosanitaires en éclosérie : cas du bentazone et de l'époxiconazole testés seuls et en mélange sur la microalgue marine *Isochrysis galbana* et sur les larves de l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Mémoire de stage de DEA de Toxicologie de l'Environnement, Université de Metz.

Robic A., 2004. Détermination des effets d'un pesticide, la bentazone, sur la croissance d'*Alexandrium minutum*. Mémoire de stage de Maîtrise de Sciences Biologiques et Médicales, École de Pharmacie de Caen.

Barloy F., 2005. Mémoire de DUT Génie Biologique, Génie de l'Environnement, IUT de Tours.

Dieuset G., 2005. Impact de pesticides sur le phytoplancton marin en microcosmes *in situ* et optimisation de la TTGE. Mémoire de BTS, Orléans.

Jan B., 2005. Mémoire de deuxième année. Ecole des Métiers de l'Environnement, Rennes.

Le Balle C., 2005. Évaluation de la toxicité potentielle de quatre pesticides à l'aide d'un bioessai sur le développement embryo-larvaire de l'huître creuse (*Crassostrea gigas*). Mémoire de stage de DUT Génie Biologique, IUT de Colmar.

Leturque C., 2005. Mémoire de fin d'études. École d'Ingénieur Agronome de Grenoble.

Amara A., 2006. Action d'un herbicide, le bentazone, sur la croissance et le métabolisme d'une diatomée marine, *Chaetoceros gracilis*. Mémoire de Master 2 Sciences Chimiques de l'Environnement Marin. Université de Bretagne Occidentale, Brest.

Kerros C., 2006. Optimisation de bacs de cultures de phytoplancton en laboratoire avec exposition à la lumière naturelle et impact de pesticides sur la souche phototrophe *Synechococcus sp.* Mémoire de DUT Biologie Appliquée, Université de Brest.

Le Floch Y., 2006. Impact de pesticides sur le phytoplancton marin et le naissain d'huîtres en microcosmes *in situ* et optimisation de bacs de cultures de phytoplancton en laboratoire. Mémoire BTS Analyses Biologiques et Biotechnologiques, St-Jacut-les-Pins.

Pothier J., 2006. Évaluation de l'impact par voie trophique des pesticides sur la croissance larvaire de l'huître creuse *Crassostrea gigas*: cas du bentazone en formulation commerciale Basamaïs. Mémoire de DEUST Technicien de la mer, Université du Littoral Côte d'Opale, Boulogne/Mer.

Che E., 2007. Impact de pesticides sur la souche phototrophe *Synechococcus sp.* et analyse de communautés phytoplanctoniques naturelles exposées à des pesticides par TTGE. Mémoire de BTS Analyses Biologiques et Biotechnologiques, Pontivy.

VALORISATION

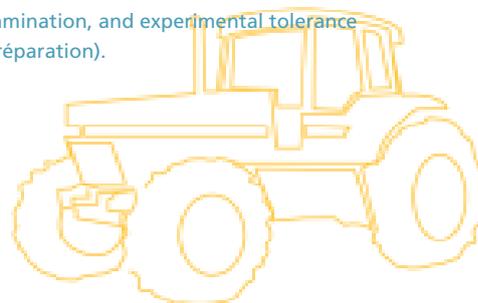
Articles scientifiques

Arzul G., Quiniou F. & Carrié C., 2006. In vitro test-based comparison of pesticides-induced sensitivity in marine and freshwater phytoplankton. *Toxicology, Mechanisms and Methods*, 16: 431-437.

Akcha F., Arzul G., Rousseau S. & Bardouil M. Suitability of the comet assay for the genotoxicity study of pollutant exposure in phytoplankton. *Marine Environmental Research* (soumis).

Arzul G. & Quiniou F., Experimental modification in coastal marine specific diversity by organic pollutants input (en préparation).

Arzul G., Durand G., Hureau D., Limon G. & Sauren S. Use of Pollution-induced community tolerance in marine phytoplankton communities as bioindicator of long term contamination, and experimental tolerance induction (en préparation).



Arzul G., Quiniou F., Carrié C., Forget G., Colmagro E., Videau C. & Durand G. Role of the development stage in the response of microalgae to pesticide toxicity (en préparation).

Hourmant A., Amara A., Pouline P., Durand G. & Arzul G. Effect of bentazone on growth and physiological responses of marine diatom : *Chaetoceros gracilis*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* (soumis).

Laisné C., Lassus M., Quiniou F., Durand G. & Arzul G. Effet des pesticides sur la taille cellulaire du phytoplancton marin (en préparation).

Stachowski-Hanerkorn S., Quiniou F., Arzul G., Nedelec M., Robert R., Limon G. & de la Broise D., In situ microcosm, a tool to assess xenobiotic impacts on *Crassostrea gigas spat*. *Aquatic Toxicology* (soumis).

Ouvrage

Projet d'ouvrage en co-édition Ifremer (Quae) : Coordinatrice Geneviève Arzul et nombreux autres auteurs. Les pesticides dans l'environnement côtier, *Quel impact sur les premiers niveaux trophiques ?* (En cours, sortie prévue 2008).

Communications dans des congrès

Arzul G., Hourmant A., Pouline P., Masson D., Dupin V. & Quiniou F., 2004. *The use of phytoplankton in marine water quality assessment*. *Chemrawn XV*, 21-23 June 2004, Paris.

De la Broise D., 2004. An immersed in situ mesocosm as a tool for the assessment of pollution impact on *Synechococcus*. *ISME*, 23 août 2004, Cancun, Mexique.

Hourmant A., Pouline P., Arzul G., Durand G., Hureau D., Robic A., Videau C. & Quiniou F., De La Broise D., 2004. Influence of nutrients on the phytotoxicity of bentazone in pure solution and formulation, to marine phytoplankton. *14th SETAC Europe Annual Meeting*, 14-21 April 2004, Prague, République Tchèque.

Laisné C., Lassus M., Arzul G., Quiniou F., Durand G. & Hureau D., 2004. Effet des pesticides sur la taille cellulaire du phytoplancton marin. *21e Forum des jeunes océanographes – 1er Forum européen des jeunes océanographes*, 13-14 mai 2004, Villefranche/Mer⁷.

Laisné C., Pouline P., Durand G., Hureau D., Legrand J., Quiniou F. & Arzul G., 2004. Effects of two herbicides, bentazone and nicosulfuron, on a marine diatom : *Chaetoceros gracilis*. *9th FECS Conference on Chemistry and the Environment and 2nd SFC Meeting on Environmental Chemistry Behaviour of Chemicals in the Environment*, 29 août-1 septembre 2004, Bordeaux, France.

Laisné C., Pouline P., Durand G., Hureau D., Legrand J., Quiniou F. & Arzul G., 2004. Compared effects of two pesticides, bentazone and epoxiconazole, on two trophic levels : the algae *Isochrysis galbana* and the Japanese oyster *Crassostrea gigas*. *9th FECS Conference on*

Chemistry and the Environment and 2nd SFC Meeting on Environmental Chemistry Behaviour of Chemicals in the Environment, 29 août-1 septembre 2004, Bordeaux, France.

Quiniou F., Arzul G., Carrié C. & Quéré E., 2004. Toxic effects of two pesticides (Isoproturon, Carbofuran) on marine bacteria, marine and freshwater phytoplankton species and marine bivalve. *14th SETAC Europe Annual Meeting*, 14-21 April 2004, Prague, République Tchèque.

Arzul G., Malestroit P., Videau C., Quiniou F., Durand G. & Hureau D., 2005. Effect of an experimental pesticide contamination on natural phytoplankton communities and possible consequences on the secondary production. *8th International Conference on Shellfish Restoration*, ICSR, Enhancement and sustainability of shellfish resources, 2-5 October, Brest.

Hourmant A., Pouline P., Arzul G., Durand G., Hureau D., Robic A., Videau C., Quiniou F. & De La Broise D., 2005. Influence of nutrients on the phytotoxicity of bentazone in pure solution and formulation, to marine phytoplankton. *Forum des doctorants*, 10 mars.

Leturque C., Jan B., Barloy F., Le Balle C., Quiniou F., Durand G., Hureau D. & Arzul G., 2005. Toxic effects of some pesticides on the diatom *Chaetoceros gracilis*, the prymnesiophyceae *Isochrysis galbana* and the bivalve *Crassostrea gigas* larvae. *8th International Conference on Shellfish Restoration*, ICSR, Enhancement and sustainability of shellfish resources, 2-5 October, Brest.

Stachowski S., Anseume H., Hureau D., Durand G., de la Broise D., 2005. How can we study pesticides impacts on marine phytoplankton ? *8th International Conference on Shellfish Restoration*, ICSR, Enhancement and sustainability of shellfish resources, 2-5 October, Brest.

Amara A., Hourmant A., Stachowski S., Arzul G., Quiniou F. & Durand G., 2006. Action d'un herbicide, la bentazone (formulation), sur la croissance et le métabolisme d'une diatomée marine : *Chaetoceros gracilis*. *31e Congrès de l'Union des Océanographes de France*, « Santé et Environnement Marin : Impacts de l'environnement marin sur la santé de l'homme, des organismes et des écosystèmes marins », 2-3 novembre 2006, Nantes.

Arzul G., Durand G., Hureau D., Limon G. & Masson D., 2006. Pollution-Induced Community Tolerance: a good indicator for long term pollution assessment in coastal phytoplankton communities. *Seminar AquaLife*, September 2006, Kiel bbe Moldaenke, Allemagne.

Arzul G., Durand G., Hureau D., Limon G. & Masson D., 2006. Tolérance des populations induite par la pollution : un bon indicateur pour évaluer l'effet de la pollution chronique chez les communautés phytoplanctoniques côtières. *Premier Congrès Méditerranéen d'Océanologie*, 20-22 novembre 2006, Alger, Algérie.

Arzul G., Quiniou F., Quéré J., Caisey X., Malestroit P. & Videau C., 2006. Effects of pesticide mixtures on the first trophic levels : natural phytoplankton populations and oyster larvae. *European Federation of Marine Science and Technology Societies & Union des Océanographes de France in partnership with the 100th anniversary of the Institut Océanographique*, 13-15 septembre 2006, Paris.

Arzul G., Quiniou F., Carrié C., Forget G., Colmagro E., Videau C. & Durand G., 2006. Rôle du stade de développement dans la sensibilité des cultures phytoplanctoniques vis-à-vis de la toxicité des pesticides. *31e Congrès de l'Union des Océanographes de France*, « Santé et Environnement Marin : Impacts de l'environnement marin sur la santé de l'homme, des organismes et des écosystèmes marins », 2-3 novembre 2006, Nantes.

De la Broise D., Cerceau C., Durand G. & Stachowski S., 2006. *Assessment of pollution impact on marine phytoplankton : Development and test of experimental tools*. Premier Congrès Méditerranéen d'Océanologie, 20-22 novembre 2006, Alger, Algérie.

Stachowski S., Amara A., Colmagro E., Pothier J., Hourmant A., Arzul G. & F. Quiniou F., 2006. Effects of pesticides on cellular ATP concentration in marine phytoplankton. *UOF Forum des jeunes océanographes - EMECS 7, Environmental Management of Enclosed Coastal Areas*, 9-12 mai 2006, Caen.

Stachowski S., Dieuset G., Hureau D., Durand G. & de la Broise D., 2006. In situ microcosms, a tool to assess pesticides impacts on natural marine phytoplankton communities. *UOF Forum des jeunes océanographes - EMECS 7, Environmental Management of Enclosed Coastal Areas*, 9-12 mai 2006, Caen⁸.

Akcha F., Wessel N., Rousseau S., Munsch C., Menard D., Caisey X., Arzul G., Quiniou F. & Burgeot T., 2007. Applications of the alkaline comet assay in marine organisms: *in situ and laboratory studies*. *7th International Comet Assay Workshop*, 24-27 June 2007, University of Ulster, Coleraine, Northern Ireland.

Akcha F., Wessel N., Rousseau S., Munsch C., Menard D., Caisey X., Arzul G., Quiniou F. & Burgeot T., 2007. Applications of the alkaline comet assay in marine organisms: *in situ and laboratory studies*. *14th International Symposium on Pollutant Responses In Marine Organisms*, PRIMO 14, 5-9 May 2004, Florianopolis, Brésil.

Arzul G., Quiniou F., Hourmant A., de la Broise D., Stachowski-Haberkorn S., Akcha F., Limon G. & Durand G., 2007. Contribution des pesticides dans le contrôle du développement phytoplanctonique. *XXVIIème congrès du Groupe Français pour les Pesticides*, Bordeaux, 21-23 mai 2007.

Stachowski-Haberkorn S., Quiniou F., Nédelec M., Robert R., Limon G., de la Broise D. Utilisation des microcosmes in situ pour évaluer la toxicité de pesticides sur du naissain d'huîtres *Crassostrea gigas*. *11e colloque annuel du Chapitre Saint-Laurent SRA-SETAC*, 28-29 mai, Rimouski, Canada⁹.

Communications grand public

Arzul G., 2005. Participation aux Journées du développement durable, *Cap Atlantique, Presqu'île de Guérande – Semaine du Développement Durable*.

Arzul G. & Quiniou F., Émissions TV régionales en bilingue (2005 et 2006)

Arzul G. & Quiniou F., Participation au mois de la mer, Sensibilisation de classes de collège au plancton et impact des pesticides sur l'environnement marin, *Mois de la science, Collège de Kerzourat, Landivisiau, Décembre 2004, 2005, 2006*.

Arzul G., Quiniou F., Malestroit P., Durand G., Hureau D. & Videau C., 2005. Effets des pesticides sur le milieu marin cas particulier des herbicides et du phytoplancton. *Journées du développement durable, Cap Atlantique, Presqu'île de Guérande – Semaine du Développement Durable*, 31 mai 2005.

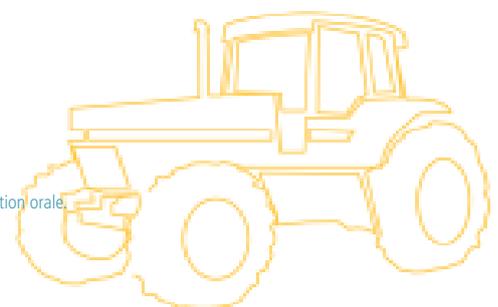
Stachowski S., Anseume H., Hureau D., Durand G. & de la Broise D., 2005. Comment étudier l'impact des pesticides sur le phytoplancton marin? *Forum des doctorants*, 10 mars 2005

Présentation des effets des pesticides sur le milieu marin au cours des journées portes-ouvertes à l'Ifremer (septembre 2004).



8-S. Stachowski a été lauréate du prix accordé par l'UOF pour ce poster.

9-S. Stachowski-Haberkorn a reçu le 1er prix décerné pour la présentation et le contenu de cette communication orale.



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Patrick RAVANEL**

UMR LECA, Grenoble I
 UFR Biologie, Université J. Fourier,
 BP 53
 04 76 51 46 77
 Patrick.ravanel@ujf-grenoble.fr

PARTENAIRES**UMR LECA GRENOBLE**

A. Aajoud, H. Aouadi, D. Azrou-Isgbi,
 P.F. Chaton, M. Raveton, M. Tissut, J.
 Willison

ACTA LYON

A. Chabert, A. Decourtye, J. Gandrey,
 M. Tisseur

LYCÉE AGRICOLE DE L'ISERE

D. Félix, LS. Lecomte

ÉCOBILAN DES LUTTES CHIMIQUES CONTRE LES LARVES PHYTOPHAGES DU SOL. RECHERCHE DE STRATÉGIES AGRONOMIQUEMENT, ÉCOLOGIQUEMENT ET SOCIALEMENT ACCEPTABLES

**MOTS CLÉS**

Fipronil – *Agriotes* – Lumbricidés – Collembolles –
 Abeilles - Tournesol

**OBJECTIFS**

Expertiser le bien fondé mais aussi les conséquences environnementales d'une stratégie de lutte insecticide par pelliculage de semences en grandes cultures contre des ravageurs phytophages du sol (ex. *Agriotes*) et, le cas échéant, proposer une alternative efficace agronomiquement et moins dommageable pour l'environnement. Dans ce contexte, notre objectif était : 1) d'établir le comportement alimentaire du ravageur qui justifie le traitement, 2) d'établir en situation agronomique un bilan de dissipation de l'insecticide fipronil appliqué en pelliculage de semences sous sa forme commerciale Régent TS, 3) d'évaluer les risques pour des espèces non-cibles, et, 4) d'essayer de modifier la stratégie de lutte pour rester efficace en diminuant la dose.ha⁻¹ et l'impact environnemental.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de comprendre le mode d'acquisition de l'insecticide par le ravageur et d'établir un bilan de dissipation dans les différents compartiments de l'agrosystème afin d'aboutir à une vision systémique des modifications fonctionnelles des différentes composantes du milieu.

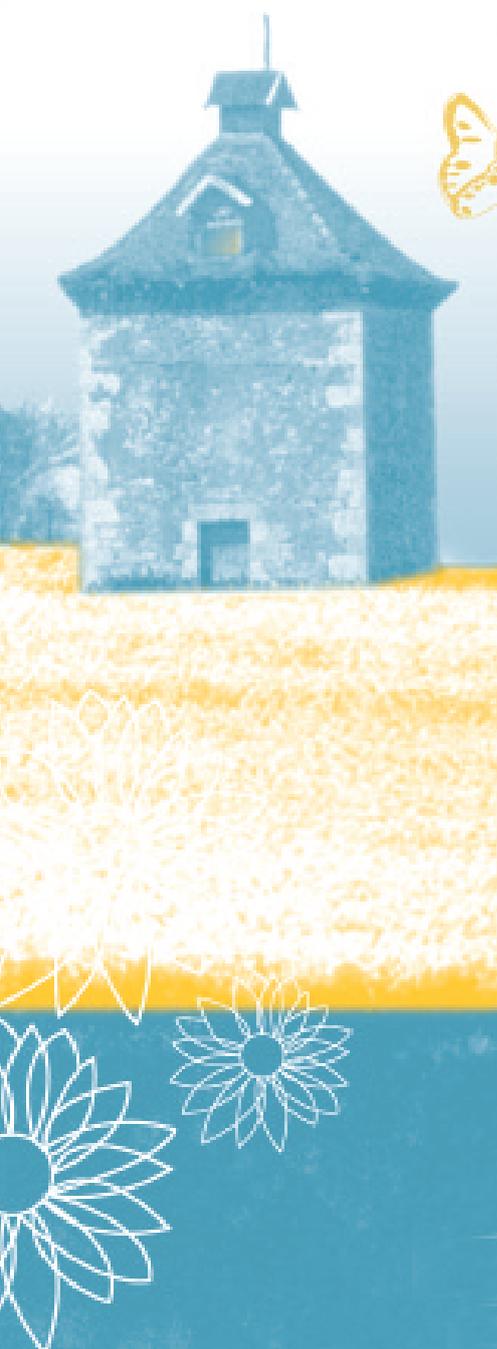
**PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE**

Ce travail expertise le bien fondé d'une lutte insecticide contre des ravageurs phytophages du sol par traitement de semences et tente d'en mesurer les conséquences environnementales.

Ravageur : larves de taupins du genre Agriotes, matière active : le fipronil et sa formulation Régent TS appliquée en pelliculage de semences de maïs et tournesol.

**BIEN FONDÉ DE LA LUTTE - POSSIBILITÉS D'AMÉLIORATION.**

La stratégie de lutte contre les phytophages du sol par pelliculage de semences entraîne une diminution importante des doses appliquées à l'hectare (40-50 g.ha⁻¹) en comparaison avec les traitements conventionnels. Le traitement par pelliculage est localisé sur la semence (ce qui représente environ 10 m².ha⁻¹). Cette formulation ou



la matière active est cristallisée, protège le compartiment atmosphérique contre les brouillards et aérosols qui se forment en traitements classiques. Avec un pelliculage bien réalisé, la contamination atmosphérique directe lors du semis est ainsi pratiquement inexistante.

Notre étude concernant les ravageurs ciblés a démontré que l'acquisition de la matière active ne se fait ni par inhalation ni par contact transtégumentaire mais par ingestion de semences contaminées. Le mode alimentaire des larves d'*Agriotes* dépend de mécanismes d'appétence (et non d'attractivité mettant en jeu des récepteurs olfactifs). Certains constituants des semences sont plus appétants que d'autres et les poudres de semences (sans grande sélectivité botanique) reconstituées en appâts présentent la meilleure attractivité. Dans sa recherche de nourriture, sans obstacles majeurs, la larve parcourt de 10 à 30 m.h⁻¹. Après un repas, les larves peuvent supporter de très longues périodes de jeûne.

Nous avons déterminé la DL₁₀₀ minimale par individu (environ 5 ng soit 0,01 nmole). Les produits de formulation du Régent TS n'ont ni rôle attractif ni rôle répulsif. Les manifestations de l'intoxication sont progressives : 1) déplacement anormal, 2) arrêt des déplacements, 3) mouvements spasmodiques (abdomen, pattes, pièces buccales), 4) arrêt des réactions aux stimuli tactiles, et, 5) mort puis nécroses. A la dose de 5 ng/individu l'arrêt de la mobilité est rapide (effet recherché car sans déplacement plus d'attaque possible), la mort est lente.

La formulation homologuée correspond à 450 µg de fipronil par semence. Nous avons mesuré la surface de tégument attaquée lors d'un repas. Celle-ci est de 3% de la surface de la semence ce qui correspond à une ingestion obligatoire par la larve de 13,5 µg de fipronil. Cette quantité est plus de 2000 fois la DL₁₀₀ minimale. A partir de ce constat, en reprenant les matrices végétales les plus appétantes, nous avons réalisé des appâts granulés à différentes concentrations en fipronil, mesuré leur efficacité et leur résistance mécanique dans des sols soumis à des pluies artificielles. Une stratégie de lutte par appâts contaminés est totalement réaliste. Elle présente deux avantages majeurs par rapport à la lutte par pelliculage : 1) une diminution très importante de la dose.ha⁻¹ et, 2) une déconnexion entre la période de traitement et le semis. Les larves de taupin étant très actives au printemps et à l'automne, il deviendrait possible de traiter hors période de semis pour faire chuter la population en dessous du seuil de nuisibilité pour la culture.

ÉTABLISSEMENT D'UN BILAN DE DISSIPATION DANS L'AGROSYSTÈME

A partir de semences traitées (dopées avec une petite quantité de ¹⁴C fipronil), nous avons suivi la dissipation de la matière active, sa métabolisation, ses flux de transfert (pelliculage/eau du sol, eau du sol/sol, adsorption et relargage, redistribution vers la culture). Ces résultats de laboratoire ont été confirmés par des études réalisées à partir d'échantillons de terrain.

Au moment du semis, la charge insecticide par semence est de 450 µg de fipronil soit environ 1000 nmoles. Au cours de la culture (175 j sur le terrain), la teneur en fipronil dans le pelliculage diminue d'environ 50-60%. Les métabolites majoritaires retrouvés dans l'eau du sol et le sol sont les sulfides et sulfone-fipronil (encore insecticides). Au cours de ces 6 mois, la migration des produits détectés autour de la semence ne dépasse pas 20 cm. Ce qui fait qu'au cours de sa croissance, les racines de la culture échappent pour des raisons de position, très largement aux sphères contaminées. Durant ces phases de croissance nous avons suivi les flux de transfert des molécules provenant du sol. La circulation de ces dernières se fait par systémie xylémienne.

Une photographie de répartition peut être donnée au moment de la floraison du tournesol (environ 75 j après le semis). Sur les 1000 nmoles de fipronil présentes au moment du semis seules 10 nmoles (de fipronil-like) soit 1% ont atteint les parties aériennes (tige, feuilles, inflorescence) avec une très grande dissymétrie : 5 nmoles sont dans les feuilles basales (1 à 12) et le bas de tige, 4 nmoles sont dans la partie haute (tige du haut et feuilles 15 à 40). Enfin, 1 nmole soit environ 450 mg de fipronil ou métabolites (0,1% de la quantité de départ) est présente dans l'inflorescence qui représente à ce moment là une masse fraîche d'environ 300 g. Si la distribution des fipronil-like mesurés dans cette partie est assez homogène, la quantité contenue dans la fraction pollen (environ 300 mg/inflorescence) est de l'ordre de 1 pmole (soit 450 pg de fipronil-like/inflorescence). Une étude parallèle sur pollen récolté *in natura* à partir de tournesols issus de semences traitées nous conduit à une valeur de 1,5 pmole/inflorescence. Ces résultats indiquent une faible accumulation de fipronil et ses métabolites dans les parties sommitales de la culture.

ÉVALUATION DE L'IMPACT DU TRAITEMENT SUR LA FAUNE NON CIBLE

Suite à l'interdiction de l'usage agricole du fipronil (2004), nos essais sur la faune non-cible précédemment faits sur le terrain, ont été réalisés à partir de fin 2004 au laboratoire et en tunnels confinés.

Impact mesuré sur la faune non-cible du sol

Nos études précédentes ont montré que l'essentiel du pouvoir insecticide apporté par pelliculage lors du semis reste dans une sphère d'une 20^{aine} de cm autour de la semence (au moment de la floraison : 500 nmoles encore dans le pelliculage, 370 nmoles sur le complexe argilo-humique, 120 nmoles adsorbées et/ou absorbés au niveau des racines, 10 nmoles dans les parties aériennes). Ce constat nous autorise à penser que, dans l'agrosystème, la faune du sol est potentiellement la plus exposée. Pour cela nous avons recherché l'impact sur deux espèces couramment considérées comme bio-indicatrices de la pollution des sols. Pour *Folsomia* la sensibilité au fipronil et à ses métabolites encore insecticides est décroissante avec l'âge des individus. Les stades juvéniles sont sensibles au fipronil ($LC_{50} = 460\mu\text{g/L}$), au sulfone ($LC_{50} = 430\mu\text{g/L}$) et au sulfure ($LC_{50} = 160\mu\text{g/L}$). L'acquisition est probablement transtégumentaire. Ces concentrations toxiques ne sont jamais atteintes dans l'eau du sol en situation de traitement par pelliculage. Sur organismes adultes nous n'avons pas mis en évidence de toxicité aiguë. Seuls des effets de comportement ont été notés aux concentrations les plus fortes utilisées (tremblements et perte de réponse à des stimuli tactiles). Les systèmes de détoxification chez les adultes (réductases, oxydases) semblent tout à fait adaptés à contrôler un flux d'entrée de fipronil dans l'organisme. Chez *Eisenia* aucune toxicité n'est apparue malgré des concentrations fortes utilisées (limite de solubilité dans l'eau). Le pouvoir de métabolisation et de bioaccumulation apparaît énorme (facteur de concentration de 10 000 après 2h de contact) grâce aux performances métaboliques des vers et de la microflore bactérienne associée à leur système digestif. La présence de fipronil et métabolites insecticides en concentrations relativement fortes chez *Eisenia* nous conduisent à penser que les canaux chlorures des cellules nerveuses d'*Eisenia* n'ont pas de sensibilité marquée aux phénylpyrazoles.

L'ensemble des observations (2002-2004) effectuées dans les conditions de terrain sur carabes, arachnides, staphylins, montre un effet nul du traitement par pelliculage sur ces populations. Ce non-effet semble directement relié à la formulation du produit et à la dose homologuée. En effet, au laboratoire, en effectuant des traitements conventionnels (pulvérisations jusqu'à la dose de 200 g/ha), les mêmes espèces montrent une sensibilité réelle au fipronil. De plus, les cadavres d'organismes atteints par le fipronil peuvent contaminer les éventuels prédateurs.

Impact mesuré sur les abeilles butineuses adultes

Cette expérimentation a été conduite en espace confiné (tunnels) sur des ruchers ayant à leur disposition une solution de sucre, de l'eau et du pollen témoin ou contaminé par nos soins avec du fipronil appliqué à trois concentrations : 10, 100 et 1000 ppb. Ces trois concentrations sont largement supérieures à toutes les concentrations mesurées dans du pollen issu de semences pelliculées Régent TS. Pour mémoire, nos résultats portant sur la contamination du pollen obtenu à partir de semences traitées par pelliculage est de l'ordre de 1 pg/inflorescence contenant 300 mg de pollen (environ 3-4 ppb). A la concentration la plus forte utilisée la colonie est largement détruite en fin d'expérimentation. Par contre, aux deux concentrations inférieures le taux de mortalité constaté n'est pas statistiquement supérieur à celui mesuré dans les tunnels témoins. A la lumière de l'ensemble de nos résultats, il nous semble très difficile de faire un lien direct entre la mortalité observée durant quelques années, sur abeilles butineuses adultes dans les ruchers français et le traitement de semences par pelliculage Régent TS.

ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Les transferts de connaissances essentiellement mis en place durant et à la suite de ces travaux sont d'ordre pédagogique vis-à-vis soit des professionnels du monde agricole, soit d'étudiants de niveau universitaire. En particulier, nos résultats sont utilisés dans 1) notre participation pédagogique aux stages de formation organisés par l'ACTA (ingénieurs, techniciens, agents des firmes phytosanitaires...) et, 2) une intégration des résultats scientifiques obtenus, en particulier dans deux formations universitaires dont le responsable pédagogique est le responsable scientifique du présent projet (MEDD 2002) : **une licence professionnelle** (ouverte aux BTS en particulier), « Des Agrosystèmes aux Territoires : Outils pour une Gestion Intégrée » et un **Master 2 Recherche** « Méthodes de Recherche en Environnement et Santé » Université Grenoble I.

Deux acteurs de ce projet sont aussi les co-auteurs d'un livre paru en 2006 aux éditions ACTA sous le titre « Plantes, herbicides et désherbage » (635 pages, 148 figures originales). Certains concepts issus du projet sont intégrés à cet ouvrage.





FORMATION

Responsabilité de filières dans une Licence Professionnelle tournée vers l'agriculture et la gestion raisonnée et dans un Master tourné vers la recherche (responsable d'un master 2 recherche en Environnement et Santé). Les acquis de recherche sont systématiquement intégrés dans les formations indiquées.

Participation des agents de l'ACTA et d'universitaires à certains stages de formation organisés par l'ACTA.

Thèses de Doctorat

Chaton P.F., 2004. Étude du comportement alimentaire des larves du genre *Agriotes* (Insecta, Coleoptera, Elateridae) dans le but d'optimiser le contrôle chimique de ces ravageurs de cultures.

Aajoud A., 2005. Devenir du fipronil en culture tournesol à partir de semences pelliculées

Rapports de stages

Aouadi H., 2004. Étude de la photodégradation d'un insecticide, le fipronil.

Azron-Isghi D., 2005. Mobilité du fipronil dans la plante de tournesol.

VALORISATION

Articles scientifiques

Chaton P.F., Ravanel P., Tissut M. & Meyran J.C., 2002. Toxicity and bioaccumulation of fipronil in the nontarget arthropodan fauna associated with subalpine mosquito breeding sites. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 52: 8-12.

Chaton P.F., Liégeois M.H., Meyran J.C., Ravanel P. & Tissut M., 2003. Feeding behaviour of field strains of the wireworm *Agriotes* sp. (Coleoptera: Elateridae) under laboratory conditions. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 77:106-114.

Aajoud A., Ravanel P. & Tissut M., 2003. Fipronil, metabolism and dissipation in a simplified ecosystem. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51: 1347-1352.

Raveton M., Aajoud A., Willison J.C., Aouadi H., Tissut M. & Ravanel P., 2006. Phototransformation of the insecticide fipronil : identification of novel photoproducts and evidence for an alternative pathway of photodegradation. *Environmental Science and Technology*, 40: 4151-4157.

Raveton M., Aajoud A., Willison J.C., Cherifi M., Tissut M. & Ravanel P., 2007. Soil distribution of fipronil and of its metabolites originating from seed-coated formulation. *Chemosphere* (sous presse).

Chaton P.F., Tissut M. & Ravanel P., 2007. Biological traits and feeding capacity of *Agriotes* larvae (Coleoptera: Elateridae): a trial of seed coating to control larval populations with the insecticide fipronil. *Pesticide Biochemistry and Physiology* (soumis).

Communications dans des congrès

Chaton P.F., Ravanel P., Tissut M. & Meyran J.C., 2002. Comportement alimentaire des larves de populations sauvages de taupins (*Agriotes* sp : Coleoptera, Elateridae) en conditions contrôlées. *Sixième Conférence Internationale sur les Ravageurs en Agriculture*, Montpellier, France.

Aajoud A., Raveton M., Chaton P.F., Liégeois M.H., Aouadi H., Ravanel P. & Tissut M., 2003. Fipronil activity and degradation in different ecosystems. *XXXIIIe Congrès du Groupe Français des Pesticides*, Aix-en-Provence, France.

Chaton P.F., Liégeois M.H., Mauras R., Meyran J.C., Ravanel P. & Tissut M., 2003. The main characteristics of a chemical control of *Agriotes* populations. *XXXIIIe Congrès du Groupe Français des Pesticides*, Aix-en-Provence, France.

Tissut M., Aajoud A., Raveton M. & Ravanel P., 2003. Relationships between detoxifying plants and insects. *Réunion réseau COST*, Prague.

Aajoud A., Aouadi H., Chaton P.F., Raveton M., Willison J. & Ravanel P., 2004. Fate and insecticidal properties of fipronil. *XXXIVe Congrès du Groupe Français des Pesticides*, Dijon, France.

Aajoud A., Raveton M., Chaton P.F., Tissut M. & Ravanel P., 2005. Étude du transfert du fipronil appliqué en traitement de semences en culture de tournesol, *2e Colloque Technique Apicole*, Lyon, 16 mars.

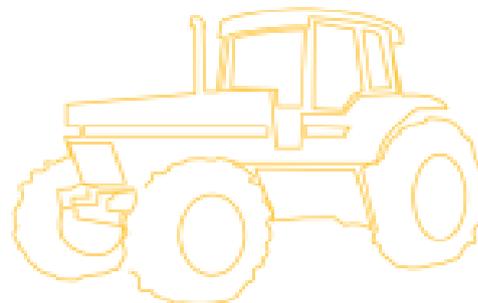
Aajoud A., Raveton M., Willison J.C., Chaton P.F., Liégeois M.H., Aouadi H., Tissut M. & Ravanel P., 2005. Environmental impact of fipronil and its photodegradation metabolites. *57th International Symposium on Crop Protection*, Gent, 10-12 mai.

Decourtye A., Tisseur M., Lefort S., Tissut M. & Ravanel P., 2006. Effects of fipronil in honeybees under semi-field conditions. *The Second Conference of Apidology Eurbec*, Prague, 10-14 sept.

Raveton M., Aajoud A., Willison J.C., Chaton P.F., Liégeois M.H., Tissut M. & Ravanel P., 2006. Fipronil-photodegradation : Fipronil and photo-products environmental impact. *Workshop Analytical Chemistry and Ecotoxicology*, Genève, 15 février.

Publications de transfert

Chaton P.F., Mauras R., Ravanel P., Meyran J.C. & Tissut M. 2003. Taupins, comment les larves attaquent. Stratégies phytophages des larves d'*Agriotes* (Coléoptères, Elatéri-dées) sur la plantule de maïs. *Phytoma*, 557: 41-45.



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Laurent LAGADIC**

Équipe Écotoxicologie et Qualité des Milieux Aquatiques
UMR INRA-Agrocampus,
Écologie et Santé des Écosystèmes
65, rue de Saint Briec
35042 Rennes Cedex
02 23 48 52 37
Laurent.Lagadic@rennes.inra.fr

PARTENAIRES**UMR INRA-AGROCAMPUS ÉCOLOGIE ET SANTÉ DES ÉCOSYSTEMES**

Équipe Écotoxicologie et Qualité des Milieux Aquatiques, Rennes
M.-A. Coutellec, C. Gorzerino,
M. Heydorff, L. Lefeuvre-Orfila
INRA
Unité Expérimentale Écologie et Écotoxicologie Aquatique (U3E), Rennes
D. Azam, M. Ollitrault, A. Quemeneur
INRA

UMR 1089 Xénobiotiques, Toulouse
J.-P. Cravedi, G. Delous, A. Hillenweck
INERIS

Unité Évaluation des Risques Écotoxicologiques, Verneuil-en-Halatte
J.-M. Porcher, W. Sanchez

UMR 7146 CNRS-UNIVERSITÉ PAUL VERLAINE, Laboratoire des Interactions Écotoxicologie, Biodiversité, Écosystèmes
C. Cossu-Leguille, R. Denoyelles,
L. Giamberini, E. Guerlet, P. Vasseur
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ EA 3184 USC INRA, Laboratoire de Biologie Environnementale, Besançon
M. Coeurdassier, A. de Vaufléury

CHANGEMENT D'ÉCHELLE ET ÉVALUATION DU RISQUE ÉCOTOXICOLOGIQUE DE MÉLANGES ENTRE SUBSTANCES ACTIVES HERBICIDES ET ADJUVANT (CEREMEL)

MOTS CLÉS

Mélange de xénobiotiques - Faibles doses - Stress oxydant - Biomarqueurs - Traits d'histoire de vie - Mollusques - Poissons - Tests monospécifiques - Microcosmes

OBJECTIFS

L'objectif général du programme de recherche consiste à caractériser les éléments individuels et populationnels précoces de la réponse d'animaux aquatiques (un mollusque gastéropode, la lymnée des étangs, et un poisson téléostéen, l'épinoche à trois épines) à l'exposition à des mélanges extemporanés entre herbicide et adjuvant. Les effets sur les individus sont évalués à partir de mesures de paramètres biochimiques (biomarqueurs) et physiologiques (traits d'histoire de vie caractérisant les performances des adultes en termes de croissance et de reproduction) ; les effets sur les populations sont estimés sur la base des performances précoces de la descendance de géniteurs exposés aux xénobiotiques (Fig. 1).

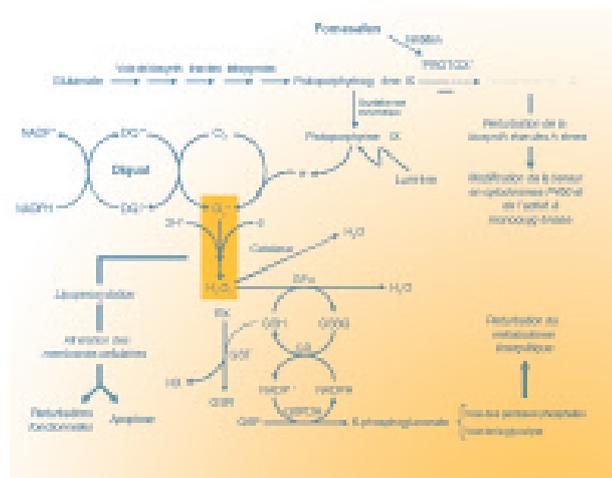


Figure 1. Représentation schématique des mécanismes par lesquels le diquat et le fomesafen peuvent agir à l'échelle cellulaire. Pour les deux herbicides, la toxicité est médiée par les espèces réactives de l'oxygène (ROS) (carré jaune).

Le fomesafen inhibe la protoporphyrinogène-oxydase (PROTOX), dernière enzyme de la voie de biosynthèse des hèmes, ce qui conduit à l'accumulation de protoporphyrinogène IX oxydé de façon non-enzymatique en protoporphyrine IX, laquelle produit, sous l'action de la lumière, des espèces radicalaires de l'oxygène. Le diquat est transformé, par addition d'un électron célibataire, en radical réactif qui réagit avec l'oxygène moléculaire

pour former un anion superoxyde. Les ROS sont à l'origine de dommages à de nombreux constituants protéiques et lipidiques des cellules, notamment au niveau des membranes avec, pour conséquence, des perturbations fonctionnelles et des processus chimio-induits de mort cellulaire. Afin d'évaluer ces dommages, la lipoperoxydation, l'intégrité des membranes lysosomales, l'activité phagocytaire et l'apoptose ont été étudiées chez les organismes-modèles. Les ROS produits sont pris en charge par des systèmes anti-oxydants, dont certains ont été étudiés dans le cadre du présent programme de recherche : la catalase, la glutathion peroxydase (GPx), la glutathion réductase (GR), et le glutathion (GSH/GSSG) qui module l'activité glutathion S-transférase (GST) impliquée par ailleurs dans les réactions de conjugaison des xénobiotiques (RX). L'ensemble des réactions est étroitement lié au métabolisme énergétique dont la perturbation peut se répercuter sur les performances des individus, notamment en termes de croissance et de reproduction.

Les herbicides choisis sont le fomesafen (famille des diphényl-éthers) et le diquat (famille des bipyridyles), deux composés connus pour leurs effets peroxydants, dont l'emploi en agriculture requiert l'association avec un adjuvant de pulvérisation tensioactif à base de nonylphénols polyéthoxylés, l'Agral® 90. Les expositions sont réalisées en laboratoire, dans deux types de systèmes aquatiques expérimentaux : bioessais monospécifiques et microcosmes.

En termes de finalités, l'application des résultats du programme de recherche à des décisions de gestion s'appuiera sur la possibilité :

- de développer des outils de diagnostic, et éventuellement de prévision, des effets biologiques utilisables pour l'évaluation du risque écotoxicologique. Il s'agit en premier lieu de définir des méthodes et d'acquérir des savoir-faire permettant la mise en œuvre et l'emploi, dans différents contextes expérimentaux (bioessais et microcosmes), de critères d'évaluation des effets sublétaux (biomarqueurs et traits d'histoire de vie) des pesticides sur les organismes aquatiques.
- d'identifier la nature des interactions entre les deux types de produits entrant dans la composition de mélanges herbicide-adjuvant de pulvérisation. Les effets de ce type de mélange sont très peu étudiés alors que c'est le plus souvent sous cette forme que les pesticides sont introduits dans l'environnement. Les mélanges fomesafen-Agral et diquat-Agral représentent des exemples types de mélanges de xénobiotiques susceptibles de contaminer les milieux aquatiques dans des situations réelles d'emploi en agriculture.

- de consolider la démarche d'évaluation du risque *a priori* en confrontant les résultats des bioessais monospécifiques à ceux obtenus dans des systèmes biologiques intégrés (microcosmes et mésocosmes) permettant les interactions entre organismes.



PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Les études ont porté sur deux espèces, un mollusque gastéropode, *Lymnaea stagnalis* et un poisson téléostéen *Gasterosteus aculeatus*. Considérées comme de bons modèles biologiques pour les investigations sur les effets des xénobiotiques sur diverses fonctions physiologiques (reproduction, croissance, comportement, etc.), ces deux espèces permettent également des études au niveau populationnel, et sont de ce fait d'un grand intérêt dans les démarches d'évaluation du risque écotoxicologique.

Deux types de systèmes expérimentaux, de complexité biologique différente, ont été mis en place en laboratoire (Fig. 2) :

- les *bioessais* monospécifiques, qui mettent simplement en présence l'espèce-modèle et les produits testés, dans l'eau ; la contamination des organismes se fait directement à partir du milieu ;
- les *microcosmes*, qui représentent des systèmes complexes où les organismes peuvent interagir entre eux et avec le milieu physique, notamment les sédiments où peuvent par ailleurs se dérouler des processus de biodégradation des xénobiotiques.

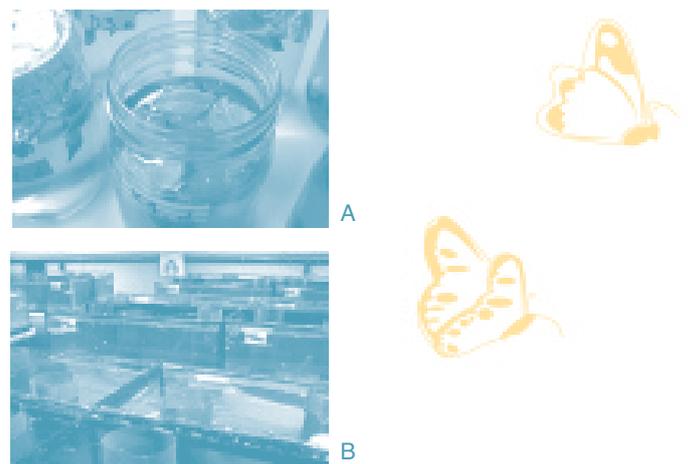
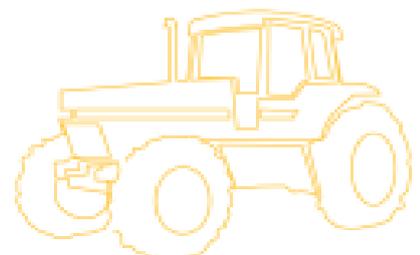


Figure 2. Dispositifs expérimentaux mis en œuvre pour aborder le changement d'échelle. A. Dispositif d'exposition monospécifique utilisé pour la mesure des traits d'histoire de vie chez la lymnée. B. Microcosmes



Les préparations commerciales FLEX Pack, comprenant 1 L de fomesafen (250 g/L) sous forme de sel de sodium et 0,6 L d'Agral® 90 (945 g/L de NPEOs), et Réglone 2 (200 g/L diquat dibromide) ont été utilisées. Ces produits étant miscibles dans l'eau, aucun solvant n'a été utilisé lors des traitements. Le fomesafen et le diquat ont été appliqués soit seuls, soit en mélange avec l'Agral, de manière à tester l'influence de ce dernier sur le devenir et les effets des herbicides. L'Agral a par ailleurs été utilisé seul, de façon à déterminer sa toxicité propre et de pouvoir caractériser les modalités de son interaction avec les deux herbicides.

Pour les bioessais, une gamme de concentrations croissantes en chacun des produits (fomesafen, diquat et Agral) a été choisie ; pour les mélanges, le rapport des concentrations correspond à celui recommandé par le fabricant dans les conditions d'emploi de chacun des produits en agriculture, à savoir 2,25. Les gammes de concentrations retenues sont donc 4,4, 22,2, 44,4, 222,2 et 444,4 µg/L pour le fomesafen et le diquat, et 10, 50, 100, 500 et 1000 µg/L pour l'Agral. Chaque concentration a été testée à raison de 3 à 4 réplicats. En microcosmes, du fait de la complexité des sys-

tèmes et pour des raisons de faisabilité, le nombre d'unités a été réduit : pour chacun des deux herbicides, seulement deux concentrations, choisies sur la base des résultats des bioessais, ont été testées, à savoir 44,4 et 222,2 µg/L, le mélange adjuvant/herbicide se faisant toujours avec le ratio 2,25. Deux réplicats ont été utilisés pour chaque modalité.

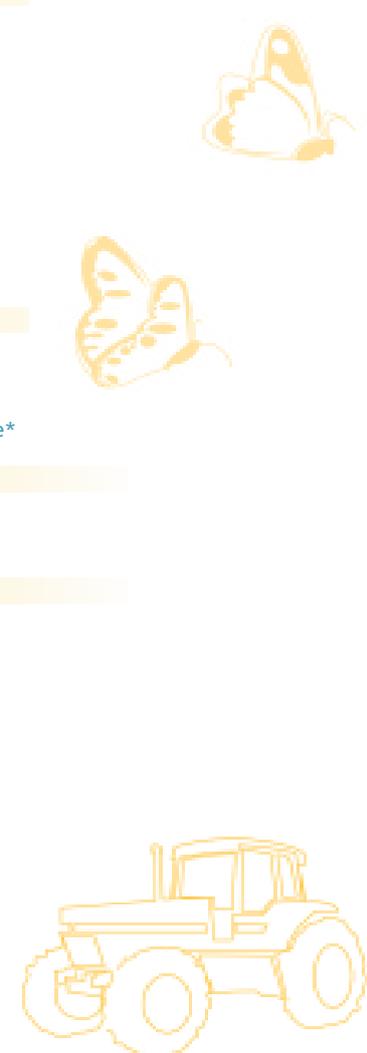
Pour la plupart des expérimentations, la durée d'exposition était comprise entre 2 et 30 jours. Les tests monospécifiques ont privilégié les courtes durées d'exposition (2 à 7 jours), afin de caractériser les réponses précoces, tandis que les microcosmes ont permis des études à plus long terme (jusqu'à 31 jours) et la mise en place d'un scénario d'exposition répétée.

Les variables biologiques mesurées pour évaluer les effets des traitements chez les deux espèces étudiées sont regroupées dans le Tableau 1. Pour les individus exposés en microcosmes, seuls les paramètres biologiques ayant montré des patterns de réponses exploitables lors des tests monospécifiques ont été mesurés.

Tableau 1. Variables biologiques retenues pour évaluer les effets des produits sur la lymnée (*L. stagnalis*) et l'épinoche (*G. aculeatus*).

Lymnée	Epinoche
Systèmes de défense	
	Monoxygénases à cytochrome P450 (EROD / PROD)* Glutathion S-transférases (GST)* Glutathion réduit / glutathion oxydé (GSH/GSSG)* Glutathion peroxydase (GPx)* Indicateurs de lipoperoxydation*
Glutathion réductase (GR)* Catalase* Production de ROS par les hémocytes* Caractéristiques du système lysosomal* Activité phagocytaire des hémocytes Apoptose des hémocytes	
Paramètres de régulation de la reproduction	
Taux de glycogène Activité glycogène-phosphorylase Histologie de la gonade	Taux de vitellogénine plasmatique*
Indicateurs d'état physiologique	
	Indice de condition Indices hépato- et gonadosomatique
Traits d'histoire de vie	
Croissance Fécondité* Taux de développement des embryons Taux d'éclosion des œufs	

* Variable mesurée à la fois dans les tests monospécifiques et en microcosmes.



Caractérisation de l'exposition aux herbicides

Les résultats des analyses chimiques montrent une bonne homogénéité des conditions d'exposition dans les tests monospécifiques, principalement pour le fomesafen, aussi bien du point de vue de la correspondance entre les concentrations mesurées dans l'eau et les concentrations nominales qu'en ce qui concerne le maintien de concentrations en herbicides relativement stables durant les 2 premiers jours qui suivent les traitements.

Dans les microcosmes, le comportement du fomesafen ne diffère pas radicalement des conditions des tests monospécifiques, avec un maintien de la concentration en herbicide sur les 15 premiers jours qui suivent les traitements. En revanche, comparativement aux tests monospécifiques, le diquat présente un comportement totalement différent, avec une chute importante de la concentration après 2 jours, ce qui laisse supposer un transfert rapide vers les sédiments, sans exclure toutefois une adsorption sur les parois des microcosmes.

La présence de l'Agral ne modifie pas de façon notable le comportement des herbicides dans les milieux d'exposition, mis à part dans le cas de la plus forte concentration en diquat (222,2 µg/L) pour laquelle la présence de l'adjuvant aurait tendance à stabiliser la concentration en herbicide dans l'eau.

Caractérisation des effets à l'échelle infra-individuelle

D'une manière générale, les réponses biochimiques et cellulaires restituent le mécanisme de toxicité de chacun des herbicides, caractérisé par la production d'espèces réactives de l'oxygène (directe dans le cas du diquat et liée à l'accumulation de protoporphyrines dans le cas du fomesafen). La cascade d'évènements initiée par les espèces réactives de l'oxygène (ROS) a pu être plus ou moins bien reconstituée, au travers de la mise en évidence d'altérations de la structure et de l'intégrité du système lysosomal, impliquant probablement de phénomènes de peroxydation lipidique. Ces altérations membranaires se traduiraient par des perturbations fonctionnelles, comme par exemple une inhibition de la phagocytose des hémocytes chez la lymnée. Dans le cas du diquat, l'exposition des lymnées pourrait être à l'origine d'un processus d'apoptose des hémocytes, qui toucherait 20% de la population cellulaire pour la concentration la plus forte (222,2 µg/L).

La prise en charge des ROS par les systèmes anti-oxydants s'est révélée plus efficace chez les épinoches, avec une induction des activités glutathion-peroxydase et glutathion S-transférase et une diminution de la concentration

en glutathion notamment en présence de fomesafen et du mélange fomesafen-Agral, que chez les lymnées, chez lesquelles seule l'activité glutathion-réductase s'est révélée sensible à certains des produits testés.

Altérations des traits d'histoire de vie des géniteurs et de leur descendance chez *L. stagnalis*

L'analyse, chez la lymnée, des répercussions des effets toxiques à l'échelle infra-individuelle sur l'expression des performances reproductives des géniteurs et de traits de vie précoces de leur descendance a montré un effet négatif global de la plus forte concentration en diquat et en mélange diquat-Agral sur la croissance des adultes, la fécondité (nombre d'œufs produit par individu), la durée du développement embryonnaire, et le taux d'éclosion des œufs.

Afin d'essayer de mieux comprendre l'origine de ces effets, deux études complémentaires ont été réalisées :

- une analyse histologique de l'ovotestis, qui a révélé une sorte de "féminisation" des acini gonadiques (dominante ovocytaire avec des nombreux ovocytes en prévitellogénèse et un nombre restreint d'ovocytes en vitellogénèse, perturbation importante de la lignée mâle, avec très peu de cellules nourricières, et de nombreux débris cellulaires dans les acini) ;
- la mesure de l'état des réserves énergétiques stockées sous forme de glycogène, qui a montré que l'absence d'effet du fomesafen était cohérente avec le fait que ni la croissance, ni la fécondité n'aient été affectées par cet herbicide. En revanche, l'absence de variations du taux de glycogène et de l'activité glycogène-phosphorylase ne restitue pas les effets du diquat et du mélange diquat-Agral observés sur les performances des géniteurs.

CONCLUSIONS

Effets interactifs entre les substances actives herbicides et l'adjuvant

En première approche, une analyse globale des résultats montre qu'en dépit de l'absence d'effet marqué de la présence de l'Agral sur le comportement du fomesafen et du diquat dans le milieu d'exposition, l'adjuvant a modifié les effets induits par l'herbicide seul, en agissant, dans la plupart des cas, sur l'amplitude de la réponse. Il s'avère que, pour les paramètres étudiés chez la lymnée et l'épinoche, l'hypothèse d'additivité, couramment admise, n'est que rarement vérifiée. Dans certains cas, la présence de l'adjuvant se traduit par une diminution de l'effet induit par l'herbicide seul. À l'inverse, l'adjuvant peut amplifier les effets des herbicides. Ce type d'observations amène à considérer soit l'effet "protecteur", soit le phénomène de synergie, dans la procédure d'évaluation du risque de ce type de mélanges.

L'analyse détaillée des effets interactifs entre herbicides et adjuvant a cependant été rendue difficile du fait que les modèles classiques d'étude des interactions entre toxiques utilisent des critères de toxicité létale comme des CE ou des CL₅₀. La prise en compte des effets sublétaux dans l'analyse des interactions entre xénobiotiques doit conduire à développer des méthodes alternatives d'analyse de ce type de données. Des tentatives en ce sens ont été faites.

Échelle d'observation et réalisme du scénario d'exposition

La comparaison du type et du niveau d'information obtenue dans les conditions de tests monospécifiques, de microcosmes de laboratoire et de mésocosmes extérieurs a permis de montrer que :

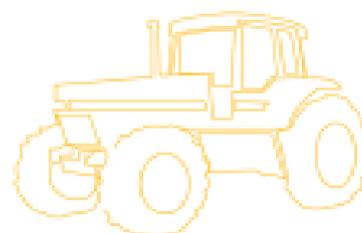
- le comportement des herbicides dans le milieu dépend fortement de la complexité biologique du contexte expérimental. En dépit des connaissances disponibles, notamment dans les dossiers de demande d'autorisation de mise sur le marché sur les propriétés physico-chimiques des pesticides et leur comportement dans l'environnement, le comportement d'une substance active dans le milieu d'exposition est difficilement prévisible, surtout lorsqu'elle est mélangée à d'autres xénobiotiques (autres substances actives, adjuvants de formulation, etc.). Le recours à l'analyse chimique reste donc indispensable pour caractériser l'exposition des organismes, et la mettre en relation avec les effets à différents niveaux d'organisation biologique.
- dans les micro- et mésocosmes, la complexité des conditions d'exposition a pour effet de tamponner les réponses des biomarqueurs, ce qui peut traduire une atténuation des effets physiologiques des produits testés. L'utilisation d'un plus grand volume d'eau, la présence de sédiments et de plantes, et l'introduction de dispositifs de maintien et/ou de prélèvement des organismes peuvent expliquer cet "effet tampon" dans la mesure où ce sont autant de facteurs susceptibles d'affecter la biodisponibilité des substances actives. Il n'est pas pour autant dénué d'intérêt de réaliser des mesures à l'échelle infra-individuelle sur certaines des espèces maintenues dans ces systèmes. En effet, les mesures de biomarqueurs peuvent apporter des informations sur la toxicité *in situ* des substances actives étudiées, permettant d'établir ensuite des relations avec des effets sur les performances individuelles (croissance et reproduction) et sur le devenir des populations dont le maintien n'est possible que dans des systèmes de type micro- ou mésocosmes.

Il est désormais admis que le choix des conditions d'exposition dépend en réalité des objectifs des études sur les effets des xénobiotiques.

S'il s'agit d'étudier les mécanismes de toxicité *in vivo*, il semble en effet judicieux d'optimiser les conditions d'exposition des organismes, et de choisir des critères d'observation qui permettent de caractériser les réponses à l'échelle moléculaire. Les outils de la toxicogénomique peuvent se révéler particulièrement efficaces dans ce type de démarche.

S'il s'agit d'évaluer le risque écotoxicologique d'un pesticide, qu'il soit seul ou en mélange avec d'autres xénobiotiques, la priorité est donnée non plus à la connaissance détaillée du mode d'action du (ou des) composé(s) en présence, mais plutôt à la caractérisation des effets globaux, en combinant des tests d'écotoxicité standardisés et des études en mésocosmes *outdoor*, dans des conditions aussi proches que possibles de la réalité. Dans ce contexte, il convient de s'interroger sur ce qu'apportent les microcosmes *indoor* dans la démarche d'évaluation du risque écotoxicologique.

Les microcosmes *indoor* permettent généralement de concevoir des conditions d'exposition comportant des sédiments et des organismes, en nombre limité, susceptibles ou non d'interagir entre eux ; ils sont placés dans des conditions artificielles, contrôlées, de température, d'éclairage, d'oxygénation, etc. Plus complexes que les tests monospécifiques, les microcosmes n'atteignent bien évidemment pas le niveau de réalisme des mésocosmes *outdoor*. Au regard de l'investissement que nécessite leur mise en œuvre, ils restent donc peu informatifs du point de vue de l'évaluation réglementaire du risque écotoxicologique. En revanche, en tant qu'outils de recherche, ils permettent de caractériser des mécanismes complémentaires de ceux qu'il est possible d'étudier dans les conditions de tests monospécifiques comme par exemple le transfert de contaminants le long d'une chaîne trophique expérimentale ou l'identification des phases critiques du cycle de vie d'espèces pouvant se développer, voire même accomplir plusieurs générations, dans ces systèmes. Ces deux types d'informations sont directement exploitables pour le développement et la calibration de modèles de bioaccumulation/bioamplification et de modèles de changement d'échelle d'organisation biologique appliqué à la caractérisation des effets des xénobiotiques.





FORMATION

Thèse de Doctorat

Guerlet E., 2007. Utilisation de biomarqueurs cellulaires chez plusieurs espèces d'invertébrés pour l'évaluation de la contamination des milieux dulçaquicoles. Thèse de Doctorat (discipline Ecotoxicité et Biodiversité), Université Paul Verlaine - Metz, 317 p.

Rapports de stages

Bouétard A., 2005. Mise au point d'une méthode spectrofluorimétrique utilisant l'acridine orange pour mesurer la fragilité des lysosomes d'hémocytes de limnées. Rapport de stage de L3 en Biologie Cellulaire, Université de Rennes 1.

Bouétard A., 2005. Mesure de la fragilité lysosomale en spectrofluorimétrie : validation de la méthode à l'acridine orange sur des hémocytes de limnées exposées à des herbicides. Rapport de stage de L3 en Biologie Cellulaire, Université de Rennes 1

VALORISATION

Articles scientifiques :

Russo J., Lefeuvre-Orfila L. & Lagadic L., 2007. Hemocyte-specific responses to the peroxidizing herbicide fomesafen in the pond snail *Lymnaea stagnalis* (Gastropoda, Pulmonata). *Environmental Pollution*, 146: 420-427.

Sanchez W., Palluel O., Lagadic L., Ait-Aïssa S. & Porcher J.-M., 2006. Biochemical effects of nonylphenol polyethoxylate adjuvant, diquat herbicide and their mixture on the three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.). *Marine Environmental Research*, 62: S29-S33.

Coutellec M.-A., Coeurdassier M., de Vaufléury A., Delous G., Cravedi J.-P. & Lagadic L. Effects of the mixture between diquat and a nonylphenol polyethoxylate adjuvant on life-history traits of the pond snail *Lymnaea stagnalis* in laboratory bioassays and microcosms (en préparation).

Gorzerino C., Quemeneur A., Azam D., Caquet Th. & Lagadic L. Effects of fomesafen and diquat applied alone and in combination with a nonylphenol polyethoxylate adjuvant on *Lemna minor* in aquatic indoor microcosms (en préparation).



Communications dans des congrès

Lefeuvre-Orfila L., Russo J., Heydorff M. & Lagadic L., 2004. Effects of fomesafen and fomesafen-Agral 90 mixture on cell redox environment in the pond snail *Lymnaea stagnalis*. *SETAC 4th World Congress, Portland*, 14-18 November 2004.

Russo J. & Lagadic L., 2004. Effects of fomesafen (diphenyl ether) on the phagocytic activity and lysosomal fragility of hemocytes in the pond snail *Lymnaea stagnalis*. *SETAC 14th Europe Annual Meeting, Prague*, 18-22 April 2004.

Lagadic L. & Russo J., 2005. Inhibition of hemocyte-mediated immune functions in *Lymnaea stagnalis* exposed to the diphenylether herbicide fomesafen. *SETAC Europe 15th Annual Meeting, Lille*, 22-26 May 2005.

Lefeuvre-Orfila L., Russo J., Heydorff M. & Lagadic L., 2005. Cell redox environment and detoxication enzyme activities in *Lymnaea stagnalis* exposed to diquat and fomesafen with and without Agral® 90. *SETAC Europe 15th Annual Meeting, Lille*, 22-26 May 2005.

Russo J., Lefeuvre-Orfila L., Heydorff M. & Lagadic L., 2005. The adjuvant Agral® 90 as a modulator of hemocyte-mediated immune responses induced by diquat and fomesafen in *Lymnaea stagnalis*. *SETAC Europe 15th Annual Meeting, Lille*, 22-26 May 2005.

Sanchez W., Palluel O., Lagadic L., Cravedi J.-P. & Porcher J.-M., 2005. Biochemical effects of nonylphenol polyethoxylate adjuvant and adjuvant herbicide mixtures on three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.). *13th International Symposium on Pollutant Responses In Marine Organisms (PRIMO), Alessandria, June* 2005.



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Mylène WEILL**

Institut des Sciences de l'Evolution
Montpellier (ISEM)
UMR 5554, Université Montpellier 2,
Place E. Bataillon, 34095 Montpellier
cedex 5
04 67 14 32 62
weill@isem.univ-montp2.fr

PARTENAIRES**INSTITUT DES SCIENCES DE L'ÉVOLUTION (ISEM), Montpellier**

C. Bernard, C. Berticat, O. Duron, P. Labbe, M. Raymond, S. Unal

Chercheurs en collaboration :

P. Fort

Centre de Recherche en Biochimie des
Macromolécules, Montpellier

K. Bourtzis

Department of Environmental and
Natural Resources, University
of Ioannina, Grece

A. Boureux

Institut de Génétique Humaine,
Montpellier

ACTION DIRECTE ET INDIRECTE DES INSECTICIDES SUR LES BACTÉRIES ENDOCELLULAIRES ALTÉRANT LA SEXUALITÉ DES INSECTES

**MOTS CLÉS**

Moustiques - Résistance aux insecticides - *Wolbachia* -
Lutte biologique anti-vectorielle

**OBJECTIFS**

Le projet proposait d'analyser l'interaction entre la résistance aux insecticides du moustique *Culex pipiens* et son niveau d'infection par les bactéries endocellulaires *Wolbachia*. Il s'agissait notamment d'évaluer l'influence de ces bactéries sur la résistance aux insecticides, sur les effets délétères qui y sont associés et sur les phénotypes d'incompatibilité.

**PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE**

Les bactéries endocellulaires *Wolbachia* infectent de nombreux arthropodes et manipulent leur sexualité de telle sorte qu'elles avantagent le sexe femelle qui les transmet verticalement. Chez le moustique *C. pipiens*, les *Wolbachia* provoquent des incompatibilités cytoplasmiques (IC) qui entraînent un arrêt précoce du développement embryonnaire. Ces IC sont mises en évidence lors de croisements entre mâles infectés et femelles non infectées ou entre des individus infectés par des souches de *Wolbachia* incompatibles.

Nous avons montré que le taux d'infection des moustiques par *Wolbachia* dépend fortement de l'âge, du sexe, et de la résistance aux insecticides. Le taux de *Wolbachia* est plus élevé dans les souches résistantes quel que soit le mécanisme de résistance présent dans le moustique, estérases surproduites ou cible modifiée. Nous pensons qu'il ne s'agit pas d'une implication directe des produits des gènes de résistance avec les bactéries, mais plutôt d'un coût physiologique global associé à la résistance. Les moustiques résistants se défendraient moins bien contre l'infection par *Wolbachia*. Nous voulions dans ce programme, évaluer l'influence de ces bactéries sur la résistance aux insecticides, sur les effets délétères qui y sont associés et sur les phénotypes d'incompatibilité.

Par comparaison de souches sensibles et résistantes aux insecticides, infectées ou non par *Wolbachia*, nous avons montré que le taux d'infection par *Wolbachia* n'influence pas le degré d'incompatibilité cytoplasmique lors de croisements, ni le niveau de résistance aux insecticides des souches. L'étude de nombreux traits d'histoire de vie (mortalité larvaire, taille et fécondité des femelles, échappement à la prédation et compétition sexuelle)



montre que les fortes infections associées à certains allèles de résistance augmentent le fardeau génétique porté par les moustiques.

Au cours de ce programme, le séquençage d'un génome de *Wolbachia* de *C. pipiens* (wPip) nous a permis d'identifier des séquences polymorphes qui ont conduit à la caractérisation génétique de nombreux variants *Wolbachia* chez cette espèce. Cette découverte nous a ré-orienté sur l'étude des bases moléculaires de l'IC. En effet, l'identification de gènes responsables de l'IC pourrait permettre la découverte de nouveaux composés «biocides» représentant une alternative aux insecticides chimiques. Par ailleurs, l'IC confère un fort pouvoir invasif aux *Wolbachia* qui sont aujourd'hui envisagées comme vecteurs de transgènes efficaces en lutte anti-vectorielle. En effet, les avancées technologiques récentes ont développé des moustiques transgéniques non infectables par les pathogènes responsables de certaines maladies. Le problème est maintenant de répandre ces moustiques modifiés dans les populations naturelles et les *Wolbachia* pourraient aider cette invasion.

L'étude de la dynamique évolutive des *Wolbachia* en populations naturelles permettra de mesurer le pouvoir invasif de certains variants bactériens et donc d'évaluer le rôle potentiel des *Wolbachia* en lutte anti-vectorielle.

Nos travaux ont permis d'expliquer la forte complexité de l'IC décrite chez *C. pipiens* qui était incomprise au début de ce programme, voire même attribuée à d'autres facteurs que *Wolbachia* dans la littérature. Cette complexité est due essentiellement aux très nombreux variants *Wolbachia* qui infectent les populations naturelles de moustique. Nos études moléculaires n'ont pour l'instant pas permis d'identifier les gènes responsables de l'incompatibilité mais la caractérisation claire des relations d'IC de 14 souches entre elles nous donne des bases solides pour tester les corrélations entre le polymorphisme moléculaire et l'IC. Les premières études de la dynamique des *Wolbachia* en populations naturelles ont montré la coexistence de très nombreux variants dans le sud de l'Europe (Figure 1). L'étude de la répartition géographique dans de nombreuses populations à l'échelle mondiale permettra de mesurer le pouvoir invasif de certains variants.

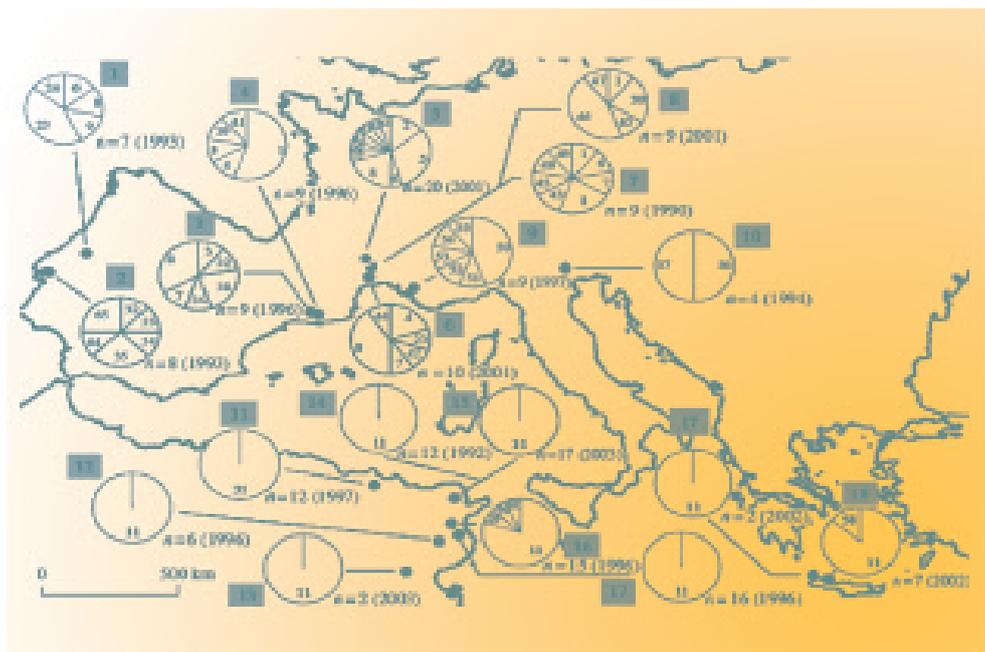
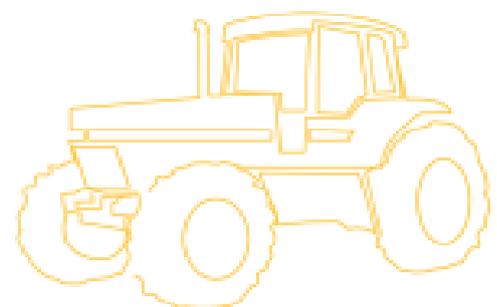


Figure 1. Distribution des variants de *Wolbachia* en populations naturelles de moustiques *C. pipiens*. Chaque cercle représente une population. Le nombre d'individus analysés et la

date de collecte sont indiqués à côté de chaque cercle. Les variants présents sont indiqués par des numéros notés dans les cercles.



VALORISATION

Articles scientifiques

Duron O., Lagnel J., Raymond M., Bourtzis K., Fort P. & Weill M., 2005. Transposable element polymorphism of *Wolbachia* in the mosquito *Culex pipiens*: evidence of genetic diversity, super-infection and recombination. *Molecular Ecology*, 14: 1561-1573.

Duron O., Fort P. & Weill M., 2006. Hypervariable prophage WO sequences describe an unexpected high number of *Wolbachia* variants in the mosquito *Culex pipiens*. *Proceedings of the Royal Society of London - Series B*, 273: 495-502.

Duron O., Bernard C., Unal S., Berthomieu A., Berticat C. & Weill M., 2006. Tracking factors modulating cytoplasmic incompatibilities in the mosquito *Culex pipiens*. *Molecular Ecology*, 15: 3061-3071.

Duron O., Labbé P., Berticat C., Guillot S., Raymond M., Rousset F. & Weill M., 2006. High *Wolbachia* density correlates with cost of infection for insecticide resistant *Culex pipiens* mosquitoes. *Evolution*, 60: 303-314.

Duron O., Fort P. & Weill M., 2007. Influence of aging on cytoplasmic incompatibility, sperm modification and *Wolbachia* density in *Culex pipiens* mosquitoes. *Heredity*, 98: 368-374.

Duron O., Boureux A., Echaubard P., Berthomieu A., Berticat C., Fort P. & Weill M., 2007. Variability and expression of ankyrin domain genes in *Wolbachia* infecting the mosquito *Culex pipiens*. *Journal of Bacteriology*, 189: 4442-4448.

Communications dans des congrès

Duron O., 2003. Impact of high *Wolbachia* density in insecticide resistant mosquito *Culex pipiens*. *25e Conférence du Petit Pois Dérivé*, Toulouse, Août.

Duron O., 2004. *Wolbachia* density and insecticide resistance in the mosquito *Culex pipiens*. Groupe de travail *Procaryotes-Eucaryotes du Réseau d'Écologie des Interactions Durables*, CNRS, Lyon, Février.

Duron O., 2004. World distribution and genetic distribution of *Wolbachia* inducing cytoplasmic incompatibilities in the mosquito *Culex pipiens*. *3rd International Conférence on Wolbachia, Heron Island, Australia*, Aout.

Duron O., 2005. Cytoplasmic incompatibilities and genetic polymorphism of *Wolbachia* infecting the mosquito *Culex pipiens*. *Réseau d'Écologie des Interactions Durables*, CNRS, Lyon, Janvier.

Duron O., 2006. Is the *Wolbachia - Culex pipiens* symbiosis paradoxical ? *4th International Conférence on Wolbachia*, Porto Rico, Août.



La maîtrise des risques que présentent les pesticides repose en partie sur le développement de pratiques/itinéraires techniques ou de méthodes alternatives permettant de limiter, voire de supprimer, le recours à ceux-ci. Deux projets de recherche se sont intéressés à cette question et ont proposé des itinéraires ou des stratégies culturelles innovants.

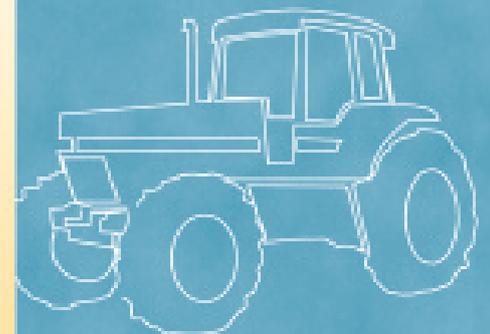


46

- Étude et modélisation des liens entre traitements phytosanitaires, opérations culturales, caractères des fruits ou de la plante et contamination par les monilioses en verger de pêchers en vue d'une protection durable - **Françoise Lescourret (INRA Avignon)**

50

- Conduite intégrée du colza d'hiver pour une réduction de l'utilisation des pesticides - **Muriel Valantin-Morison (INRA Grignon)**



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

Françoise LESCOURRET
 INRA, Unité Plantes et Systèmes de
 culture Horticoles (UR 1115 PSH)
 Domaine Saint-Paul, site Agroparc,
 84914 Avignon cedex 9
 04 32 72 24 53
 lescou@avignon.inra.fr

PARTENAIRES

**INRA, Unité Plantes et Systèmes de
 Culture Horticoles, UR 1115 PSH, Avignon**
 C. Gibert, D. Plénet, M. Génard,
 G. Vercambre, L. Gomez
**INRA, Unité Expérimentale de Re-
 cherches Intégrées, UE 695, Gothéron**
 C. Bussi, V. Mercier, J. Besset
**INRA, Unité Biostatistiques et Processus
 Spatiaux, UR 546, Avignon**
 J. Chadoeuf, M. Dapp, S. Ambrosino,
 E. Néraudeau, S. Rivière

ÉTUDE ET MODÉLISATION DES LIENS ENTRE OPÉRATIONS CULTURALES, CARAC- TÈRES DES FRUITS OU DE LA PLANTE ET CONTAMINATION PAR LES MONILIOSES EN VERGER DE PÊCHERS EN VUE D'UNE PROTECTION DURABLE

**MOTS CLÉS**

Pêche - Moniliose - Fissure cuticulaire - Conductance -
 Croissance du fruit - Qualité du fruit - Irrigation - Restriction
 hydrique - Éclaircissage - Arrachage manuel

**OBJECTIFS**

L'arboriculture fruitière, exemplaire pour l'intensité de sa protection phytosanitaire chimique, et plus précisément la culture de pêchers et une de ses maladies majeures, les monilioses, ont été choisis comme cas d'étude pour ce programme. Nous avons mis en regard opérations culturales, performances sanitaires et agronomiques (qualité organoleptique des fruits notamment), ces deux dernières catégories de performances devant être examinées ensemble pour une perspective de protection et de production durables.

**LES OBJECTIFS POURSUIVIS ONT ÉTÉ LES SUIVANTS :**

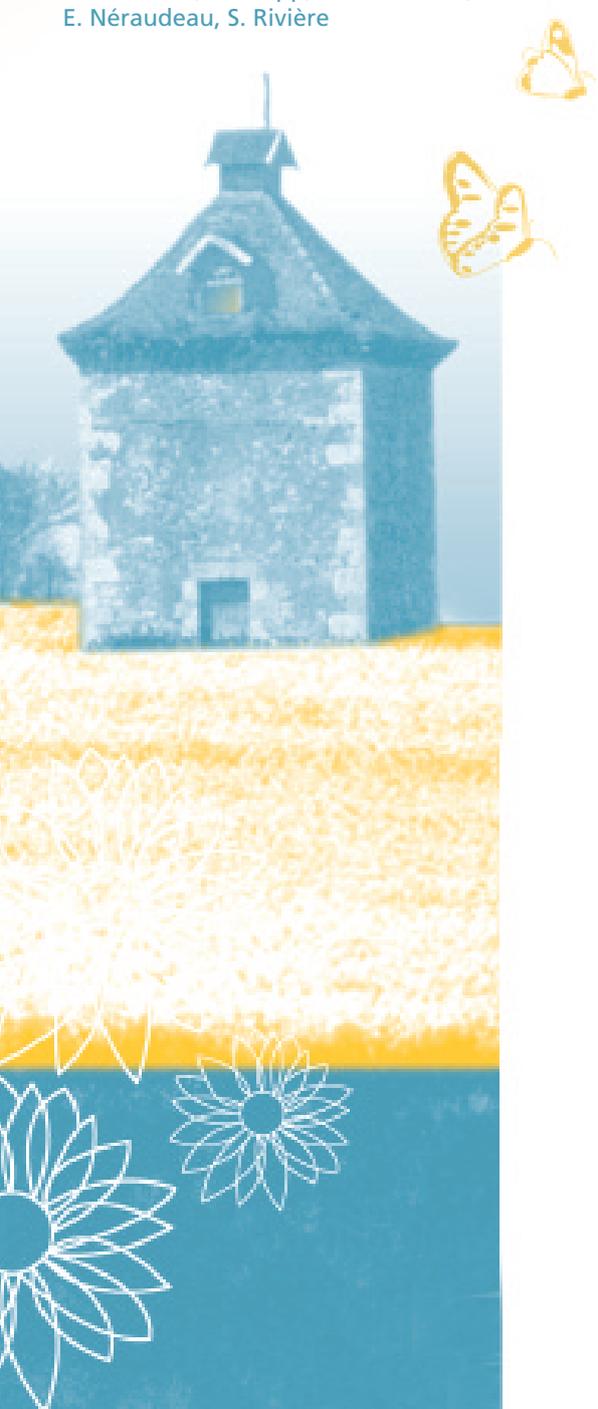
Au niveau des fruits, étudier comment les fissures cuticulaires se génèrent sur l'épiderme sous l'influence des opérations de gestion de la charge en fruits et d'irrigation et participent au développement des monilioses (ce sont des voies d'entrée des conidies) et à la qualité de la récolte (comme voies de sortie de l'eau, elles contribuent à la conductance de l'épiderme des pêches à la vapeur d'eau, un moteur important de la qualité organoleptique). Il s'agissait également d'utiliser les connaissances acquises pour mettre au point un modèle et l'utiliser pour évaluer en simulation différents scénarios techniques sur un profil de caractères du fruit alliant critères de qualité organoleptique et potentiel de conservation.

Au niveau de la plante, étudier comment les opérations d'irrigation et de conduite des arbres modulent le développement des monilioses tout en examinant les conséquences sur les performances agronomiques des pêchers.

**PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE**

Génération de fissures cuticulaires sur la pêche en réponse à des opérations culturales. Conséquences pour la qualité et la contamination par les monilioses

Pour alimenter cette partie, nous avons réalisé entre 2003 et 2005 sept expérimentations de traitements de



charge et d'irrigation contrastés, sur une pêche blanche précoce (cv. Alexandra) et une nectarine blanche tardive (cv. Zéphir). D'autres données expérimentales acquises en 2002 sur ces deux variétés ont été utilisées. Nous avons effectué sur les fruits des mesures régulières de croissance, de transpiration, des comptages de stomates, des mesures de surfaces de fissures, des suivis de cicatrisation des fissures, des analyses de qualité organoleptique (masses, teneur en matière sèche, concentrations en sucres) et des inoculations artificielles de conidies de monilioses.

Les résultats indiquent que les fissures apparaissent durant la phase finale de croissance du fruit. Leur densité peut être très élevée et dépend fortement de la croissance modulée par les opérations culturales : plus de 10% de la surface totale du fruit pour de faibles charges ou des irrigations abondantes et moins de 4% pour des fortes charges ou des irrigations restreintes. Nous avons conçu et paramétré un modèle d'évolution de la conductance cuticulaire, piloté par la croissance du fruit, avec une composante stomatique, une composante cuticulaire et une composante « fissures », qui peut aller jusqu'à 60% de la conductance totale, fondée sur le différentiel de croissance entre la peau et la pulpe et sur des hypothèses simples sur le processus de cicatrisation. Ce modèle a été amélioré grâce à la mesure précise de ses différentes composantes. Sa deuxième version rend bien compte de « patterns » de fissures et de conductance différant selon les opérations de charge et d'irrigation.

L'analyse de l'infection des nectarines suite aux inoculations artificielles a indiqué que l'humidité ambiante n'expliquait pas la variabilité observée, alors que le produit de la densité de conidies pulvérisées et de la surface de fissures cuticulaires sur le fruit, représentant le nombre de conidies dans les fissures, s'est révélé être un bon candidat à l'explication de l'infection. La probabilité d'infection d'un fruit selon ce produit a été modélisée par régression logistique, en prenant en compte la densité de conidies naturellement présente au verger (pseudo $R^2 = 65\%$).

Les modèles décrivant l'évolution de la conductance, la génération des fissures cuticulaires, et la probabilité d'infection d'un fruit par les monilioses, ont été intégrés à un modèle existant de pêche virtuelle¹⁰ capable de simuler la croissance et la qualité organoleptique, notamment l'accumulation des différents sucres dans le fruit. Le modèle final permet de simuler les performances de qualité et le potentiel de conservation des fruits en réponse à des conditions de croissance contrastées. Un total

de 243 scénarios combinant des choix techniques relatifs à la variété, à la date d'éclaircissage, à la charge en fruits, à l'irrigation, et au contrôle sanitaire des monilioses, ont été testés et évalués à la vue de leurs performances simulées à la récolte tant au niveau économique (chiffre d'affaires), qu'au niveau du profil de qualité des fruits (caractère sucré, teneur en matière sèche de la pulpe, ratio de pulpe par fruit, et densité de fissures cuticulaires indicatrice d'altération potentielle du fruit en conservation), du risque de perte de récolte (probabilité d'infection) et de la possibilité ou non de réduire les traitements fongicides. Les scénarios les plus intéressants dans une optique de production intégrée comportent des stress hydriques en fin de croissance du fruit. Ils produisent des fruits plus petits que les scénarios classiques, mais avec une faible densité de fissures cuticulaires, un fort caractère sucré, une forte teneur en matière sèche dans la pulpe et un ratio de pulpe par fruit élevé.

Effets de l'irrigation et de la conduite de l'arbre sur le développement des monilioses et les performances agronomiques du pêcher

Le pêcher nécessite une forte vigueur pour l'obtention d'une production économiquement rentable. Mais une vigueur mal contrôlée conduit à un excès de croissance végétative provoquant un auto-ombrage très défavorable à la qualité des fruits et par contre favorable au développement de maladies telles que les monilioses. L'INRA, en partenariat avec le développement agricole, a démarré des expérimentations pour tester un nouveau concept de conduite du pêcher: l'arrachage manuel¹¹. Ce mode de conduite tend à positionner les fruits vers l'extérieur de la frondaison et à augmenter la porosité du couvert, ce qui est susceptible d'améliorer la qualité des fruits. Par ailleurs, cette gestion de l'arbre et du complexe parasitaire qui lui est associé est en très forte interaction avec la gestion des intrants, notamment de l'eau. Le pilotage des apports d'eau doit permettre de moduler la croissance en fonction du développement du végétal. Il nécessite l'utilisation d'indicateurs : les mesures micromorphométriques du diamètre des charpentières (méthode Pépista).

Pour intervenir sur la qualité des fruits et la sensibilité du verger aux monilioses de manière significative, il semble nécessaire d'utiliser une combinaison raisonnée de techniques. Dans ce programme, nous avons étudié expérimentalement l'effet sur la qualité des fruits et leur sensibilité aux monilioses de la combinaison « conduite de l'arbre – irrigation » de 2003 à 2005. Une parcelle de 3500 m² de pêchers plantés en 2000 (nectarine jaune tardive, cv. Nectaross) a été découpée en 4 blocs

10-Lescourret F., Génard M., 2005. A virtual peach fruit model simulating changes in fruit quality during the final stage of fruit growth. *Tree Physiology*, 25 : 1303-1315.

11-Navarro E., Plénet D., 2002. Taille en vert du pêcher : l'arrachage manuel précoce des pousses végétatives est-il une technique alternative ? *Reussir Fruits et Légumes*, 209 : 38-41.



comprenant 4 traitements constitués d'une combinaison de 2 facteurs taille et irrigation avec chacun 2 modalités : taille classique (TAIL) ou arrachage manuel (ARR), irrigation selon bilan hydrique (IRR) ou selon micromorphométrie Pépista (PEP). Les techniques innovantes ne pénalisent pas les temps de travaux en matière de conduite des arbres (ARR par rapport à TAIL), et permettent de limiter les quantités d'eau apportées à la parcelle à seulement environ 1/3 des quantités apportées pour la parcelle témoin (PEP par rapport à IRR). Après 3 années d'essai, la vigueur des arbres ne paraît influencée ni par la restriction hydrique, ni par l'effeuillage important dû à l'arrachage manuel. Ceci indique qu'une restriction en eau et en organes végétatifs disponibles ne pénalise pas définitivement la croissance globale de la plante. Le pêcher aurait une capacité à développer une "récupération" de croissance après que celle-ci ait été momentanément limitée. La restriction hydrique pendant la phase de grossissement du fruit présente l'avantage d'améliorer la récolte sa teneur en sucres ainsi que le pourcentage de fruits de premier choix (indemnes de défauts), en limitant légèrement mais non significativement le calibre des fruits. Le rendement n'est pas pénalisé par la restriction hydrique, en partie du fait de la limitation de la chute des fruits induite et particulièrement marquée au stade de la prématurité. L'arrachage manuel ne diminue que légèrement le calibre du fruit à la récolte, en revanche, sa teneur en sucres est améliorée et le rendement en fruits est nettement augmenté.

48

Les techniques culturales innovantes (PEP et ARR) diminuent significativement, par rapport aux techniques culturales les plus utilisées (IRR et TAIL), l'incidence des monilioses au verger (moins de 5% contre 12 à 14% à la récolte pour les 3 années d'étude) et en conservation. Nous faisons l'hypothèse que l'effet de l'arrachage manuel, qui se produit de 3 semaines à 7 jours avant la récolte, concerne l'induction et la germination des conidies de monilioses tandis que l'irrigation conduite par Pépista agirait dans les derniers jours juste avant la récolte en limitant les fissures sur l'épiderme des fruits.

ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Trois années d'étude par une équipe de taille modeste sur un sujet entièrement nouveau et complexe ne permettent pas de proposer des solutions « clés en main » en garantissant leur efficacité. L'utilisation de ces résultats par les acteurs concernés des filières fruits suppose d'autres étapes. Cependant nous considérons que les acquis de ce programme sont capables d'intéresser les acteurs de la filière :

- Nous avons montré que la gestion de la charge en fruits et l'irrigation permettaient de moduler la susceptibilité des pêches aux monilioses (en ce qu'elle est liée à la densité de fissures sur l'épiderme) et nous avons créé un outil de simulation des performances de qualité et du potentiel de conservation des fruits à la récolte en réponse à divers choix techniques. Cet outil, qui reste à perfectionner et mettre à l'épreuve, est intéressant pour les producteurs et les expérimentateurs. Il pourrait permettre de s'affranchir dans un premier temps de l'expérimentation pour identifier les scénarios présentant les meilleurs compromis en terme de qualité des fruits et de minimisation de l'usage des pesticides et de l'eau. La mise en place d'expérimentations permettrait ensuite de valider ou d'infirmer ces propositions (et de faire évoluer le modèle) ;
- Nous avons montré qu'un nouveau mode de conduite de pêcher et un pilotage de l'irrigation allant dans le sens d'une restriction hydrique raisonnée pendant la phase de grossissement du fruit, pouvaient conduire à une forte réduction du développement des monilioses tout en favorisant certains traits de qualité de la pêche et notamment la teneur en sucres. L'adoption de ces méthodes suppose leur optimisation et de l'accompagnement technique, voire financier par les pouvoirs publics.

La simulation de scénarios pour la partie de l'étude centrée sur les fruits (1^{er} volet) et l'expérimentation au niveau plus global du verger (2^e volet) aboutissent à des conclusions similaires : des restrictions hydriques durant le grossissement du fruit améliorent le profil de qualités et notamment la teneur en sucres, et limitent le développement des monilioses et donc la nécessité du recours aux fongicides. Mais le risque associé est la perte de calibre. Ceci met au jour la nécessité d'une évolution des standards actuels du marché (prédominance du calibre dans le prix de vente, pas de rémunération des sucres).

FORMATION

Thèse de Doctorat

Gibert C., 2007. Génération de fissures cuticulaires sur la pêche (*Prunus persica* (L.) Batsch) en réponse à des opérations culturales. Conséquences pour la qualité et la contamination par les monilioses. Thèse de doctorat, Université d'Avignon, 154 p. (à soutenir en octobre 2007).



VALORISATION

Articles scientifiques

Gibert C., Lescourret F., Génard M., Vercambre G. & Pérez-Pastor A., 2005. Modelling the effect of fruit growth on surface conductance. *Annals of Botany*, 95: 673-683.

Gibert C., Chadoeuf J., Vercambre G., Génard M. & Lescourret F., 2007. Cuticular cracking on nectarine fruit surface: spatial distribution and development in relation to irrigation and thinning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132: 1-8.

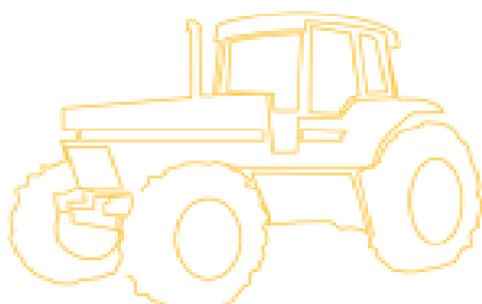
Mercier V., Bussi C., Plénet D. & Lescourret F. Effects of irrigation deprivation and manual pruning on incidence of brown rot and agronomical performances in peach (*Prunus persica* (L.) Batsch, cv. Nectaross). *Crop Protection* (en révision).

Communications dans des congrès

Mercier V. & Bussi C., 2006. Effect of cropping practices on brown rot in peach orchard. Colloque IOBC, 2-4 octobre, Balandran.

Publications de transfert

Mercier V., Gueldry H., Néraudeau E. & Chauffour D., 2005. Taille, irrigation et monilioses du pêcher. *Phytoma-La Défense des Végétaux*, 581: 40-41.



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Muriel VALANTIN-MORISON**INRA, UMR d'Agronomie
78850 Thiverval-Grignon
01 30 81 53 51
morison@grignon.inra.fr**PARTENAIRES****UMR 1248 INRA-ENSAT Agrosystèmes
Cultivés et Herbagers (ARCHE), Toulouse**

J.N. Aubertot

UMR INRA –**UNIVERSITÉ PIERRE MENDES FRANCE,**
Laboratoire d'Économie Appliquée de
Grenoble (GAEL)

S. Lemarié, A. Lacroix

**Centre Technique Interprofessionnel des
Oléagineux Métropolitains (CETIOM),**

Centre de Grignon

M. Taverne, R. Reau, X. Pinochet, L.

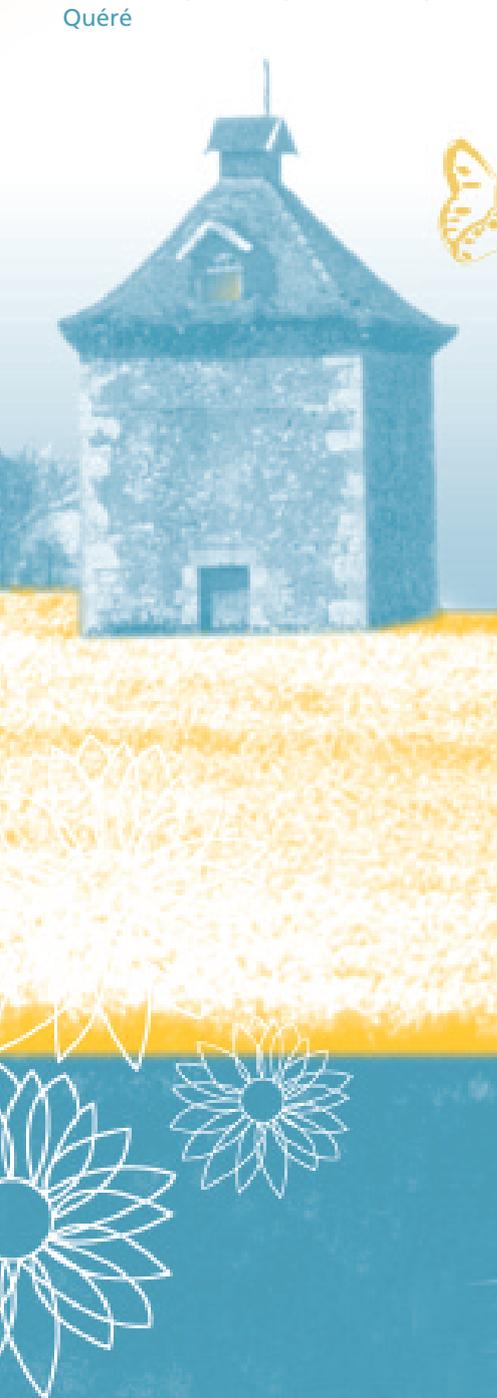
Quéré

CONDUITE INTEGRÉE DU COLZA D'HIVER POUR UNE RÉDUCTION DE L'UTILISATION DES PESTICIDES

MOTS CLÉSColza - Bioagresseurs - Réduction des pesticides -
Protection intégrée - Système de culture - Contrôle cul-
tural - Modèle**OBJECTIFS**

Malgré les qualités agronomiques de cette culture et bien que les surfaces en colza augmentent et que la progression de la marge nette soit importante ces dernières années, la culture du colza pâtit des faibles rendements du début des années 2000. Durant cette période la production de colza en agriculture conventionnelle a été confrontée à un problème de rentabilité, le coût de production étant trop élevé en regard du gain du produit brut de la culture (prix de vente + primes PAC alignées sur celles des céréales). Les produits phytosanitaires constituent une des dépenses majeures (avec les engrais et l'amortissement du matériel) pour la culture de colza ; ils représentent près de 20% du coût total (tableau 2). Parmi les grandes cultures (céréales, oléagineux, pommes de terre et betteraves), le colza est la culture pour laquelle les pesticides pèsent le plus lourd dans le coût de production. Elle consomme 9% des pesticides vendus en France, alors qu'elle n'occupe que 4% de la SAU. Les qualités agronomiques de cette culture, sa place dans l'exploitation et sa baisse de rentabilité récente justifient la nécessité d'inventer de nouvelles manières de produire, rentables et moins polluantes.

Le programme décrit ici a consisté à (i) acquérir des connaissances complémentaires sur les effets de systèmes de culture sur deux bioagresseurs jugés comme prioritaires, les mauvaises herbes et le phoma, afin de les intégrer dans le modèle, (ii) établir une synthèse sur les connaissances acquises et, à partir des résultats existants, des résultats nouveaux obtenus dans le cadre du programme et de la littérature, bâtir le modèle global composé d'un module agronomique et un module économique, (iii) Élaborer les itinéraires techniques intégrés à partir du modèle, évaluer leurs résultats économiques et environnementaux et les confronter aux pratiques actuelles, qu'il aura fallu au préalable inventorier et évaluer. L'ensemble de ces travaux sera présenté dans les parties A et B des résultats scientifiques de ce rapport. En outre, le projet avait également pour objectif d'identifier les freins à l'adoption d'itinéraires techniques intégrés. Sur ce plan, un travail préliminaire sur le fonctionnement du conseil auprès d'agriculteurs a été effectué par enquêtes et sera développé dans ce rapport dans la partie C des résultats scientifiques.



PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Le bilan des pratiques de protection phytosanitaires actuelles a été réalisé sur la base d'une analyse des bases de données SCEES de 1994 et de 2000. Le calcul de l'IFT (indice de fréquence de traitement) a permis de montrer que malgré une augmentation du nombre de produits pesticides appliqués (presque un produit en plus), l'IFT est resté quasi-stable autour de 6. Ce constat met en évidence que les traitements s'effectuent à des doses moindres : en 1994, ils sont à 87% de la dose homologuée ; en 2001 à 78%. Les insecticides, bien qu'ils restent la catégorie la plus utilisée, ont vu leur IFT se réduire. Ce sont surtout les herbicides qui sont en hausse, tant en nombre qu'en intensité ; cette hausse tient vraisemblablement au remplacement d'un passage de charrue. Le nombre de traitements fongicides progresse ; ceci tient vraisemblablement au fait que l'emploi des fongicides sur colza n'a débuté qu'à la fin des années 80.

CONSTRUCTION D'UN MODÈLE BIOÉCONOMIQUE

Beaucoup des travaux déjà réalisés et répertoriés dans la bibliographie ont été menés par *ennemi des cultures*, et aucune intégration globale des connaissances dans la conception d'itinéraires techniques peu consommateurs de produits phytosanitaires n'a été réalisée. Cette intégration est indispensable, de manière à vérifier la cohérence des différentes solutions envisagées par *ennemi des cultures* dans un itinéraire technique global. En particulier il est nécessaire de s'assurer que (i) certains itinéraires techniques peuvent être adaptés à une situation pédoclimatique donnée et non dans une toute autre situation (ii) qu'il est possible de trouver un compromis lorsque certaines pratiques agricoles ont des effets antagonistes entre plusieurs bioagresseurs et (iii) que les itinéraires techniques qui s'avèreraient intéressants du point de vue de l'utilisation des produits phytosanitaires le sont aussi sur les autres composantes environnementales (en particulier les pertes d'azote), et sur d'autres critères agronomiques et économiques. C'est pour toutes ces raisons qu'il a été fait le choix dans ce projet de développer un modèle biotechnique pour concevoir des conduites intégrées. En effet, les avantages des modèles pour aider à la conception d'itinéraires techniques sont (i) de pouvoir réaliser *in silico* un grand nombre de situations expérimentales dans des conditions pédo-climatiques variées, (ii) et d'identifier les itinéraires optimaux vis-à-vis de différents critères.

Afin de développer ce modèle, un certain nombre d'expérimentations réalisées entre 1997 et 2004 ont servi au paramétrage des modules mauvaises herbes et phoma du modèle bioéconomique « OMEGA sys » (Oilseed rape Model to Evaluate and Generate Alternativ systems). Un diagnostic agronomique, des tests d'itinéraires techniques en parcelles d'agriculteurs biologiques (Valantin-Morison et Meynard, 2007), complété par des expérimentations factorielles (Ferré *et al.*, 2000 ; Valantin-Morison et Ferré, 2004, Aubertot *et al.*, 2004a,b,c) ont permis d'élaborer un schéma de fonctionnement des relations de compétition colza/mauvaises herbes et un schéma conceptuel pour le module phoma. Ces essais ont aussi permis de constituer une base de données pour paramétrer les deux modules bioagresseurs.

Le modèle « Omega sys » est constitué d'un modèle agronomique (« OMEGA sys agro »), qui comporte un module culture, un module phoma et un module mauvaise herbe, et d'un modèle économique (« OMEGA sys éco »). Les modules bioagresseurs sont des représentations statistiques des effets du système de culture sur les bioagresseurs et leur interaction avec le peuplement. Le module économique est couplé au module « Omega sys éco » et réalise un mode d'optimisation par *programmation dynamique* décompose la maximisation en plusieurs étapes. Le programme s'écrit de la manière suivante :

$$\max_{\alpha_1} \left[E_{\alpha_1} \left[\max_{\beta_2} \left[E_{\beta_2} \left[\pi (X_1, D_1, D_2, \epsilon_1, \epsilon_2) \right] \right] \right] \right]$$

A la différence de la résolution par contrôle optimal, on introduit ici la possibilité d'adapter la décision à l'étape 2 en fonction de l'aléa qui s'est produit à l'étape 1.

Évaluation d'itinéraires techniques intégrés réalisés au champ

Des évaluations globale, agronomique et environnementale ont été réalisées sur un ensemble d'essais menés en stations expérimentales et en parcelles agricoles entre 2004 et 2007. De ces travaux, nous pouvons conclure que les différentes conduites intégrées ont conduit à des rendements comparables à ceux obtenus avec des témoins traités par des fongicides et des herbicides de manière systématique, sans aucune règle de décision. Les stratégies basées sur des semis avancés dans certaines conditions peuvent donner un léger avantage sur le rendement d'autant plus qu'il y a labour. En effet, les semis avancés peuvent permettre la réduction de la biomasse de mauvaises herbes en situations labourées. En situation non la-



bourées, la concurrence se réalisera essentiellement avec les repousses du précédent cultural. S'il s'agit d'une graminée, l'utilisation d'un herbicide anti-graminée ou parfois d'un binage est à privilégier. L'azote disponible pour le peuplement pendant l'automne permettra une croissance suffisante pour permettre l'étouffement des mauvaises herbes, ce d'autant plus que la date de semis est avancée. Un seuil de 80 kg.ha⁻¹ disponible dans le milieu semble être le seuil à partir duquel l'effet étouffement est possible. Les contaminations par le phoma se sont montrées quasi systématiquement plus fortes sur les semis à dates normales par rapport aux semis à dates avancées, que l'on se place en labour ou en non labour. Les différences de contaminations du phoma entre les deux dates de semis peuvent s'expliquer par des différences de stades au moment de l'arrivée des ascospores de phoma. Les notes G2 qui en résultent restent assez faibles (entre 0,92 et 3,22) et ne sont pas significativement différentes entre les stratégies testées, en particulier entre les deux dates de semis. Le risque d'élongation de l'hypocotyle était supposé plus fort sur les semis avancés et l'effet de cet allongement sur la gravité de la nécrose était également incriminé. Cette hypothèse n'a pas été vérifiée.

L'évaluation environnementale des essais décrits ci-dessus montre que le gain environnemental obtenu moyen est de 0,4 en note lphy et 0,8 traitements et peut atteindre 1,4 en note lphy et deux traitements entre les essais conduits en intégré et le témoin « désherbé ». Ce gain pouvant aller jusqu'à deux traitements (ou deux niveaux d'IFT) représente 1/3 des traitements utilisés sur le colza actuellement et est constitué par une réduction d'herbicides, de fongicide et de régulateurs de croissance.

Evaluation du modèle Omega sys et utilisation pour construire des itinéraires techniques intégrés

Les expérimentations dont les résultats sont décrits plus haut ont permis de constituer une base de données et d'évaluer la qualité prédictive de « Omega sys Agro » et sa capacité à classer les itinéraires techniques intégrés. Il a été évalué sur quatre variables de sorties : la note G2 et la biomasse de mauvaises herbes en entrée d'hiver, le rendement potentiel, le rendement avec facteurs limitant.

Dans le cas de la note G2, les valeurs observées sont assez peu variables entre sites et entre années et compte tenu des niveaux de note, on peut dire que la nuisibilité du phoma a été certainement faible au cours de ces trois années. Dans la majorité des cas le modèle surestime la note G2 mais l'écart à la prédiction oscille entre 0,35 et 1,35 sauf pour le site dans l'Eure en 2005 et en 2006.

Dans le cas de la biomasse de mauvaises herbes, les valeurs observées sont très variables entre sites et entre années et présentent une large gamme de variation et l'on peut dire que les mauvaises herbes ont posé problèmes dans un certain nombre de situations comme constatées dans l'analyse des résultats de la partie précédente. Le module mauvaise herbe simule correctement la biomasse de mauvaise herbes dans un nombre de situations importantes, à l'exception du site dans l'Eure, faisant osciller la RMSEP entre 0,06 et 0,12 t.ha⁻¹. Compte tenu de l'erreur de mesure de cette variable (0,2 t/ha), nous pouvons dire que le module mauvaise herbes estime la biomasse d'adventices correctement au regard des erreurs de mesures réalisées sur les observées.

Concernant les rendements, trois situations se distinguent : (i) Le modèle culture estime mal le rendement potentiel et les modules bioagresseurs estiment correctement l'enherbement et les attaques de phoma. Par conséquent, le rendement avec facteur limitant est également mal représenté (RMSEP de 12 q.ha⁻¹) : c'est le cas de Versailles en 2004-2005. (ii) Le modèle de culture estime correctement le rendement potentiel et les modules bioagresseurs estiment correctement l'enherbement et les attaques de phoma, le rendement réel avec facteur limitant s'en trouve également correctement estimé (RMSEP de 6 q/ha) : c'est le cas de Versailles Grignon et Picardie. Seulement quelques valeurs en 2005-06 sont sur estimées : les essais de Grignon en 2005-06, ce qui peut s'expliquer par des attaques d'insectes (charançons de la tige) qui auraient réduit le potentiel de rendement observé. (iv) Enfin dernière situation, le modèle de culture estime correctement le rendement potentiel mais mal le rendement réel avec facteur limitant en raison d'une sur-estimation de la note G2 du module phoma.

Le modèle classe correctement les situations dans 23 cas sur 34, c'est-à-dire dans 67% des cas. Les itinéraires techniques donnant les rendements les plus forts sont très souvent repérés par le modèle comme les meilleurs également, sauf pour Versailles en 2004-2005.

L'ensemble du modèle Omega sys a été utilisé pour simuler différentes stratégies constituées de plusieurs options techniques dans deux types de sols (limons profonds et argilo calcaire) pour des pressions de mauvaises herbes variables. Les premiers itinéraires techniques pertinents économiquement sont souvent ceux qui combinent plusieurs pratiques culturales et s'abstiennent de désherbage. En particulier, nous pouvons remarquer à l'issue de ces simulations que (i) certaines pratiques agronomiques (comme la date de semis, le travail du sol, la densité et la variété) permettent d'éviter des



attaques de phoma et permettent d'éviter certains désherbages, mécanique ou chimique. (ii) les itinéraires techniques les mieux adaptés sont différents d'un milieu à l'autre. Par exemple, l'absence de labour est quasi systématique en argilo calcaire, le semis précoce est une opération plus fréquente en argilo calcaire qu'en limon (6 à 8 cas sur 15) mais est systématiquement associé à un désherbage. Le semis précoce est une opération peu fréquente en limon profond (5/15) mais quasi systématiquement associé à un apport d'automne et à une absence de désherbage. Parmi les quinze premiers itinéraires techniques simulés par le modèle certains sont parfois assez différents de ceux testés au champ et sont même surprenants mais apparaissent également ceux qui ont été menés en expérimentations et décrits dans la partie III-B-2.

Freins à l'insertion et la diffusion d'itinéraires techniques

Malgré un contexte favorable à l'adoption d'itinéraires techniques intégrés, force est de constater que leur diffusion est faible en France, mais en Europe également. Ici, nous mettrons l'accent sur l'analyse des limites du conseil agricole du fait du rôle important que celui-ci joue dans l'adoption et la diffusion des innovations (Labarthe, 2005). Nous nous concentrons sur l'étude des pratiques de conseil phytosanitaire pour la culture du colza et, plus largement, en « grandes cultures » en France. Notre analyse s'appuie sur une enquête réalisée auprès de 21 acteurs du développement agricole dans deux régions de production du colza : Bourgogne et Poitou-Charentes.

Le conseil agricole en France encourage peu les agriculteurs à adopter des itinéraires techniques intégrés. Ceci tient au fait que i) l'offre de conseil est largement dominée par les technico-commerciaux des coopératives et négoce qui n'ont pas intérêt à réduire leurs ventes de produits phytosanitaires ; ii) les prescriptions donnent la priorité au raisonnement des traitements plutôt qu'à la réduction des pesticides ; iii) les OAD disponibles ne permettent guère de mener une approche globale et cohérente de l'ensemble de l'itinéraire technique.

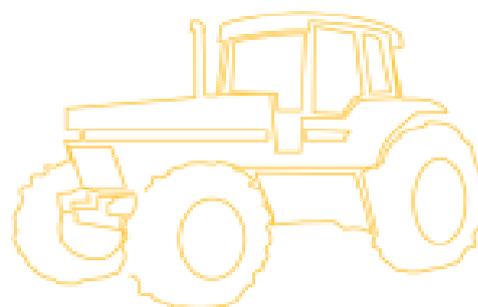
La conception des OAD met l'accent sur le raisonnement des pesticides, plutôt que sur la valorisation des interactions pour freiner le développement des ravageurs, parce que les connaissances accumulées jusqu'ici et la manière dont elles sont produites ne permettent pas une telle inflexion de problématique.

Alors que le système actuel de recherche est fondé sur des domaines de spécialisation, la production intégrée nécessite de comprendre la dynamique des écosystèmes et la compré-

hension d'une structure aussi complexe relève d'une approche holistique des systèmes et donc de la coopération des différentes disciplines entre elles (Atkinson & McKinlay, 1997).

En outre, la technique de production conventionnelle a été élaborée essentiellement via des expérimentations factorielles, dans lesquelles on fait varier les facteurs (variété, produit de traitement, règle de décision simple...) de manière indépendante. Or, la production intégrée consiste en la combinaison de différentes techniques. Aussi, conviendrait-il d'évaluer les différentes combinaisons possibles : leur modélisation devrait permettre de limiter les coûts d'expérimentations multifactorielles systématiques (Reau *et al.*, 1996). Pourtant, on ne peut s'arrêter là : en raison de la persistance des bio-agresseurs, les effets des systèmes de culture sont nécessairement cumulatifs, de sorte que l'évaluation de la performance des systèmes nécessite des expérimentations en temps longs.

Parce qu'en production intégrée, les stratégies de contrôle des bio-agresseurs dépassent le cadre du raisonnement à la parcelle et à l'année, le conseil agricole devrait élargir son champ d'action. En suivant Lucas et Meynard (2000), on peut recommander que les services offerts ne se situent plus uniquement dans le domaine du raisonnement tactique qui correspond à une adaptation des pratiques pour un couple culture/ravageur à un stade donné de la culture, mais s'élargissent à un raisonnement stratégique mené pour la durée de la campagne, voire à plus long terme, et pour un ilot de parcelles, voire une petite région. Cet élargissement de l'objet du conseil devrait induire une modification de la place de l'agriculteur dans la relation au conseiller. La relation d'exécutant à concepteur devrait évoluer vers une relation de co-production : l'agriculteur devrait épauler le conseiller dans le diagnostic et la conception des itinéraires techniques, car nul mieux que lui connaît les conditions locales (conditions pédo-climatiques, pressions parasitaires, environnement parcellaire ...) dans lesquelles il exerce son activité.



🌱 La production intégrée en colza est possible bien que difficile

Ce projet a permis de démontrer qu'il était possible de concevoir des itinéraires techniques intégrés, réduisant l'utilisation des herbicides et des fongicides sur le colza. Le choix pertinent des pratiques culturales permet de réduire le risque d'enherbement et de contrôler les attaques de phoma, de sorte que le rendement qui en résulte soit peu réduit et les marges brutes peu différentes des situations traitées systématiquement. Des essais au champ ont permis de démontrer la faisabilité de ces itinéraires techniques et la pertinence agronomique de certains choix. Par ces travaux, il a été possible de montrer que la réduction d'un, voire de deux traitements étaient réalisables en comparaison de niveau d'un nombre proche de 6 actuellement.

Ce projet a également permis de construire un modèle d'aide à la conception d'itinéraires techniques intégrés, appelé Omega sys. Ce modèle a déjà été utilisé pour réaliser *in silico* un grand nombre de situations expérimentales dans des conditions pédo-climatiques variées. Il permettra à moyen et long terme d'élaborer des itinéraires techniques pertinents économiquement et de construire des règles de décision sur le désherbage post levée et l'application de fongicide sur phoma.

🌱 Le conseil auprès des agriculteurs doit se ré-orienter vers un raisonnement stratégique à moyen et long terme

Enfin, ce projet a pointé du doigt les freins à la diffusion d'itinéraires techniques liés au conseil des agriculteurs. En somme, pour favoriser la diffusion de la production intégrée, le conseil doit évoluer d'un conseil standard, plutôt axé sur le raisonnement tactique (estimation du risque et choix du niveau de risque encouru) à un conseil co-construit, plutôt axé sur le raisonnement stratégique à moyen et long terme (choix de variété, date et densité de semis, rotation).

📄 Articles scientifiques

Aubertot J.N., Penaud A. & Doré T., 2002. Reliable characterisation of pest populations is required to develop Integrated Pest Management strategies. Case study of blackleg disease in oilseed rape crops. 2002. *Proceedings of the 7th ESA congress, Cordoba, Spain, July 15-18*: 159-160.

Aubertot J.N., Crivineanu C., Le Floch D. & Doré T., 2002. Analyse des effets de la date de semis et de la disponibilité en azote à l'automne sur le développement du phoma chez deux variétés de colza. 2002. *Annales de la 2ème Conférence Internationale sur les moyens alternatifs de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux*, 4-7 mars, Lille, France, : 122-129.

Aubertot J.N., Crivineanu C., Le Floch D. & Doré T., 2002. Analysis of the effects of the sowing date and nitrogen availability during autumn on blackleg development on two oilseed rape cultivars. 2002. *Proceedings of the 13th Crucifer Genetics Workshop, Davis, USA, 23-26 March*, 21.

Aubertot J.N., Doré T., Le Floch D. & Pinochet X., 2003. Cultural control: an alternative method for containing phoma stem canker (*Leptosphaeria maculans*) of oilseed rape. *Proceedings of the 11th International Rape-seed Congress*. 6-10 July, Copenhagen, Denmark. Vol 3: 747-749.

Aubertot J.N., Pinochet X. & Doré T., 2004. Analysis of the effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on phoma stem canker (*Leptosphaeria maculans*) development on two winter oilseed rape cultivars. *Crop Protection*, 23: 635-645.

Primot S., Valantin-Morison M. & Makowski D., 2005. Models for predicting high weed infestation in winter oilseed rape crops. *Weed Research*, 46: 1-12.

Valantin-Morison M., Meynard J.M. & Doré T., 2007. Crop management and environment effects on insects in organic winter oil seed rape (WOSR) in France. *Crop Protection*, 26: 1108-1120.

Valantin-Morison M. & Meynard J.M., 2007. Yield variability of Organic Winter Oil Seed Rape (WOSR) in France: a diagnosis on a network of farmers fields. *Agriculture for Sustainable Development* (sous presse).

📄 Communications dans des congrès

Valantin-Morison M., Jeuffroy M.H., Saulas L. & Champolivier L., 2003. Azodyn-rape : a simple model for decision support in rapeseed nitrogen fertilisation. *11th International rapeseed congress, 6-10 July, Copenhagen, Denmark, Towards Enhanced value of cruciferous oilseed crops by optimal production and use of the high quality seed components*. *Proceedings GCIRC*.



Aubertot J.N., Pinochet X., Reau R. & Doré T., 2004. Sim-Canker: a simulation model for containing phoma stem canker of oilseed rape through cultural practices. *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*. 26 September-1. Brisbane, Australia.

Valantin-Morison M., Jeuffroy M.H. & Champolivier L. 2004. Evaluation and sensitivity analysis of Azodyn-rape, a simple model for decision support in rapeseed nitrogen. *11th Congress of the European Society of Agronomy*, 12-16 July, Copenhagen, Denmark.

Valantin-Morison M., Meynard J.M., Reau R. & Quéré L., 2004. Crop management of Winter Oil Seed Rape (WOSR) in organic systems in France. *11th Congress of European Society of Agronomy*, 12-16 July, Copenhagen, Denmark.

Publications de transfert

Aubertot J.N., Reau R., Dupeuble F., Grippon S., Penaud A., Pinochet X. & Taverne M., 2003. Mise au point de la protection intégrée du colza : exemple du phoma (*Lep-tosphaeria maculans*). *Oléagineux Corps gras Lipides*, 10: 202-207.

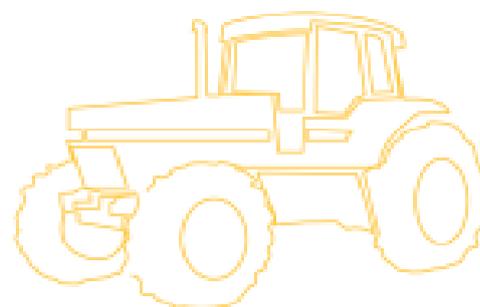
Aubertot J.N., Dupeuble F., Taverne M. & Reau R., 2003. Vers une protection intégrée du colza contre le phoma. *Oléoscope*, 73: 22-25.

Penaud A., Aubertot J.N., Schott J.J. & Doré T. 2003. La note G2 : un indicateur robuste de la gravité de la nécrose au collet. *Oléoscope*, 73: 29-31.

Quéré L., Valantin-Morison M. 2004. Les facteurs limitant de la conduite du colza biologique. *Oléoscope*, Juillet 2004.

Schneider O., Aubertot J.N., Roger-Estrade J., Doré T., Pinochet X., Penaud A. & Reau R., 2004. Gérer les résidus de culture pour contrôler les maladies : cas du phoma du colza. *Oléoscope*, 78: 16-17.

Valantin-Morison M., Ferre F. & Quéré L., 2004. Comment améliorer la compétitivité du colza vis-à-vis des adventices ? *Oléoscope. Dossier spécial désherbage*. Septembre 2004.



A un moment où la viticulture traverse une période économiquement difficile, la question de l'utilisation des pesticides dans cette filière se pose en termes non seulement d'impact potentiel sur l'environnement mais aussi en ce qui concerne la qualité des vins et d'un point de vue économique. Un projet de recherche pluridisciplinaire a abordé cette question au travers d'une analyse de la perception et du comportement des viticulteurs vis-à-vis de l'adoption d'innovations environnementales, de réflexions sur l'enjeu de nouvelles pratiques réduisant l'utilisation de produits phytosanitaires dans la construction de la qualité du vin et d'une analyse de l'impact d'une qualification environnementale sur la commercialisation des vins.

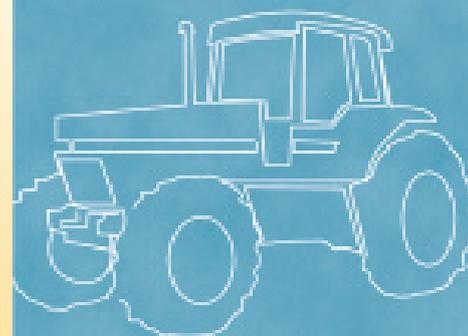


56



57

- Viticulture, vins et pesticides :
Un projet collectif –
Marie-Claude Belis-Bergouignan
(INRA – Université Bordeaux IV)



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

Marie-Claude BELIS-BERGOIGNAN,
UMR 5113 CNRS-Université Montesquieu - Bordeaux IV
Groupe de Recherche en Économie
Théorique et Appliquée (GREThA)
Avenue Léon Duguit
33608 Pessac Cedex
05 56 84 85 53
Belis@u-bordeaux4.fr

PARTENAIRES

Volet 1 :
UMR 5113 CNRS-UNIVERSITÉ MONTESQUIEU - BORDEAUX IV (GREThA)
C. Cazals
INRA
V. Saint-Ges

Volet 2 :
UMR INRA-INA PG Systèmes Agraires Développement: Activités, Produits, Territoires, Paris
G. TEIL, S. Blanchemanche, P. Floux
UNIVERSITÉ DE TOULOUSE LE MIRAIL, Centre d'Étude et de Recherche Travail Organisation Pouvoir (CERTOP)
S. Barrey
CSI-ENSMP CNRS
A. Hennion

Volet 3 :
INRA, Unité Transformations Sociales et Politiques Liées au Vivant (TSV), Ivry
C. NICOURT, M.F. Garcia-Parpet, J.M. Girault, D. Ollivier (TRAME)

VITICULTURE, VINS ET PESTICIDES : UN PROJET COLLECTIF

INTRODUCTION

L'importance de la production viticole en France fait de l'emploi des pesticides et de ses conséquences un enjeu de premier ordre dans la préservation de l'environnement. L'exacerbation de la concurrence internationale sur le marché vinicole renforce la dimension stratégique de cet enjeu pour la viticulture française. La très grande variété et complexité des situations existant dans ce secteur, déjà soulignée par de nombreux travaux, rendent incertaine l'efficacité des mesures visant à réduire l'usage des pesticides et les impacts négatifs environnementaux de la production viticole. C'est cette richesse de situations qui a conduit les trois équipes de recherche à aborder la question de l'usage des produits phytosanitaires en viticulture à partir de points de vue émanant de disciplines et de traditions théoriques complémentaires.

VOLET 1

« Les innovations environnementales dans la viticulture »

MOTS CLÉS

Innovations environnementales - Démarches volontaires - Trajectoire environnementale - Paradigme phytosanitaire - Agriculture biologique - Agriculture raisonnée - Produits phytosanitaires.

OBJECTIFS

Le propos a consisté à démontrer qu'à partir des grilles de lecture évolutionniste et, de manière complémentaire, conventionnaliste, nous pouvons proposer des réponses qui intègrent à la fois les dimensions technologiques, organisationnelles, économiques et institutionnelles, aux préoccupations environnementales dans la filière vitivinicole.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Une première enquête a été réalisée auprès des viticulteurs girondins (2 300) afin de représenter au mieux les perceptions et pratiques environnementales de l'ensemble des viticulteurs travaillant dans un cadre de viticulture dite « conventionnelle ». Elle a permis de connaître leur positionnement vis-à-vis du caractère plus ou moins contraignant de la réglementation, des attraits et atouts relatifs des solutions technologiques ou organisationnelles (itinéraires techniques), des incertitudes relatives aux performances des technologies, de leurs sources d'informations. Les résultats de l'enquête mettent en évidence la prégnance du paradigme phytosanitaire dans un contexte réglementaire vécu comme fortement contraignant par les viticulteurs. Ainsi, nous démontrons

que l'adoption des innovations environnementales par les viticulteurs relève d'une double dimension : la base de connaissance des viticulteurs et les coûts nets de l'adoption. Les limites présentées par cette trajectoire montrent la nécessité d'une prise en charge plus collective de la protection environnementale, dont nous avons été amenés à montrer la pertinence.

La recherche a donc cherché à mettre en évidence les spécificités, atouts et limites de l'action publique en termes d'actions réglementaires et incitatives. Ainsi, prenant appui sur l'exemple de la préparation d'un nouvel arrêté relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des produits visés à l'article L. 253-1 du code rural, à savoir les produits phytosanitaires, nous avons apprécié les limites de cette politique environnementale, inhérentes à la complexité des enjeux et des organisations intervenant dans ce processus. Nous avons cherché à montrer les interactions en jeu et la dynamique des innovations technologiques de « fin de chaîne » concernées par cet arrêté. Les résultats sont obtenus à partir d'une méthodologie de recherche-action permettant à la fois de mener une action de terrain et de tester le modèle théorique utilisé. Cette recherche souligne le rôle des différentes formes de *proximité* (géographique, organisationnelle et organisée) dans la mise en place d'une action collective. Ainsi ce projet commun rend compatibles les intérêts *a priori* divergents des pouvoirs publics, des entreprises et des utilisateurs pour l'élaboration d'une réglementation acceptée par tous.

Enfin, la recherche a approfondi l'analyse des pratiques des viticulteurs engagés dans des démarches environnementales volontaires (DEV). La recherche privilégie une approche économique menée sous l'angle de l'acceptabilité sociale plutôt que sous celui de l'optimisation. Nous proposons une analyse des conditions d'émergence et de pérennisation des DEV dans la viticulture au travers de deux types de DEV : l'agriculture biologique et l'agriculture raisonnée. Nous présentons les résultats d'une enquête réalisée par envoi postal auprès de 1500 viticulteurs ayant adopté l'une ou l'autre de ces DEV, permettant de mettre en évidence les différents déterminants des stratégies économiques et environnementales adoptées par ces viticulteurs. L'analyse des DEV, à travers différents mondes de production, permet de mettre en évidence les fondements de la diversité observée en termes de protection environnementale. La pluralité des mondes protecteurs de l'environnement plaide plutôt en faveur de la recherche de compromis sociaux, économiques et environnementaux acceptables que l'économie des conventions, par sa démarche

compréhensive, peut aider à approcher « de l'intérieur ».

VOLET 2

« De nouvelles pratiques réduisant les risques phytosanitaires : un enjeu dans la construction de la qualité du vin »

MOTS CLÉS

Pesticides - Viticulture - Travail - Métier - Normalisation

OBJECTIFS

La viticulture se signale comme l'un des secteurs de forte utilisation de produits pesticides. A un moment où leur usage en agriculture fait débat, l'objet du rapport est d'examiner des démarches visant la réduction de leur emploi dans une grande région viticole, le Languedoc-Roussillon, caractérisée par une forte hétérogénéité viticole. Là, des normalisations du travail des viticulteurs, descendantes (sous forme de cahiers des charges) et remontantes, orientent de plus en plus l'utilisation des pesticides.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

L'analyse repose sur des entretiens avec des viticulteurs coopérateurs, engagés ou non dans des démarches de réduction de pesticides, des producteurs qui vinifient leur vin en caves particulières engagées dans des démarches d'agriculture biologique ou de biodynamie, et une dizaine de conseillers techniques viticoles, principalement en Languedoc-Roussillon. Ces entretiens visent à décrire les relations entre les prescriptions et les manières de travailler des viticulteurs, pour mettre en évidence les dynamiques d'appropriation de leurs démarches et leurs limites.

Dans un premier temps, le rapport examine la dynamique des prescriptions descendantes, sous forme de cahiers des charges, et remontantes car intégrées aux constructions endogènes des manières de travailler. Les démarches de modération des pesticides sont alors vues à travers des cas en situation (*Terra Vitis*, *Vitéalis*, GDA, caves particulières...). L'agriculture raisonnée est alors resituée dans la variété des dynamiques à l'œuvre pour modérer l'usage des pesticides.

Dans un deuxième temps, l'étude des manières d'usage des pesticides pose la question du passage de la prescription à l'appropriation de démarches de réduction des pesticides par les viticulteurs. Le rôle de la commission technique dans les caves coopératives, l'exemple



des cahiers des charges gradués, sont présentés et interrogés.

Enfin, dans un troisième temps, les limites de l'appropriabilité des démarches de réduction d'usage des pesticides sont posées en montrant la manière dont les prescriptions du travail se confrontent à la diversité de la population viticole au travail, comme aux paradoxes de la qualité et aux coûts humains de la normalisation.

En conclusion, le rapport revient sur la capacité des viticulteurs, travailleurs indépendants, à redéfinir leurs manières de travailler et à les formaliser pour les proposer au-delà du collectif initiateur, même si cette rupture ne concerne qu'une part très faible de la population viticole. Là, les nouvelles normalisations du travail jouent sur la dynamique du métier. Enfin, le rapport propose plusieurs pistes d'orientation pour la réduction de l'usage des pesticides en viticulture.

VOLET 3

« Des vins naturels ? Une analyse de la production à la consommation de la commercialisation des vins à qualité environnementale »

OBJECTIFS

Cette étude a pour but de comprendre si et comment les marchés vinicoles peuvent aider la diffusion de pratiques vinicoles respectueuses de l'environnement. Elle a été menée en Languedoc-Roussillon et Pays de la Loire et ses conclusions ne s'appliquent pas directement à deux vignobles français très particuliers, le Bordelais et la Champagne.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Le marché du vin montre trois situations très contrastées. La première concerne la qualification « bio », la plus ancienne. Suite aux premiers succès rencontrés par les vins issus de raisins biologiques, les pouvoirs publics ont soutenu les conversions d'exploitations vinicoles vers le Bio. Cette augmentation de l'offre s'est heurtée à un segment de consommation assez figé en France et qui ne parvenait pas à gonfler ses rangs de nouveaux acheteurs. En effet, pour les acheteurs de vin, le vin était un produit naturel et donc « évidemment » respectueux de l'environnement. La qualification environnementale additionnelle n'avait guère de signification. L'export a ouvert quelques portes, refermées quelques années plus tard avec le rétrécissement du marché allemand en particulier. Jusque récemment, cette mise en marché butait sur l'absence de lien entre les deux qualifications du

vin, la première au sujet de son goût, la seconde de son caractère respectueux de l'environnement. Les acheteurs de bio n'étaient pas des amateurs de bon vin, les vins bios n'étaient – donc – pas bons, les amateurs de vin n'achetaient – donc – pas de vins bios. La situation est en cours d'évolution chez une partie de ces viticulteurs qui rattrapent la nouvelle vague des vins de terroir.

La philosophie bio de la protection de la nature était loin de faire l'unanimité et une autre philosophie a rapidement émergé : l'agriculture raisonnée. Au lieu d'un principe de précaution envers les produits chimiques – herbicides et pesticides, elle préconisait un emploi réduit, encadré, mesuré de ces produits. Cette nouvelle mise en marché a connu un certain succès auprès des vignerons qui se sont regroupés au sein de labels et chartes, *Terra Vitis* notamment. Pour éviter que ces qualifications qui ne concernaient toujours qu'un nombre limité de vignerons ne sèment le doute sur la « propreté » de l'ensemble de la production française les pouvoirs publics ont soutenu la création d'une qualification nationale, peu exigeante, mais qui devait amener l'ensemble des viticulteurs à adopter des pratiques plus respectueuses. Sa création a entraîné un affaiblissement de la démarche, mais non la disparition de l'agriculture raisonnée qui survit, en passant clandestin de la traçabilité, un ensemble de techniques devenues incontournables pour la commercialisation des vins courants, et requises par l'agriculture raisonnée.

Enfin, une troisième et dernière organisation de marché a vu grossir les préoccupations environnementales en l'absence de toute procédure de qualification. Il s'agit des vins à forte prétention qualitative qui ont récemment réinvesti la notion de terroir, les pratiques respectueuses des terroirs et par conséquent de l'environnement. Cette démarche touche un petit nombre de producteurs et de volumes ; elle est cependant de plus en plus médiatisée et propre à casser l'évidence du vin produit « naturel » et hybrider les deux qualifications environnementale et gustative : pour faire du bon vin, il est nécessaire de respecter l'environnement.

Malgré la panne de l'agriculture raisonnée et la stagnation des vins bios, les questions environnementales en viticulture ne sont pas au point mort. Les nouveaux vins de terroir sont aujourd'hui le moteur essentiel d'une démarche de plus en plus perçue comme incontournable par les vignerons. Son élargissement à des vins à moindre prétention qualitative semble pouvoir être fait via une hybridation entre les notions de terroir et de paysage.



ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Volet 1 : outre la mise en place et la participation à l'action collective en vue de l'élaboration d'une norme, le transfert a pris la forme de séminaires de restitution en direction des syndicats professionnels, des adhérents aux différentes DEV ayant accepté de s'impliquer dans la démarche de recherche.

Volet 2 : le rapport propose plusieurs pistes d'orientation pour la réduction de l'usage des pesticides en viticulture.

Volet 3 : la valorisation des résultats est en cours. L'édition du rapport sous forme de livre et de synthèse distribuée aux 270 acteurs ayant participé à l'étude, est prévue en automne 2007.

FORMATION

Thèses de Doctorat

Cazals C., 2006. Analyse conventionnaliste des démarches environnementales volontaires. L'exemple de la viticulture et de l'arboriculture fruitière. Thèse de Doctorat ès Sciences Economiques, Université Montesquieu-Bordeaux IV, 347 p.

Saint-Ges V., 2006. Innovations environnementales dans la viticulture. Une lecture économique du cas girondin. Thèse de Doctorat ès Sciences Economiques, Université Montesquieu Bordeaux IV, 449 p.

VALORISATION

Articles scientifiques

Saint-Ges V., Meoule C. & Reulet P., 2003. La collecte et le traitement des effluents de produits phytosanitaires. Demain une nécessité ? *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*, N° Hors Série.

Bélis-Bergouignan M.C. & Cazals C., 2006. Territorialité des démarches environnementales volontaires et conflit d'usage: le cas de la viticulture et de l'arboriculture fruitière. Revue en ligne « *Développement durable et territoire* », Dossier n°7: «Proximité et environnement», 18 p.

Cazals C. & Saint Jean M., 2006. Démarches environnementales volontaires et gestion des risques environnementaux : une étude empirique appliquée à la viticulture et à l'arboriculture fruitière. Incertitude, Environnement (titre non définitif), coll. Ecologie humaine, Edisud, 12p. (A paraître).

Nicourt C. & Ollivier D., 2006. Construire en groupe une solidarité technique ; les phytosanitaires en viticulture. *Travaux et Innovation*, 131: 23-27.

Bélis-Bergouignan M.C. & Saint Ges V., 2007. Quelle trajectoire environnementale pour la viticulture ? L'exemple du vignoble girondin. *Economie Rurale* (soumis).

Cazals C., 2007. Les déterminants des démarches environnementales volontaires : une étude empirique comparée de deux filières agricoles. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine* (soumis).

Nicourt C. & Ollivier D., 2007. La diminution de l'usage des phyto passe par la démarche collective. *Réussir Vigne*, 126: 28.

Communications dans des congrès

Bélis-Bergouignan M.C. & Saint Ges V., 2004. Les problématiques environnementales dans la viticulture girondine, *Colloque VDQS*, Dijon, 21-22 mai.

Bélis-Bergouignan M.C., Cazals C., 2004, Convention d'environnement de réseaux institués : prévention ou résolution des conflits d'usage ?, *Communication aux journées d'étude sur les Conflits d'usage et de voisinage*, Paris, 11 et 12 octobre.

Bélis-Bergouignan M.C. & Cazals C., 2005. Les démarches volontaires au sein de la viticulture française : des conditions d'engagement différenciées? , *Colloque Vineyard Data Quantification Society XII*, Macerata, 27-28 mai.

Bélis-Bergouignan M.C. & Cazals C., 2005. Territorialité des démarches environnementales volontaires et conflits d'usage: le cas de la viticulture et de l'arboriculture fruitière, XLII^e Colloque de l'ASRDLF : « *Villes et territoires face aux défis de la mondialisation* », Dijon, 5-7 septembre.

Bélis-Bergouignan M.C. & Saint Ges V., 2005. Innovations environnementales dans la viticulture et relations de proximité : Un exemple d'action collective. *Oenometrics XII*, Macerata, 27-28 mai.

Saint Ges V., 2005. Proximités et innovations technologiques environnementales : quelle impulsion attendre d'une action collective technopolitaine ? XLII^e Colloque de l'ASRDLF : « *Villes et territoires face aux défis de la mondialisation* », Dijon, 5-7 septembre.

Cazals C., 2006. Convention d'environnement et proximité : le cas des démarches environnementales volontaires dans la viticulture et l'arboriculture fruitière. *5es Journées de la proximité organisées par le GRES et le groupe Dynamiques de Proximité*, 28-30 juin, Bordeaux.

Nicourt C., Garcia M.F., Girault J.M. & Ollivier D., 2006. La modération de l'usage des pesticides à l'épreuve du travail des viticulteurs. *Colloque Vineyard Data Quantification Society*, 25-27 mai, Bordeaux.

Bélis-Bergouignan M.C. & Cazals C., 2007. Mondes de production et protection de l'environnement dans la viticulture et l'arboriculture fruitière. *Journées INRA-SFER de recherches en sciences sociales*, 13-14 décembre, AgroParisTech.



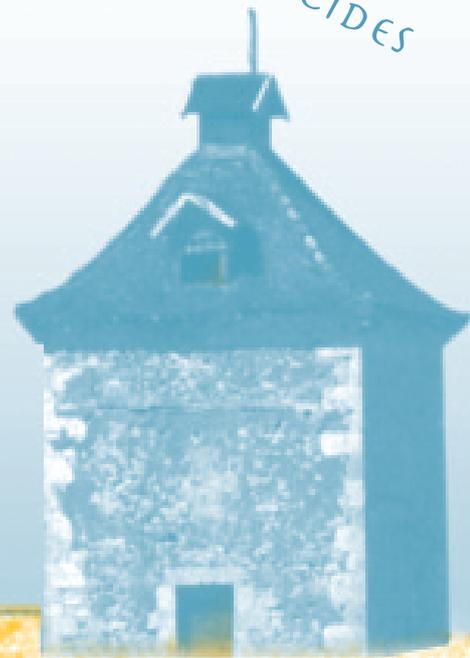
Bélis-Bergouignan M.C. & Saint Ges V., 2007. Standardisation de la protection de l'environnement : Contrainte ou effet de levier pour les acteurs de la filière vitivinicole girondine ? Colloque international « *Instituer le développement durable. Appropriation, Professionnalisation, Standardisation.* », 8-10 novembre, Lille.

Nicourt C., Girault J.M., Ollivier D., 2007. Quelles démarches pour réduire l'usage viticole des pesticides ? *XXXVIIe Congrès du Groupe Français des Pesticides*, 21-23 mai Bordeaux.

Teil G., Hennion A., Barrey S., Blanchemanche S. & Floux P., 2007, Le marché comme instrument de l'action publique. Pratiques, outils et normes pour le cadrage des vins à qualité environnementale. *Colloque international, Les approches pragmatiques de l'action publique*, 15-16 novembre, Facultés universitaires Saint-Louis, Bruxelles.

Si l'évaluation des risques est un outil puissant qui permet d'asseoir la prise de décision et la mise en œuvre de la réglementation sur les pesticides sur des bases solides, de nombreuses situations de nombreuses situations impliquent le recours à des outils dont l'utilisation est *a priori* plus simple et moins onéreuse, regroupés sous le terme générique d'indicateurs.

Après une première phase consacrée à l'établissement d'une synthèse et à l'analyse critique des indicateurs composites existants qui a conduit à la publication d'un ouvrage de référence dans le domaine, la seconde phase du programme "Indicateurs et Pesticides" a permis d'aborder divers aspects plus proches de l'utilisation opérationnelle de ces outils (évaluation de la faisabilité de mise en œuvre, réalisation de tests de sensibilité et validation de certains indicateurs). Pour certains, la démarche d'amélioration de construction a été entreprise. Enfin, de nouveaux indicateurs permettant de mieux prendre en compte la biodiversité de bord des champs ou certaines cibles (abeilles, vers de terre) ont été proposés.



• INDICATEURS PESTICIDES
Philippe Girardin (INRA Colmar) -
James Devillers (CTIS Lyon) -
Eric Thybaud (INERIS) -
Guy Soulas (INRA Bordeaux)



AUTEURS**Philippe GIRARDIN**

INRA Équipe Agriculture Durable
68021 Colmar cedex
03 89 22 49 20

girardin@colmar.inra.fr

James DEVILLERS

CTIS

3 chemin de la gravière
69140 Rillieux la Pape
04 78 08 49 84

j.devillers@ctis.fr

Eric THYBAUD

INERIS, Direction des risques
chroniques Unité d'évaluation
des risques écotoxicologiques, BP 2,
60550 Verneuil-en-Halatte
03 44 55 67 16

Eric.Thybaud@ineris.fr

Guy SOULAS

INRA-Univ. Bordeaux 2
Équipe Œnologie-ampélographie,
33405 Talence Cedex
05 40 00 66 56

guy.soulas@u-bordeaux2.fr

PARTENAIRES**INRA - Équipe Agriculture Durable, Colmar**

O. Keichinger, A. Hubert et Ch.
Bockstaller

SSM INRA – DGAL, Versailles

J.L. Rivière

CEMAGREF - Équipe ADER, Bordeaux

F. Vernier, F. Zahm

CEMAGREF - Équipe REQUE; Bordeaux

J.F. Delmas, J.F. Dubernet

INPL (ENSAIA), Nancy

B. Amiaud, F. Lasserre

ACTA, Lyon

A. Decourtye, A. Chabert

INERIS - Direction des risques chroniques

R. Farret

**INDICATEURS ET PESTICIDES****MOTS CLÉS**

Abeille – Agrégation - Bords de champs – Indicateurs – Pesticides – Validation - Ver de terre

**OBJECTIFS**

L'objectif de l'étude était double : a/ faire un point bibliographique des indicateurs existants dans la littérature scientifique et la littérature grise, b/ proposer des améliorations de certains indicateurs repérés dans la première phase du travail (amélioration dans le mode de calcul et compléments via l'ajout de nouveaux modules).

VOLET 1**Recensement et analyse des indicateurs "Pesticides" existants****PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE****Description et analyse de 43 indicateurs "Pesticides"**

La première partie de l'étude qui s'est achevée par la publication d'un ouvrage, avait pour objet principal de présenter 43 indicateurs appliqués aux pesticides et d'exposer les points forts et les limites. Celui-ci a été élaboré à partir d'une analyse bibliographique approfondie et de contacts directs avec les auteurs ayant participé à la construction des divers indicateurs. Il contient une description précise des méthodes de calcul employées et des données nécessaires à leur utilisation. Deux parties spécifiques relatives à la microbiologie des sols et à l'évaluation des risques au niveau réglementaire ont également été ajoutées pour former un tout facilement accessible.

Chaque indicateur a fait l'objet d'une fiche, dans laquelle nous avons cherché à concilier rigueur scientifique et facilité de lecture par un utilisateur potentiel non-initié.

Le premier constat de cette étude est une tendance au foisonnement des indicateurs relatifs aux pesticides, surtout au cours des dix dernières années. Ceci est sans doute le reflet d'un besoin de la société et d'une demande forte de différents acteurs, qui souhaitent disposer d'outils adaptés. Plus prosaïquement, nous pensons que ce foisonnement provient également de la dispersion de l'information : rapports spécifiques à la diffusion "confidentielle", articles publiés dans des revues relatives à des thèmes très différents (agricole, environnemental, science de la décision...). Ainsi, lorsqu'un nouvel indicateur est publié, il n'est que rarement fait mention dans sa bibliographie des autres indicateurs semblables et pré-existants. Nous espérons que le présent ouvrage permettra de compenser cette dispersion de l'information.

Parmi les indicateurs décrits, quelques grandes tendances peuvent facilement être identifiées : parfois élaborés en

collaboration avec une administration, les indicateurs qui s'attachent à une échelle nationale ou régionale sont très souvent destinés à être un appui pour des décideurs institutionnels ; parallèlement, nombre d'indicateurs visent une échelle locale (exploitation, parcelle) et sont davantage destinés aux agriculteurs.

Ainsi, pour un décideur institutionnel comme pour un agriculteur, il sera généralement possible de trouver un outil permettant de répondre à ses principales préoccupations : classer les substances les plus à risque pour l'environnement, évaluer l'impact des pesticides sur la qualité d'un milieu, choisir un produit de substitution pour un usage donné, rendre compte de l'efficacité d'une politique de réduction de doses ou de réduction des risques, voire, obtenir un label. Pour guider son choix, il est important que l'utilisateur sache spécifier ses besoins : échelle visée, cible (environnementale ou sanitaire), etc.

Le deuxième constat important qui peut être formulé est qu'à chaque question, relative à un contexte donné, correspond un outil adapté : il est illusoire de vouloir trouver ou créer un outil universel répondant à toutes les questions. D'ailleurs, certains domaines sont moins explorés que d'autres et ils sont clairement identifiés dans la synthèse de cet ouvrage. En revanche, il est possible de modifier un indicateur pour l'adapter à un besoin précis, tout en gardant les principes de la méthode qui le constituent. De telles adaptations sont d'ailleurs suggérées dans les fiches individuelles ou dans la synthèse. En effet, il est important de considérer qu'un indicateur n'est que la déclinaison à un problème particulier d'une méthode de calcul ou d'agrégation de critères : notation, calculs mécanistes, système expert, analyse multicritère, ou combinaison de ces méthodes. Une telle adaptation demande toutefois un travail de recherche spécifique.

Enfin, le troisième constat qui apparaît clairement est qu'il semble qu'une faible proportion d'indicateurs soit effectivement utilisée de façon régulière. A titre d'illustration, seul un indicateur sur cinq a été développé sous la forme d'un logiciel, et seul un indicateur sur trois a fait l'objet d'une recommandation de la part d'une organisation. Ainsi que cela a été souligné dans la synthèse, très peu d'indicateurs sont effectivement validés par l'usage ou par une confrontation à des mesures de terrain. Globalement, ce déficit d'utilisations concrètes viendrait favoriser l'effet de dispersion de l'information que nous avons déjà souligné. La voie de la normalisation, malgré tout l'intérêt qu'elle présenterait pour l'aide à la décision ou pour la gestion des risques, n'a pas encore été envisagée pour ces outils.

VOLET 2

Validation et proposition d'amélioration d'indicateurs "pesticides"

PRÉSENTATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Tests et améliorations d'indicateurs "Pesticides"

La seconde phase du projet « Indicateurs et pesticides » a, tout d'abord, permis de crédibiliser certains indicateurs au travers d'une étude de sensibilité et d'un exercice de validation. Puis, dans un second temps, des améliorations ont été proposées en ce qui concerne le mode d'agrégation et le développement de nouveaux modules

Étude de sensibilité

Les tests de sensibilité ont montré un intérêt limité pour les indicateurs « additifs » de type ADSCOR : la relation exposition-paramètre est linéaire et l'amplitude de variation dépend directement de l'amplitude de notation du paramètre considéré pondéré par le niveau des autres paramètres pris globalement. Dans le cas de EIQ, l'étude de sensibilité a fait ressortir une sur-paramétrisation sans effet notable sur la valeur de l'indicateur ainsi qu'une pondération nécessitant des ajustements. Pour des indicateurs mécanistes de type EPRIP, nous sommes arrivés aux mêmes conclusions que pour les modèles d'exposition : les paramètres « doses » ainsi que les constantes de vitesse et d'adsorption ont un poids déterminant sur la valeur de l'indice. En outre, cette étude a fait apparaître une forte interaction entre paramètres, la variation de l'indicateur en fonction d'un paramètre étant fortement dépendante de la valeur des autres paramètres.

Concernant EIQ, des études de sensibilité ont été réalisées après deux modifications du mode d'agrégation, l'un visant à éliminer les effets de rattrapage liés à un mode additif d'agrégation, l'autre visant à atténuer les effets de classes par utilisation de règles de décision associées à de la logique floue. Seul ce dernier mode d'agrégation contribue à modifier le classement des différents paramètres, les toxicités aiguë et chronique pour les travailleurs et les consommateurs ainsi que la toxicité aiguë pour les auxiliaires ayant le plus de poids.

Validation

Le test de validation n'a pu être que partiel. Compte tenu des données disponibles, notamment en matière de toxicologie et d'écotoxicologie, la validation des sorties des indicateurs n'a pu être réalisée que sur leur module « exposition ». Ce sont les indicateurs EPRIP et I-Phy qui donnent les meilleurs résultats, EPRIP à l'échelle



bassin versant et I-hy à l'échelle de la parcelle. Les résultats obtenus avec EPRIP demandent à être confirmés lorsque la version 2.1 sera disponible.

Changement d'échelle

L'amélioration proposée pour rendre I-Phy utilisable au niveau du bassin versant doit aller au-delà de la modulation de l'indicateur « Pesticides » par un coefficient de connectivité caractérisant la proximité de la parcelle au réseau hydrographique.

Nouveaux modes d'agrégation

Une autre proposition d'amélioration portant sur les méthodes d'agrégations a été faite pour rationaliser la construction et l'utilisation de l'indicateur EIQ : la méthode SIRIS qui a montré son intérêt pour agréger d'une façon optimale des variables de nature différente. Outre que les résultats produits par la méthode SIRIS se sont avérés concluants, cette méthode multicritère a un avantage : elle permet l'introduction de variables supplémentaires sans nécessiter de modification du jeu de pondérations.

Nouveaux modules "biodiversité"

La prise en compte de façon non satisfaisante de la biodiversité dans les indicateurs existants nous a conduit à développer des modules « abeille », « ver de terre » et « bords de champ ».

L'indicateur « Abeilles », fondé sur la méthode SIRIS et la prise en compte de variables influençant la toxicité des pesticides vis-à-vis de cet insecte pollinisateur, est simple d'emploi et peut être utilisé seul ou sous forme de module d'un indicateur plus généraliste. D'autres variables pourraient être facilement incorporées afin, par exemple, de mieux prendre en compte la toxicité à la ruche ou de l'adapter à des situations particulières. Dans son état actuel, le calcul de l'indicateur traduit la répartition des valeurs des paramètres en classes. Le recours à de la logique floue augmenterait ses performances.

Lors de la construction de l'indicateur « Ver de terre », il a été tenu compte des applications répétées. Le résultat de cette étude montre que quel que soit le mode de calcul de la PEC sol, la répartition en classes de l'indicateur telle qu'elle résulte d'un calcul préalable n'est en bon accord avec les données de terrain que si on prend en compte l'intégration biologique des effets au travers d'une réduction des populations après chaque application.

Nous avons jeté les bases d'un indicateur « Biodiversité bord de champs » construit sur la base de règles de décision associées à de la logique floue. Il prend en compte le risque pour la flore et la faune et peut être intégré sous forme de module dans n'importe quel autre indicateur plus généraliste. La seule limite actuelle à son utilisation est la disponi-

bilité des données (toxicité insectes, petits mammifères...) pour lesquelles une base doit être construite.

Bien que cela n'ait pas été demandé, il apparaît pertinent de pouvoir disposer d'un outil de calcul des deux indicateurs validés (I-Phy et EPRIP) et qui intégrerait les améliorations proposées concernant la biodiversité (modules « abeille », « ver de terre » et « bords de champ »).

La méthode CORPEN

Une réflexion critique et constructive a permis de faire une série de propositions. La première serait de rassembler et confronter les expériences acquises dans le cadre du travail des groupes régionaux dont certains ont acquis une bonne maîtrise dans l'utilisation des indicateurs du CORPEN. Il s'agirait de faire ressortir des typologies de référence auxquelles seraient préférentiellement associés certains groupes d'indicateurs. Cela pourrait contribuer - 1 : à une mise en œuvre plus facile, notamment dans des conditions pédo-climatiques plus diversifiées (cas des territoires d'outre-mer), des indicateurs CORPEN, -2 : à une « aide à la sélection » des "bons" indicateurs et - 3 : à l'établissement d'un véritable tableau de bord. Une seconde proposition serait de se donner les moyens de structurer et d'interpréter l'information acquise au moyen de ce type d'outil. Enfin, une troisième proposition serait d'envisager une extension d'usage, notamment dans le cadre d'une estimation du risque, en intégrant des données toxicologiques et écotoxicologiques. Cette possibilité devrait néanmoins être subordonnée à un examen préalable de l'existant en matière d'indicateurs, notamment par rapport à des échelles et des usages, à une identification des besoins et des lacunes, enfin, à une analyse coût-bénéfice comparée des aménagements à apporter aux indicateurs sous leur forme actuelle.

Conclusion

Au-delà de l'analyse critique des indicateurs pesticides existants, des améliorations apportées à certains d'entre eux et de la création de nouveaux modules, nous avons identifié des manques non signalés dans la première partie de ce travail. Ainsi, par exemple, il n'existe aucun indicateur permettant d'estimer les effets sur l'environnement et la santé humaine des traitements utilisés en LAV (lutte anti-vectorielle). En effet, la lutte contre l'épidémie de Chikungunya à la Réunion a montré qu'il fallait tenir compte de facteurs très spécifiques comme des températures élevées, la présence de ravines, l'utilisation de différentes techniques de traitements, etc. Aucun indicateur existant n'est adapté pour prendre en compte ces paramètres spécifiques alors qu'il y a, à l'évidence, un besoin d'indicateurs spécifiques aux environnements tropicaux.



ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Devillers J., Farret R., Girardin P., Rivière J.L. & Soulas G., 2005. *Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides*. Lavoisier ed., Tec&Doc, Paris, 278 p.

VALORISATION

Communications dans des congrès :

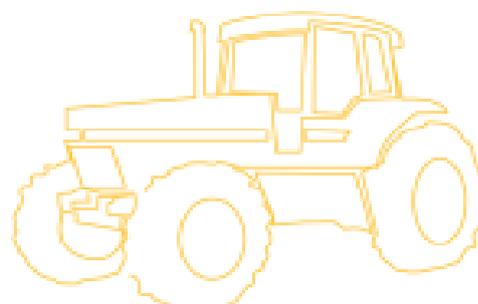
Devillers J., Farret R., Girardin P., Rivière J.L. & Soulas G., 2005. Practical interests and limitations of indicators for assessing human and environmental pesticide risks. *SETAC Europe, 15th Annual Meeting, Lille, France, 22-26 May*.

Soulas G., 2005. Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides. *XXXVe Congrès du Groupe Français des Pesticides, 18-20 mai, Marne-la-Vallée*.

Decourtye A., Devillers J. & Thybaud E., 2006. Indicators for assessing the toxicity of pesticides to the honeybee (*Apis mellifera*). *QSAR 2006: 12th International Workshop on Quantitative Structure-Activity Relationships in Environmental Toxicology, 8-12 May, Lyon*.

Decourtye A., Devillers J. & Thybaud E., 2007. Un nouvel indicateur du risque lié à l'utilisation des pesticides chez l'abeille. *XXXVIIe Congrès du Groupe Français des Pesticides, 21-23 mai, Bordeaux*.

Zahm F., Peyrey C., Vernier F., Saudubray F., Bockstaller C., Girardin P., Hubert A. & Da Costa J-P., 2007. Évaluation des modules « Eaux de surface » de quatre indicateurs phytosanitaires (ADSCOR, EIQ, EPRIP, I-PHY) ; Test appliqué aux pratiques phytosanitaires du bassin du Ruiné. *XXXVIIème Congrès du Groupe Français des Pesticides, 21-23 mai, Bordeaux*.



L'homologation des produits phytosanitaires est un processus complexe reposant notamment sur une évaluation *a priori* des risques pour l'environnement liés à l'utilisation de ces composés. Aussi complexe et détaillée soit-elle, cette évaluation réglementaire se doit d'être améliorée en permanence tant en ce qui concerne l'estimation des expositions que celle des effets potentiels de ces produits. Par ailleurs, l'utilisation dispersive de ces substances implique de se doter des moyens nécessaires à une évaluation *a posteriori* des risques qu'elles présentent pour l'environnement.

Quatre projets axés sur cette problématique ont été sélectionnés. Trois concernent des organismes peu étudiés, les organismes coralliens et les microorganismes, aquatiques et terrestres. Le quatrième est centré sur l'utilisation de modèles d'exposition pour la détermination de scénarios réalistes de contamination des milieux aquatiques en vue d'évaluer les impacts d'itinéraires techniques.

66



67

- Étude comparée des effets de phytosanitaires et de produits de lutte anti-vectorielle sur les Communautés Microbiennes aquatiques d'Ecosystèmes Tropicaux (ECOMET) - **Christophe Leboulanger (IRD, Université de Montpellier II)**

68

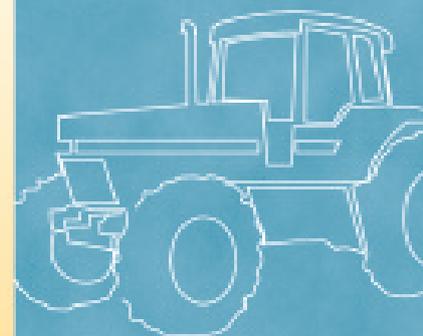
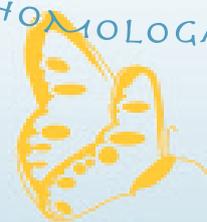
- Évaluation du risque pesticides pour les récifs coralliens de La Réunion (ERICOR) - **Jean Turquet (ARVAM - La Réunion)**

69

- Indicateurs pour l'évaluation de l'impact de produits phytosanitaires sur la composante microbienne de la qualité biologique des sols et des systèmes hydriques de surface - **Guy Soulas (INRA Bordeaux)**

70

- Utilisation de modèles d'exposition aux pesticides pour la reconstitution et la mise en œuvre de scénarios réalistes de contamination de mésocosmes permettant d'étudier les impacts d'itinéraires techniques sur les organismes aquatiques (EMERITAT) - **Laurent Lagadic (INRA Rennes)**



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Christophe LÉBOULANGER**

IRD, UR 167 Cyroco
 c/o UMR 5119 CNRS Université Mont-
 pellier II, CC093,
 34095 Montpellier cedex 5
 04 67 14 41 94
 christophe.leboulanger@mpl.ird.fr

PARTENAIRES**IRD UR 167 CYROCO**

Implantation Université Montpellier II
 M. Bouvy
 Ouagadougou, Burkina Faso
 P. Cecchi

Station Marine d'Endoume

M. Pagano
 Centre de Bel-Air, Dakar, Sénégal
 C. Carré

Implantation de Tulear, Toliara Madagascar
 Y. Montel

**UMR INRA-UNIVERSITÉ DE CHAMBÉRY
CARTEL, Thonon-les-Bains**

A. Bouchez

**BRGM, Unité gestion de la ressource et
impacts environnementaux, Orléans**

L. Amalric

ÉTUDE COMPARÉE DES EFFETS DE PHYTOSANITAIRES ET DE PRODUITS DE LUTTE ANTI-VECTORIELLE SUR LES COMMUNAUTÉS MICROBIENNES AQUATIQUES D'ÉCOSYSTÈMES TROPICAUX (ECOMET)

MOTS CLÉS

Microorganismes aquatiques - Microcosmes - Bioessais -
 Diversité fonctionnelle - Herbicides - Insecticides

RÉSUMÉ

Un déficit de connaissances de base sur le devenir et les effets des substances biocides dans les écosystèmes aquatiques tropicaux est à déplorer, ce qui limite fortement l'évaluation des risques liés à leur utilisation dans et autour de ces milieux particuliers.

Nous avons entrepris l'évaluation des effets de six molécules utilisées à la fois en zone tempérée et tropicale, trois phytosanitaires (le paraquat, la deltaméthrine, et le diuron) et trois produits de lutte anti-vectorielle (le téméphos et le fénitrothion sous forme pure et en formulation commerciale) sur le bactérioplancton, le phytoplancton et le zooplancton issus de réservoirs d'eau douce artificiels de Mayotte, Communauté Départementale de l'Outre Mer.

Nous nous attacherons par la suite à déterminer les effets (exprimés par les valeurs de NOEC, LOEC et CE₅₀) de ces composés sur des organismes tropicaux en cultures et élevages, et sur des microcosmes peuplés d'organismes issus du milieu lors d'expérimentations *in situ*. Afin de permettre une comparaison efficace entre les résultats de la littérature sur les modèles tempérés, et ceux obtenus sur les organismes tropicaux, des expérimentations de laboratoire complémentaires seront effectuées sur des modèles de microorganismes d'origine tempérée. Un soin particulier sera apporté à la similarité des protocoles employés dans les différents laboratoires partenaires et sur le terrain. Les effets seront décrits au niveau individuel (marqueurs métaboliques), des populations (valeur sélective, taux de reproduction) et des communautés (diversité moléculaire et diversité fonctionnelle). Les résultats attendus permettront notamment 1) de jauger la validité des modèles d'évaluation des risques associés à ces molécules et établis en zone tempérée pour les écosystèmes aquatiques tropicaux, et 2) de proposer aux gestionnaires locaux une réévaluation de ces risques et des pistes pour en diminuer les impacts.

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Jean TURQUET**

ARVAM, Agence pour la Recherche
et la Valorisation Marines,
La Technopole,
3, Rue Henri Cornu,
97490 Sainte-Clotilde, La Réunion.
02 62 28 39 08
jean.turquet@arvam.com

PARTENAIRES**IFREMER**

Laboratoire Ecotoxicologie, Brest

F. Quiniou

Institut Pasteur de Lille

Laboratoire du Littoral

R. Delesmont

Institut départemental d'analyses

de conseil et d'expertise en

hygiène alimentaire, eau et

environnement santé animale

(IDHESA), Plouzané

G. Durand

ÉVALUATION DU RISQUE PESTICIDES POUR LES RÉCIFS CORALLIENS DE LA RÉUNION (ERICOR)

**MOTS CLÉS**

La Réunion - Pesticides - Formulations - Récif corallien - Bioessais - NQE

**RÉSUMÉ**

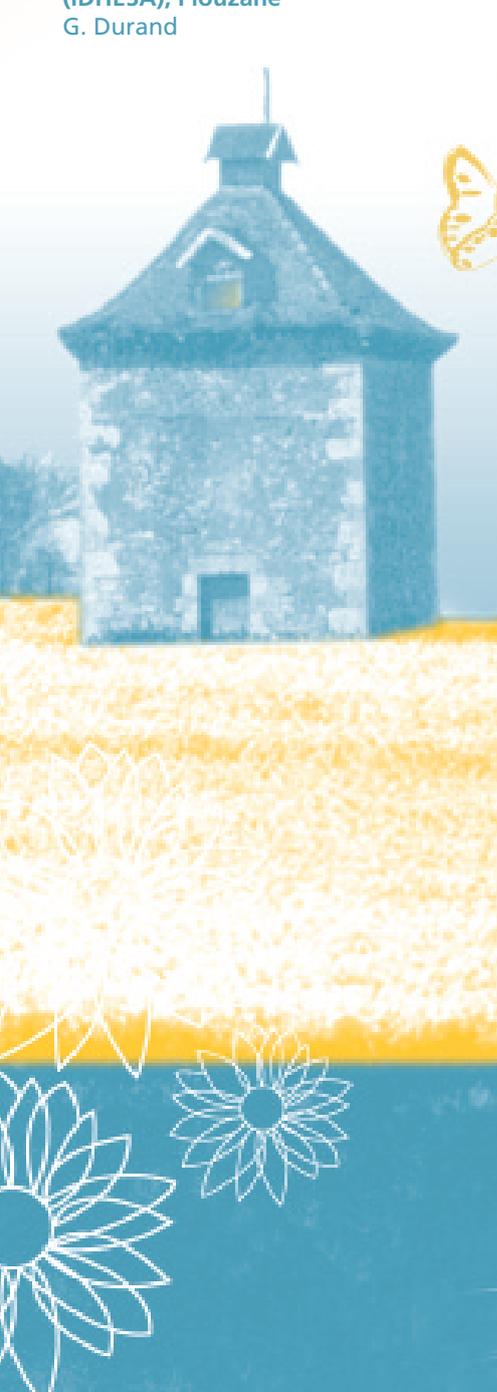
Les produits phytosanitaires sont employés en quantité croissante à La Réunion depuis des années. Le problème du risque environnemental, lié à l'utilisation répétée de pesticides, doit être analysé de façon globale dans le cadre d'usages multiples de phytosanitaires et dans un contexte d'environnement tropical et insulaire. Les dangers de ces molécules pour l'environnement marin et *a fortiori* récifal (à forte sensibilité écologique) sont sous documentés, voire méconnus ; quant aux expositions, elles sont quasi totalement inconnues. Les impacts potentiels de ces molécules rendent nécessaire la mise en place, de manière urgente, d'une évaluation du risque sur les écosystèmes sensibles que sont les récifs coralliens et l'environnement côtier des îles dans les régions tropicales. La surveillance de l'environnement marin récifal qui est en cours en est la première étape : les premiers résultats du suivi de la contamination par les pesticides des compartiments eau, sédiments et organismes dominants seront disponibles pour la fin de l'année 2007.

Le présent projet porte essentiellement sur les évaluations du degré de pollusensibilité des organismes dominants, et/ou d'importance écologique pour l'écosystème récifal.

Ces évaluations reposent sur l'adaptation de bio-essais d'écotoxicité usuels, aux espèces spécifiques des zones tropicales et plus particulièrement aux récifs coralliens, ainsi que sur la comparaison de leur sensibilité lors des expositions aux pesticides. Une série de tests portant sur les niveaux trophiques préconisés par le TGD (*Technical Guidance Document, 1998*), a été sélectionnée. Un des enjeux du projet concerne les coraux et leurs algues symbiotiques (les zooxanthelles), clés de voûte des récifs coralliens. Les résultats obtenus permettront de comparer la sensibilité des espèces tropicales et tempérées et apporteront des informations utiles pour la détermination des NQE (Normes de Qualité de l'Environnement) répondant à la DCE (Directive Cadre sur l'Eau, 2000). Les premières mises au point sur phytoplancton, poisson et coraux ont démarré en avril 2007 et les essais sont prometteurs. L'adaptation des bioessais sur oursin et bivalve en cours laisse présager des possibilités de résultats intéressants. Pour les crustacés, l'emploi d'une espèce sauvage locale est peu probable mais l'emploi de juvéniles de crevette d'élevage est envisagé.

Le choix des molécules les plus pertinentes à suivre sera réalisé en concertation avec l'ensemble des acteurs locaux membres actifs du groupe Phytosanitaire. Cette sélection est essentiellement guidée par la quantité des importations des pesticides, leur cible, leur persistance dans l'environnement, ainsi que les premiers résultats des mesures réalisées *in situ* par les programmes de surveillance. De plus, une attention particulière sera portée sur la bonne représentativité des modes d'action des molécules sélectionnées. Une première liste de produits a été établie sur la base des importations à usage agricole, la sélection des quatre ou cinq formulations qui seront étudiées sera disponible en décembre 2007 après concertation finale avec la DAF, la DIREN, l'OLE et la DRASS.

Associé aux programmes en cours tels que les réseaux de surveillance, ce projet doit permettre d'évaluer le danger, l'exposition et le risque liés aux pesticides, pour les habitats coralliens et non coralliens



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Guy SOULAS**

UMR "Œnologie – Ampélogie",
 Université V. Segalen Bordeaux 2, 351
 cours de la libération,
 33405 Talence
 05 40 00 66 56
 Guy.soulas@oenologie.u-bordeaux2.fr

PARTENAIRES

**UMR INRA - Université de Bourgogne,
 microbiologie et géochimie des sols**

F. Martin

**UMR INRA - Université de Bourgogne
 CNRS, plantes - microbe - environne-
 ment**

D. van Tuinen

**Université de Pau, laboratoire
 d'écologie et microbiologie**

moléculaire et microbiologie, EA3525

R. Duran

**UMR INPL-ENSAIA-INRA, agronomie
 et environnement**

E. Benizri

**LIMOS - laboratoire des interactions
 microorganismes - minéraux - matière
 organique dans les sols-**

C. Leyval

Chambre d'agriculture de la Gironde

P. Guilbault

ALMA TERRA

X. Salducci

INDICATEURS POUR L'ÉVALUATION DE L'IMPACT DE PRODUITS PHYTOSANITAIRES SUR LA COMPOSANTE MICROBIENNE DE LA QUALITÉ BIOLOGIQUE DES SOLS

**MOTS CLÉS**

Pesticides - Sols - Structure - Densité - Diversité - Activité
 - Bactéries - Mycorhizes

**RÉSUMÉ**

Le projet de recherche tourne autour de deux objectifs thématiques

- Le premier, le plus prospectif, vise à tester la capacité indicatrice de populations microbiennes spécifiques du sol assurant différentes étapes-clés des cycles géochimiques du C, du N, du S et du P en associant *analyse de la diversité et quantification des gènes impliqués dans les différentes transformations ciblées et mesures d'activités enzymatiques potentielles*. Les objectifs finalisés de ce groupe de travail seront de contribuer à la production de **bio-essais** utilisables dans le cadre d'une procédure d'homologation des produits phytosanitaires et, pour certains essais, de proposer des méthodes d'analyse moyen débit pour répondre aux besoins d'un suivi post-homologation.

- Le second paquet thématique s'inscrit dans une démarche à vocation opérationnelle. Il vise à proposer *une approche analytique intégrée* permettant la mise en œuvre, dans des conditions d'analyses facilitant le moyen/haut débit, de mesures de différents paramètres de taille, d'activité et de diversité des communautés microbiennes naturelles des sols. C'est sur ce point que les deux axes thématiques se rejoignent, le premier alimentant, avec de nouveaux indicateurs fonctionnels génétiques et/ou enzymatiques, une batterie d'indicateurs de taille et de diversité revus pour répondre à un cahier des charges en matière d'analyses qui sera élaboré avec des professionnels de l'analyse de sol. La faisabilité et les avantages potentiels de cette approche analytique intégrée seront évalués par rapport à une batterie de tests plus conventionnels sur des dispositifs en vraie grandeur. Au final, nous souhaitons contribuer à l'élaboration d'un **indice** de l'état biologique des sols utilisable dans le cadre d'une surveillance des sols agricoles.



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Laurent LAGADIC**

Équipe Écotoxicologie et Qualité des Milieux Aquatiques

UMR INRA-Agrocampus,

Écologie et Santé des Écosystèmes

65, rue de Saint Briec

35042 Rennes Cedex

02 23 48 52 37

Laurent.Lagadic@rennes.inra.fr

PARTENAIRES**UMR INRA-AGRO campus écologie et santé des écosystèmes**

Équipe Écotoxicologie et Qualité des Milieux Aquatiques, Rennes

T. Caquet, C. Gorzerino, M. Heydorff,

M. Roucaute

INRA

Unité Expérimentale Écologie et Écotoxicologie Aquatique (U3E), Rennes

D. Azam, M. Ollitrault, A. Quemeneur

BRGM

I. Dubus, N. Surdyk, L. Amalric

ARVALIS - Institut du Végétal

B. Réal, L. Jouy

UTILISATION DE MODÈLES D'EXPOSITION AUX PESTICIDES POUR LA RECONSTITUTION ET LA MISE EN ŒUVRE DE SCÉNARIOS RÉALISTES DE CONTAMINATION DE MÉSOCOSMES PERMETTANT D'ÉTUDE LES IMPACTS D'ITINÉRAIRES TECHNIQUES SUR LES ORGANISMES AQUATIQUES (EMERITAT)

MOTS CLÉS

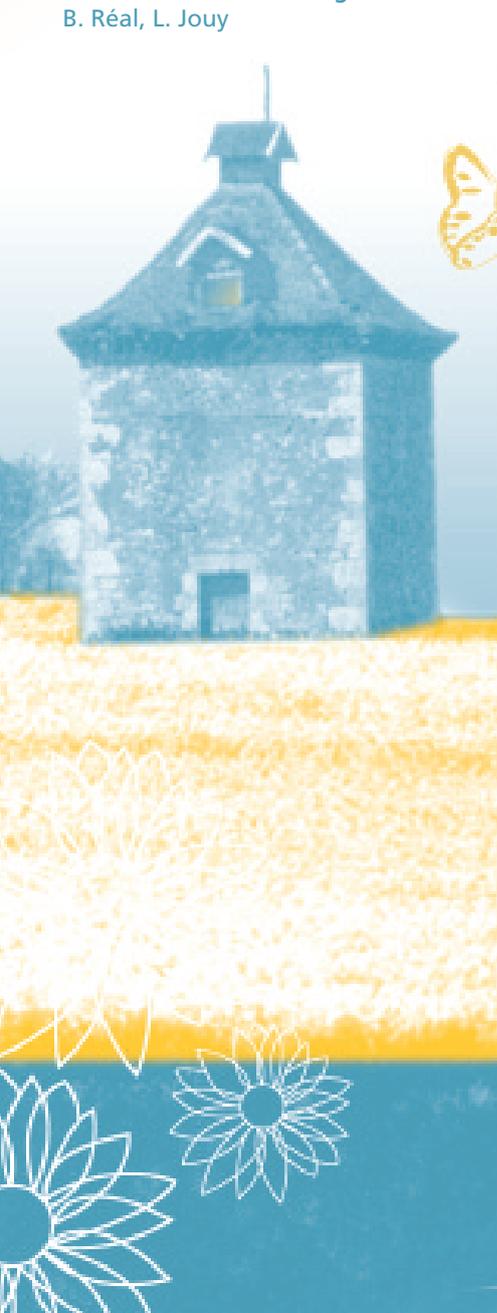
Modèles d'exposition - Mélange de pesticides - Multiexposition - Itinéraires techniques - Effets écotoxicologiques - Bioessais *ex situ* - Mésocosmes aquatiques

RÉSUMÉ

En dépit des avancées réalisées dans le domaine des méthodes d'évaluation des risques des pesticides, il subsiste encore de nombreuses incertitudes, notamment en ce qui concerne la caractérisation spatiale et temporelle de l'exposition des organismes et les effets des multi-expositions. Ce projet est présenté par un consortium d'équipes spécialisées respectivement dans l'analyse du transfert des pesticides dans le paysage agricole et le conseil en systèmes de culture, l'estimation des expositions à l'aide de la modélisation et l'évaluation du risque des pesticides pour les milieux aquatiques à l'aide de dispositifs expérimentaux dédiés. Il a pour objectif général l'évaluation des risques d'impacts de pesticides sur des communautés d'organismes aquatiques dans des conditions réalistes d'exposition prenant en compte à la fois la diversité des substances actives et les périodes d'application de l'intégralité des pesticides utilisés dans le cadre d'itinéraires techniques classiques, représentatifs des milieux hydromorphes associés à deux situations environnementales, les terrains drainés de l'Ouest (La Jaillière) et la Brie : maïs/blé avec culture intermédiaire entre la récolte du blé et le semis de maïs, et colza/blé/pois protéagineux/blé après la récolte du colza et des pois. Les itinéraires techniques retenus correspondent à la pression habituelle liée à la lutte contre les bioagresseurs inféodés à chaque culture de chaque rotation.

Des modèles numériques de transfert de pesticides seront mis en œuvre pour prédire de façon réaliste les concentrations auxquelles sont exposés les organismes aquatiques et ceci pour les différents scénarios au sein d'un contexte agricole de drainage. Les concentrations prédites seront utilisées pour réaliser des expériences dans des mésocosmes aquatiques lenticules. La contamination sera réalisée avec des préparations commerciales afin d'accroître le réalisme agronomique de l'étude. La dynamique des substances actives dans l'eau sera suivie pendant l'ensemble de la durée de l'expérimentation (une année). La toxicité de l'eau des mésocosmes sera évaluée 24 h après chaque contamination au moyen de bioessais réalisés en laboratoire sur une algue verte, un cladocère et un mollusque gastéropode. Le suivi des effets des traitements sur les communautés de microalgues et d'invertébrés sera basé sur des critères structurels (abondance des taxons) et fonctionnels (dégradation de la litière).

Les données obtenues en mésocosmes et lors des bioessais permettront de comparer les différents scénarios d'exposition en termes de devenir des pesticides et de risques écotoxicologiques pour les communautés de microalgues et d'invertébrés. Les résultats permettront de proposer des scénarios d'exposition des eaux de surface représentatifs des systèmes drainés français, susceptibles d'être utilisés par les instances d'homologation en France. L'intégration des résultats permettra d'améliorer les conseils fournis aux conseillers agricoles afin de prendre en compte de manière réaliste l'impact des itinéraires techniques étudiés sur les écosystèmes aquatiques et améliorer ainsi la construction de programmes de protection des cultures permettant de lutter contre la dégradation de la qualité des eaux superficielles.



Diverses propositions destinées à réduire l'utilisation des pesticides ont été faites dans les années passées, mais elles présentent un niveau d'adoption globalement faible. Trois programmes s'attacheront à identifier les freins à cette adoption et les leviers d'actions possibles dans le domaine des grandes cultures, à proposer des stratégies innovantes dans le cas de la culture de la banane et à caractériser la sociologie des usages des pesticides dans les jardins privés urbains.



72

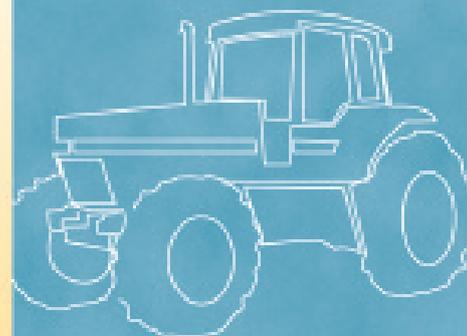
- Caractérisation des pratiques de protection des cultures et de leur évolution : méthodologie de diagnostic et propositions visant à améliorer l'impact environnemental des systèmes de culture et d'élevage - **Laurence Guichard (INRA Grignon)**

73

- Systèmes de culture bananiers sans pesticides : conception et conditions d'adoption aux Antilles françaises - **Philippe Tixier (CIRAD, Martinique)**

74

- Phytoville, sociologie des usages des pesticides dans les jardins privés urbains - **Denis Salles (CERTOP, CNRS – Université Toulouse II)**



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

Laurence GUICHARD
 INRA Grignon, UMR Agronomie
 78850 Thiverval-Grignon
 01 30 81 52 43
 guichard@grignon.inra.fr

PARTENAIRES**INSTITUT DE L'ÉLEVAGE**

S. Bertrand

INSTITUT TECHNIQUE DE LA BETTE-RAVE INDUSTRIELLE (ITB)

N. Bouvaris, M. Cariolle

ARVALIS-INSTITUT DU VÉGÉTAL

G. Couleaud, JP. Gouet, B. Real,

A. Wissocq

INRA GRIGNON, UMR AGRONOMIE

M. Morison, R. Reau

DGAL- SRPV DRAF AQUITAINE

Ph. Reulet

**CENTRE TECHNIQUE INTERPROFES-
SIONNEL DES FRUITS ET LÉGUMES
(CTIFL)**

M. Sihaml, F. Zavagli

CARACTÉRISATION DES PRATIQUES DE PRO- TECTION DES CULTURES ET DE LEUR ÉVO- LUTION :

MÉTHODOLOGIE DE DIAGNOSTIC ET PROPOSITIONS VISANT À AMÉLIORER L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES SYSTÈMES DE CULTURE ET D'ÉLEVAGE

MOTS CLÉS

Pratiques agricoles - Protection des cultures - Diagnostic - Évaluation - Stratégies alternatives - Échelles locales, régionale et nationale - Grandes cultures - Élevage - Cultures fruitières

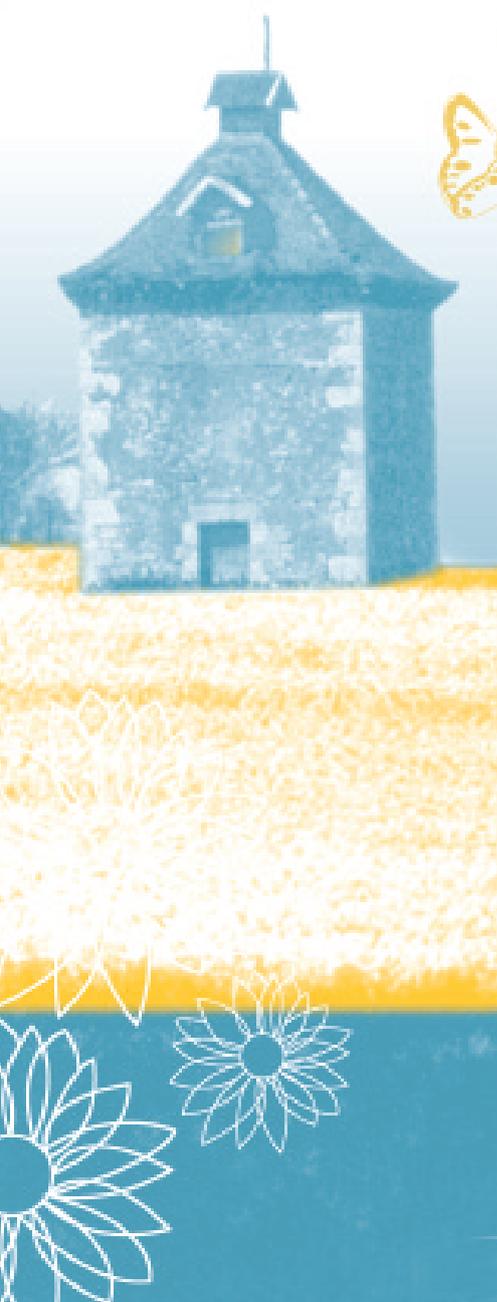
RÉSUMÉ

Améliorer l'impact environnemental de l'agriculture suppose de connaître les pratiques mises en œuvre par les agriculteurs et ce dans des délais qui permettent d'être réactifs. Or aujourd'hui, malgré le grand nombre de données recueillies et disponibles, la valorisation qui en est faite n'est pas de nature à participer à cet objectif, que ce soit à l'échelle locale, régionale ou nationale.

Or les décideurs ont de plus en plus besoin de connaître comment évolue globalement la pression en produits phytosanitaires, et identifier où agir en priorité pour améliorer la situation. Pour cela, ils ont besoin non seulement d'outils permettant de décrire globalement la pression régionale et son évolution, mais aussi d'outils permettant de mieux comprendre les pratiques agricoles, puis de les analyser dans la perspective de réaliser un diagnostic débouchant sur l'action.

Le projet vise donc à définir un cadre méthodologique permettant d'utiliser les bases de données et/ou les données disponibles pour caractériser les évolutions récentes des pratiques de protection des cultures, à mettre au point une méthode de suivi de ces pratiques basée sur des indicateurs en vue d'en faciliter la veille, à identifier les déterminants majeurs des pratiques, à appréhender les freins au changement de pratiques et à proposer de nouvelles pistes en matière de conseil pour diminuer l'utilisation des pesticides en encourageant par exemple le recours à des méthodes alternatives de protection des cultures. Le projet prévoit également l'amorce d'un réseau de fermes dans lesquelles des tests en vraie grandeur seront réalisés, afin d'appréhender les conditions de mise en œuvre de méthodes alternatives et d'acquérir des références.

Ce cadre méthodologique sera appliqué sur les principales grandes cultures des systèmes de culture et d'élevage, ainsi que sur une culture pérenne, le verger de pommiers.



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Philippe TIXIER**

CIRAD, UPR-26, Systèmes de culture bananier, plantains et ananas, BP 214, 97285 Lamentin Cedex
05 96 42 30 17
tixier@cirad.fr

PARTENAIRES

CIRAD, UPR 26, Systèmes de Culture Bananiers, Plantains et Ananas

R. Achard, C. Chabrier, J.M. Risède

UMR INRA-CIRAD-AGRO-M

Fonctionnement et conduite des Systèmes de Culture Tropicaux et Méditerranéens (System), Montpellier

M. Dorel

UR INRA Agropédoclimatique (APC),

Petit-Bourg, Guadeloupe

H. Ozier-Lafontaine, R. Tournebize, J.L.

Diman, J.M. Blazy

UMR IRD-CIRAD-Université Montpellier 2,

Résistance des Plantes aux Bioagresseurs (RPB), Montpellier

P. Quénéhervé

CEMAGREF, Unité de Recherche Agriculture et Espace Insulaire

A. Rizand

SYSTÈMES DE CULTURE BANANIERS SANS PESTICIDES : CONCEPTION ET CONDITIONS D'ADOPTION AUX ANTILLES

**MOTS CLÉS**

Rotations et associations culturales - Lutte biologique - Systèmes de culture bananiers - Guadeloupe - Martinique - Adoptabilité des innovations

**OBJECTIFS**

Ce projet vise à produire des connaissances et à les intégrer afin de développer des systèmes de culture innovants (sans produits phytosanitaires) pour les cultures bananières de Guadeloupe et de Martinique. Ces cultures étaient jusque dans les années 1990 basées sur des monocultures fortement consommatrices de pesticides. La recherche a déjà permis de réduire les quantités de pesticides en introduisant des jachères et des rotations culturales. Cependant plusieurs innovations techniques restent à concevoir pour atteindre l'objectif de « zéro pesticides ». Les propositions de stratégies innovantes adaptées au contexte insulaire tropical des Antilles françaises devront considérer de nouvelles techniques agronomiques avec notamment le choix et l'assemblage dans le temps et dans l'espace des plantes cultivées et associées. Des moyens de lutte non chimiques contre les différents bioagresseurs devront également être développés. Nous axerons notre travail sur la recherche de plantes assainissantes vis-à-vis des parasites telluriques et des adventices. Des modèles de simulation informatiques seront construits et utilisés pour explorer des assemblages de pratiques définissant des systèmes de cultures durables.

En interactions avec ces travaux biophysiques des travaux sur l'adoption des nouvelles techniques par les agriculteurs et par les filières seront menées sur les deux îles. Au final, les prototypes de systèmes de culture proposés par la recherche seront évalués selon leurs performances agronomiques et économiques, leurs bénéfices pour l'environnement mais aussi selon leur capacité à être adoptés par les agriculteurs.

Notre projet s'organise en 4 tâches principales :

1. Lutte culturale et prophylaxie pour le contrôle du parasitisme tellurique et la maîtrise des adventices
2. Nutrition minérale pour un renforcement de la vigueur de la plante et de sa tolérance aux pathogènes
3. Conception et évaluation de systèmes de cultures innovants
4. Identification des conditions d'adoption des innovations



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE**Denis SALLES**

UMR 5044 CNRS-Université Toulouse

Le Mirail

Centre d'Étude et de Recherche Travail

Organisation Pouvoir (CERTOP)

06 07 27 88 43

dsalles@univ-tlse2.fr

PARTENAIRES**CERTOP, Toulouse**

J. Barrault

CENTRE DE RECHERCHE INTERDISCIPLI-**NAIRE SUR LA BIOLOGIE, LA SANTÉ,****LA SOCIÉTÉ ET L'ENVIRONNEMENT****(CINBIOSE),****Université du Québec à Montréal**

L. Vandelac

« PHYTOVILLE » : SOCIOLOGIE DES USAGES DES PESTICIDES DANS LES JARDINS AMATEURS

**MOTS CLÉS**

Représentation sociale des jardins en ville - Usages des pesticides dans les jardins privés - Sociologie de l'environnement - Sociologie de l'action publique - Responsabilité individuelle - Responsabilité collective

**RÉSUMÉ**

A qui incombe la responsabilité de prévenir et de traiter les questions environnementales et sanitaires contemporaines ? « *C'est l'affaire de tous* » semble désormais être la réponse convenue, en effet, dans ces domaines comme dans d'autres (social, éducation, sécurité, protection sociale) l'invocation du principe de responsabilité semble être devenue la réponse systématique face une érosion d'un Etat Providence limité dans ses capacités d'action au nom de principes économiques et/ou d'un déficit de moyens.

L'exigence d'une implication croissante des individus (citoyens/consommateurs...) oriente les politiques publiques environnementales vers des formes originales de responsabilisation dont il s'agit de mieux analyser la forme et les effets. Le programme de recherche « Phytoville » a pour ambition d'éclairer et d'analyser les mécanismes « d'imputation de responsabilité » des jardiniers amateurs dans les dégradations éventuelles de l'environnement liées aux pratiques de jardinage.

La recherche propose d'analyser plus particulièrement les déterminants des pratiques d'utilisation des produits phytosanitaires dans les jardins amateurs à partir d'une analyse sociologique :

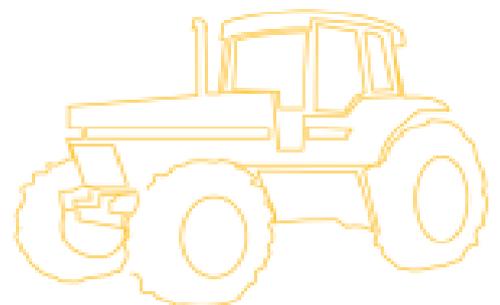
- de l'évolution des *représentations sociales du jardin* en ville,
- des pratiques effectives de traitement selon le(s) type(s) de jardin possédé(s) mais aussi les catégories et les trajectoires sociales des jardiniers,
- de la sensibilité environnementale des amateurs de jardinage,
- de la *diffusion et de la réception des messages* de vente et des conseils relayés par la filière de distribution, par la presse spécialisée, par la réglementation, par des prestataires de service, par des associations de jardinage...
- et enfin de la mise sur agenda politique et de la réception par les usagers de la *Loi sur les pesticides* votée et appliquée au Québec depuis 2001.

L'objectif plus opérationnel est d'identifier *les facteurs et les différents leviers d'action* (réglementaires, contractuels, incitatifs, pédagogiques) nécessaires à la réduction des risques de contamination sanitaire et environnementale liés à l'utilisation des pesticides par les jardiniers amateurs et de mettre à jour les conditions d'une appropriation sociale de pratiques de traitement alternatives.



Méthodes : la recherche combine plusieurs méthodologies d'investigation.

- *Un volet quantitatif* sur la base d'une enquête par questionnaire auprès d'un échantillon de la population de jardiniers amateurs en milieu urbain et périurbain. Cette première étape est en cours, 1000 questionnaires ont été collectés.
- *Un volet qualitatif* sur la base d'entretiens semi-directifs avec les jardiniers amateurs d'une part et avec les prescripteurs de produits pour le jardin (jardinerie et presse spécialisée en particulier) d'autre part.
- *Un volet comparatif* est engagé entre France/Québec où les réglementations et les conditions culturelles sont distinctes.





DIRECTION DES ÉTUDES ÉCONOMIQUES
ET DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE
SERVICE DE LA RECHERCHE ET DE LA PROSPECTIVE

PROGRAMME "ÉVALUATION ET RÉDUCTION DES RISQUES LIÉS À L'UTILISATION DES PESTICIDES"

2^{ème} appel à propositions de recherche

1 – CONTEXTE DE L'APPEL À PROPOSITIONS DE RECHERCHE

Les produits destinés à lutter contre les organismes jugés 'nuisibles', sont utilisés en quantités importantes dans différents domaines : agriculture (plus de 90 % des tonnages utilisés), voirie (entretien des infrastructures routières et ferroviaires), traitement du bois et divers usages privés (jardinage, traitement de locaux...). La France est l'un des principaux pays utilisateurs de pesticides, avec une grande diversité de substances actives et de formulations commercialisées.

Les campagnes d'observation de la qualité des milieux mettent en évidence la présence de certains pesticides et de leurs produits de dégradation dans les différents compartiments de l'environnement, avec pour conséquence possible l'apparition d'effets non intentionnés¹. Pour cette raison, des cellules de conseil aux utilisateurs et de suivi a posteriori de la présence des pesticides dans l'environnement ont été mises en place au niveau régional (CORPEP en Bretagne, CROFPP en Rhône-Alpes, etc.) et national (CORPEN, qui vise à établir des recommandations pratiques à partir de synthèses des connaissances disponibles).

En 1992, trois ministères (Agriculture, Environnement, Santé) se sont associés pour constituer le « Comité de liaison eau-produits anti-parasitaires ». Les premiers bilans partiels qui ont été réalisés sur les ressources en eau, en particulier par l'IFEN, confirment l'ubiquité de la présence des

pesticides dans l'hydrosphère, y compris dans les eaux de nappes profondes ou dans les eaux de pluie.

Ces constats montrent qu'il est nécessaire d'améliorer l'évaluation du risque a priori et la prévision du comportement de ces substances dans l'environnement et de mettre au point des procédures d'évaluation a posteriori de leur présence et de leurs effets (développement de procédures de post-homologation par exemple).

Le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, conscient de tous les enjeux liés à l'usage des pesticides, et soucieux de prendre des mesures adéquatement fondées, a mis en place en 1999 le Programme de recherche (évaluation et réduction des Risques liés à l'Utilisation des Pesticides dont le présent document constitue le second appel à propositions de recherche.

Par ailleurs, le Comité de la prévention et de la précaution (CPP), créé par Madame Dominique Voynet en juillet 2000 sur l'impact sanitaire des produits phytosanitaires et leur métabolites, a émis un avis en février 2002 et des recommandations de recherche (<http://www.l'environnement.gouv.fr/dossier/2002/027-cpp-phytoavis02-résultat/>). Certaines sont en partie reprises dans cet appel, particulièrement en ce qui concerne le devenir des pesticides dans l'environnement et la caractérisation de l'effet des mélanges de substances actives.

2 – ENJEUX ET OBJECTIFS FINALISÉS DU PROGRAMME

Les enjeux auxquels il s'agit de répondre sont nombreux. Les recherches doivent conduire à une meilleure connaissance des voies de dispersion, de transformation et d'accumulation des pesticides dans l'environnement, ainsi que des conséquences de leur présence sur les écosystèmes, afin de concevoir les outils permettant de réduire leur présence et/ou leurs effets. Pour cela, il

convient d'améliorer les pratiques d'usage et d'évaluer l'efficacité des traitements et en valant leur complémentarité avec d'autres méthodes de lutte contre les organismes nuisibles pour les cultures ; parallèlement, il est nécessaire d'évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides et de promouvoir les mesures appropriées pour limiter leur présence et leurs effets.

¹ Cet appel à propositions de recherche concerne tous les produits visés à la destruction d'organismes vivants (animaux, végétaux, micro-organismes) ou au contrôle de leur population, dès lors qu'ils sont utilisés dans le sol, l'air ou l'eau, que ce soit pour un usage agricole (phyto-sanitaires) ou non agricole (biocides).

² Malgré les procédures d'homologation préalable, certains accidents s'ont pu être évités : dans les années 1980 par exemple, il a été constaté que les insecticides organophosphorés étaient certains populations innées et contre-indiqués, d'où l'interdiction de la plupart de ces produits dans les années 1970-80. Dans d'autres cas, certains produits recommandés en agriculture et de produits anciens se sont révélés, à l'usage, trop persistants ou trop toxiques. C'est dans ce cadre que les missions chargées de l'agriculture et de l'environnement ont été récemment à même à interdire ou à restreindre l'usage du diazinon, du lindane ou de l'atrazine ou de l'indoxacarb.



Les résultats du programme peuvent contribuer à des actions à différentes échelles spatiales et temporelles : aide à la mise en place de zones tampon et à la gestion des bassins versants, amélioration des procédures d'évaluation du risque et d'homologation des produits, surveillance de l'état de contamination de différents milieux, etc. Les méthodes proposées et/ou les données obtenues pourront, après validation et standardisation, être utilisées au plan local, national ou international (convention sur le Rhin, OSPAR, mise en œuvre de la Directive cadre dans le domaine de l'eau, etc.).

Ce programme de recherche est complémentaire d'un ensemble d'actions, de type observation et suivi, études, formation-concertation : bilans de la connaissance de l'état des milieux aquatiques réalisés par l'FFEN à la demande du MATE, diagnostics de bassins versants, études financées par les groupes régionaux dans le cadre du Programme de réduction des pollutions par les produits phytosanitaires d'août 2000, études des agences de l'eau, autres programmes de recherche en cours financés par le MATE et les organismes de recherche (programme PNECQ, programme Environnement et Santé, programme GESSOL, programme PRIMEQUAL, etc.). Des informations concernant ces programmes peuvent être consultés sur le site internet du MATE :

<http://www.environnement.gouv.fr/actua/proposit/approsu.htm>

LES GRANDS DOMAINES COUVERTS PAR L'APPEL A PROPOSITIONS

Maîtriser les risques que présentent les pesticides pour l'environnement suppose d'une part que l'on puisse prévoir et gérer, à différentes échelles d'espace et de temps, leurs concentrations et leurs effets sur les systèmes vivants et, d'autre part, qu'il soit possible de faire appel à des pratiques/itinéraires techniques ou à des méthodes alternatives permettant de limiter, voire de supprimer, le recours aux pesticides.

L'objectif est d'encourager parallèlement, et en recherchant dans la mesure du possible des convergences, les recherches dans trois domaines :

- 1) Dynamique des pesticides dans l'environnement
- 2) Évaluation des effets des pesticides sur des systèmes biologiques complexes
- 3) Nouvelles approches visant à réduire les risques liés à l'usage des pesticides - évaluation socio-économique

3- ORIENTATIONS DU PROGRAMME POUR 2002

VOLET 1 - DYNAMIQUE DES PESTICIDES DANS L'ENVIRONNEMENT

Les projets proposés dans ce volet de l'appel à propositions devront être effectués en priorité sur des sites naturels « intégrateurs », c'est-à-dire des systèmes pour lesquels les connaissances sur le fonctionnement biogéochimique et les caractéristiques environnementales et socio-économiques permettront une description quantitative de la dynamique des pesticides. Il s'agit par exemple des réseaux hydrographiques, des bassins versants, d'estuaires et des zones côtières associées. Ils devront concourir à l'évaluation des flux et à l'établissement de bilans de masse de substances actives, dont le choix devra être clairement argumenté, dans et entre les différents réservoirs géochimiques de l'environnement - eau, air et sol. L'estimation des flux et des temps de résidence dans ces compartiments de l'environnement doit permettre de préciser et de hiérarchiser les différents volets d'exposition des organismes vivants.

Les projets devront également aider à une meilleure représentation de l'étendue et de la variabilité spatio-temporelle de la contamination chimique de l'environnement par les pesticides. À ce titre, ils devront contribuer à l'optimisation des protocoles opérationnels de suivi et des stratégies d'observation à long terme de la contamination de l'environnement, notamment par référence à la Directive cadre dans le domaine de l'eau. Une attention particulière sera portée aux projets portant sur le transfert parcelle-bassin versant, les changements d'échelle spatiale et temporelle ou à ceux faisant intervenir une spatialisée des données (recours à des SIG par exemple). La constitution d'une base de données géoréférencées demeure en dehors de l'appel d'offres.

Les projets contribueront à la mise en évidence des variables environnementales clés, ainsi qu'à la formalisation des observations sous la forme de modèles de prévision et de gestion, et d'indicateurs de risques parcelaires,

utilisables pour la construction de systèmes de conseils aux utilisateurs. Leur intégration dans des systèmes d'analyse des risques environnementaux ou d'autres systèmes de traitement de l'information devrait permettre des applications prédictives dans les études d'impact et dans les simulations environnementales, ou la conception d'opérations de prévention visant à limiter les transferts.

Les résultats du présent volet du programme de recherche devraient apporter un soutien significatif aux deux autres volets.

Des projets de recherches sont demandés sur les thèmes suivants :

1.1 - Passage dans l'atmosphère et transport atmosphérique.

Diverses études ont montré que les passages de pesticides dans le compartiment atmosphérique sont relativement importants, ce qui peut affecter in fine les niveaux d'exposition des populations humaines, en particulier en milieu rural, et même, après dépôt, la qualité et éventuellement le fonctionnement des milieux naturels. L'objectif de ce programme n'est pas de financer la mise en place d'un réseau de mesures mais d'évaluer l'importance réelle de ce phénomène, d'identifier ses déterminants et de se donner les moyens de le contrôler. Parallèlement à la poursuite des mesures sur les réseaux disponibles, il est donc demandé de développer des recherches qui visent à :

- Identifier les molécules et les raisons de leur présence dans l'atmosphère, les périodes et mécanismes d'émission en relation avec la nature des molécules, les conditions du milieu et les pratiques (modalités d'apport, état physique des sols, appareils de traitement et dérivés



- éventuelles, volatilisation à partir du sol et/ou des dépôts sur les végétaux...)
- caractériser les modalités de transport, à l'échelle locale ou régionale, afin d'évaluer, si possible, les distances de transport des résidus,
- élaborer des indicateurs d'exposition.

Les difficultés de l'échantillonnage et du dosage des pesticides sont nombreuses et rendent les recherches sur ce thème particulièrement difficiles. Le Conseil scientifique et le Comité d'orientation seront particulièrement attentifs aux projets associant des compétences en physique des transferts et en chimie analytique.

1.2 - Transferts dans les bassins d'alimentation des cours d'eau et des nappes ; dynamique de la contamination des milieux aquatiques.

Les milieux aquatiques, incluant les eaux souterraines, superficielles continentales et marines, sont très exposés à la contamination diffuse par les pesticides : il leur donc promouvoir des recherches pour mieux représenter l'étendue et la variabilité spatiale et temporelle de cette contamination, et suivre les principales tendances. Il conviendrait d'étudier les relations entre les niveaux de concentration et l'utilisation des produits, et les relations entre les concentrations et les régimes hydrologiques. Dans l'objectif d'identifier des zones et des pratiques à risques, une priorité sera donnée aux projets qui permettront de contribuer à l'établissement d'une typologie de sensibilité des sols au transfert des pesticides, notamment en s'intéressant aux questions suivantes :

- quelle est la part relative des transferts latéraux (ruissellement, circulation à faible profondeur) et des transferts verticaux (lents et rapides) ?
- quelles sont les voies préférentielles d'écoulement et quelles sont les variables susceptibles d'être facilement introduites dans des modèles afin de quantifier leur rôle, à différentes échelles : fissures à l'échelle de la parcelle, réseau de fossés ou de drains à l'échelle des bassins versants ?
- quelles sont les cinétiques de dégradation des pesticides et/ou d'apparition de métabolites, in situ dans les sols ? Comment paramétrer ces phénomènes et en tenir compte dans l'établissement de typologies ?

L'intégration des réponses à ces questions dans des modèles doit contribuer à une meilleure prévision des risques de contamination des milieux aquatiques. Elle doit également permettre de proposer des aménagements pour protéger les milieux aquatiques : comment concevoir des zones tampon limitant les transferts vers les cours d'eau ou les fossés (bandes enherbées, aménagement de parcelles, haies ou autres) ? Peut-on préciser leurs caractéristiques et leur répartition dans l'espace, en tenant compte de l'importance des zones contributives au ruissellement, et évaluer la pérennité de leur rôle tampon, condition pour une réelle efficacité ?

1.3 - Retention et dégradation dans les milieux aquatiques et terrestres.

Les cinétiques de ces deux phénomènes conditionnent à la fois l'efficacité de certains produits (pénétration dans les racines des plantes adventices, lutte contre des insectes ou champignons du sol) et leur persistance sous une forme ou une autre dans l'environnement. Avec tous les risques de perturbation des communautés vivantes que cela comporte et, bien entendu, de transfert vers les milieux connexes, il n'est pas demandé de procéder à des tests de dégradation biologique ou abiotique en conditions simplifiées mais plutôt d'analyser le devenir des résidus à un niveau minimum qui est celui de la parcelle.

Il est souhaité que certains projets abordent l'extraction, la formation et le devenir des résidus non facilement extractibles, du point de vue des phénomènes susceptibles de conduire à leur libération et/ou de les rendre biodisponibles, ce dernier point étant considéré comme prioritaire. Ceci concerne aussi bien les sols que le compartiment sédimentaire, compte-tenu de son importance dans le cycle des produits et de ses particularités physico-chimiques. Des études de laboratoire pourront être proposées dans le cadre d'approches couplées laboratoire-terrain, dans la mesure où elles permettent d'expliquer des observations effectuées in situ ou de simuler des conditions de terrain plausibles. Compte-tenu des caractéristiques des pesticides actuellement utilisés et de la somme de connaissances disponibles, la réalisation d'expérimentations portant sur la bioaccumulation de pesticides ne constitue pas une priorité de ce programme.

PR

1 - C

Les p
l'uni d
uni g
mulat

Les co
mette
des et
comp
quien
Pour
et de
dans l
région
etc.)
mend
sance

En 199
se sor
eau-p
tiels q
tuculo

2 - I

Les r
conna
d'éc
ainsi
écoss
rédui

Cet a
organi
(phyto
Malg
consti
de la p
ancier
l'envie
clotric

VOLET 2 - ÉVALUATION DES EFFETS CHRONIQUES DES PESTICIDES SUR DES SYSTÈMES BIOLOGIQUES INTÉGRÉS

Les effets des pesticides sur la santé humaine ne sont pas abordés dans le cadre du présent programme. Les projets se limiteront à l'étude de leurs effets sur la flore, la faune et les micro-organismes, et des dysfonctionnements des écosystèmes qui en découlent¹. Ils devront notamment permettre l'identification de biomarqueurs et/ou de bioindicateurs permettant d'évaluer la présence et les effets des pesticides dans les différents compartiments de l'environnement. L'étude des voies de contamination (trophique ou autre) pourra être réalisée en complément de celle des effets biologiques.

Les projets développés devront être menés en priorité sur des systèmes complexes, c'est à dire soit des dispositifs

expérimentaux qui intègrent des constituants physico-chimiques réalistes et des organismes occupant des niches écologiques différentes, soit des sites de terrain. Dans le premier cas, il convient que la conception des dispositifs expérimentaux permette le déroulement de processus biologiques complexes (cycle des nutriments par exemple) et les interactions entre individus appartenant à une même espèce et/ou à des espèces différentes. Le cas échéant, il pourra être fait appel à des expérimentations dans des systèmes simplifiés (bioméris, tests monospécifiques, études in vitro, etc.), mais uniquement en vue de fournir des éléments d'explication des observations réalisées dans les systèmes complexes. Les études devront être prioritairement consacrées aux effets des faibles doses de pesticides. Il s'agira de promouvoir des travaux conduisant à accroître les connaissances sur les points suivants :

¹ L'objectif des projets proposés ne doit pas être de retarder ce qui se fait dans les procédures d'évaluation de risques actuelles, mais d'améliorer les connaissances en vue éventuellement de les faire évoluer.



2.1 - Analyse des effets des pesticides à différents niveaux d'organisation biologique.

Les études proposées devront simuler une exposition réaliste d'un point de vue environnemental (niveau, fréquence, durée) à différents niveaux au sein d'une même espèce (effets cellulaires et subcellulaires, performances individuelles, dynamique de la population) et, si possible, en considérant cette espèce dans le contexte de la communauté à laquelle elle appartient. Ceci devrait permettre la mise en évidence d'éventuelles cascades d'effets, lesquelles peuvent avoir des conséquences importantes au niveau des écosystèmes. Le recours à des travaux de laboratoire peut être envisagé, mais uniquement s'il vient en appui d'une approche expérimentale se déroulant dans un contexte réaliste d'un point de vue environnemental. Il est par ailleurs indispensable que les travaux proposés s'inscrivent dans une démarche systémique et qu'ils ne concernent pas qu'un seul aspect (génomique, fonctionnelle ou dynamique de population par exemple).

Les approches faisant intervenir la génétique des populations, aussi bien du point de vue des effets des pesticides sur la structure génétique des populations d'espèces non-cibles (pesticide en tant que pression de sélection) que des conséquences des effets au niveau génétique sur le devenir des populations (lien entre diversité génétique et dynamique des populations par exemple) seront particulièrement appréciées.

La recherche de tout autre indicateur d'effets (séquences comportementales en relation avec des processus vitaux tels que la reproduction, la recherche de nourriture ou l'évitement des prédateurs par exemple) est encouragée.

2.2 - Effets des pesticides sur les communautés.

Les pesticides sont susceptibles d'altérer, par des effets directs et/ou indirects, les équilibres dynamiques au sein des communautés. Les conséquences peuvent se manifester en terme de structure des assemblages d'espèces (richesse spécifique, diversité, etc.) mais aussi d'un point de vue fonctionnel (décomposition de la matière organique, productivité primaire, recyclage des nutriments, etc.). Les propositions de recherche ne doivent pas se limiter à des inventaires fonctionnels et/ou floristiques mais intégrer des descripteurs structurels et fonctionnels.

Dans ce contexte, priorité sera donnée aux expérimentations portant sur des assemblages d'espèces placées dans des conditions environnementales réalistes. Par ailleurs, le fait que les communautés naturelles, du fait de l'anthropisation généralisée des milieux, présentent des caractéristiques particulières liées à leur "histoire écotaxicologique" devra être pris en compte dans les travaux réalisés *in situ* pour l'interprétation des résultats.

Dans le cas des études de terrain, la prise en compte de la dynamique spatio-temporelle des populations (lien avec d'autres populations, flux migratoires), des communautés et des paysages (connectivité par exemple) est souhaitée.

2.3 - Effets des pesticides sur les micro-organismes des sols et des milieux aquatiques.

Les micro-organismes (bactéries, champignons, microalgues, ...) constituent des éléments fondamentaux des cycles de la matière et de l'énergie dans les écosystèmes et, pour certains d'entre eux, des auxiliaires potentiels pour la lutte contre les organismes nuisibles. Les projets proposés dans le cadre de ce thème de recherche auront pour objet d'évaluer l'impact des pesticides et de leurs produits de dégradation sur les communautés de micro-organismes des terres cultivées et des milieux récepteurs. Une attention particulière devra être apportée aux paramètres fonctionnels mesurables sur ces communautés et sur leur réponse à la présence de pesticides. Le développement de nouveaux outils n'est pas exclu mais il ne sera retenu que dans le cas où une démarche claire de validation est proposée.

Les études traitant uniquement des phénomènes de biodégradation sont en dehors du champ thématique couvert par l'appel à propositions.

Remarque : Une attention particulière sera accordée aux travaux sur des mélanges de produits (mélanges de substances actives, mélanges de substances actives et d'adjuvants entrant dans la composition des formulations, voire même mélanges de formulation) et aux scénarios d'exposition réalistes (succession de plusieurs traitements - avec des produits à finalités différentes : herbicides, fongicides, insecticides - pour reconstruire un itinéraire technique par exemple ou, dans le cas des milieux aquatiques, la succession des transferts en fonction de la diversité des cultures pratiquées sur le bassin versant).

VOLET 3 - NOUVELLES APPROCHES VISANT À RÉDUIRE LES RISQUES LIÉS À L'USAGE DES PESTICIDES

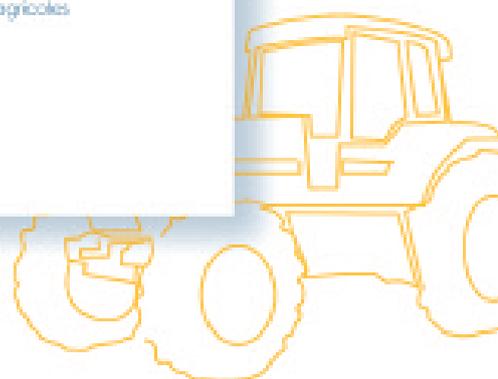
Il est demandé ici des travaux permettant d'accroître les connaissances sur les points suivants :

3.1 - Conception de techniques limitant les risques liés à l'usage des pesticides.

3.1.1. Diminution des quantités utilisées et stratégies culturales réduisant les risques.

Une part majeure des pesticides étant utilisée sur les cultures, la mise au point de nouvelles stratégies de protection des plantes contre les maladies ou ravageurs, économisant en pesticides ou faisant intervenir des pratiques qui permettent de réduire la persistance des pesticides dans les sols et leur entraînement dans l'atmosphère et les eaux, entre dans le cadre de cet

appel à propositions. Les stratégies proposées devront être examinées non seulement d'un point de vue biologique (efficacité contre les « ennemis » des cultures), mais aussi agronomique (cohérence avec les objectifs de production et les autres techniques agricoles), économique (conditions de rentabilité, coût de mise en œuvre...) et environnemental. Priorité sera donnée aux projets qui seront non seulement innovants sur le plan scientifique, mais également susceptibles de conduire à des diminutions significatives de l'usage des pesticides les plus néfastes pour l'environnement. Une argumentation précise sera donnée pour estimer les recombées économiques et environnementales potentielles des stratégies de réduction des traitements. En d'autres termes, elles devront contribuer à une évolution des systèmes agricoles dans le sens d'une agriculture durable.



3.1.2. Techniques de lutte non chimique.

Les études auront pour objectif de connaître l'efficacité in situ des techniques de lutte non chimique, la détermination des conditions d'une efficacité durable, la mise au point de leur complémentarité éventuelle avec les techniques de lutte chimique, et l'évaluation de leur impact sur la durabilité des systèmes agricoles :

- efficacité et durabilité des techniques de lutte non chimique : méthodes physiques de lutte, lutte biologique, utilisation des résistances variétales (résistances à des maladies ou à des parasites), méthodes culturales. Les études en conditions de milieu réel devront être privilégiées, en ayant soin de préciser l'importance et la représentativité des cas choisis (région d'étude, couple Hôte - Pathogène, type de système de culture...);

- insertion des techniques de lutte non chimique dans les systèmes de culture : compatibilité avec les autres techniques culturales, et avec les successions pratiquées ou économiquement envisageables ; compatibilité avec un objectif de maîtrise de la qualité des produits agricoles ; impacts environnementaux directs et indirects ; mise au point de systèmes de culture intégrant les techniques de lutte non chimique, en complément ou non des techniques de lutte chimique ; évaluation des conséquences de la mise en œuvre de ces techniques sur la réduction effective de l'emploi des pesticides et la pérennité des systèmes de production.

3.2 Évaluation socio-économique de l'usage des pesticides.

L'accès à une meilleure efficacité environnementale des politiques publiques passe nécessairement par la mobilisation de connaissances produites à différentes échelles spatiales dans les domaines :

- de la sociologie (perception des risques liés à l'usage des pesticides, acceptabilité de l'innovation et du changement, processus de transfert du savoir...),
- et de l'économie (évaluation des politiques et programmes d'action).

Les études devront avoir pour objectifs :

- d'évaluer les risques liés à l'usage des pesticides,
- de dégager les déterminants de la mise en œuvre de différentes pratiques et de l'utilisation de pesticides dans différents domaines,
- et d'identifier les conditions économiques, sociales ou réglementaires d'un développement de méthodes de protection chimique raisonnée, de protection intégrée, non chimique, ou basées sur de bonnes pratiques.

Des études sont demandées sur les points suivants :

3.2.1. Analyse socio-économique des risques liés à l'usage des pesticides.

- Perception de ces risques chez les utilisateurs, fournisseurs et conseillers. Comment se fait une opinion sur les risques liés à ce type de produits ? Les divers acteurs concernés s'affrontent-ils sur la qualification de ces produits ? Il serait intéressant de rendre compte du travail de mobilisation et d'expertise qui structure la lutte associative contre les risques environnementaux. Il conviendrait aussi d'identifier le contenu que l'on donne au principe de précau-

* Dans cette partie l'origine de la résistance est indifférente. En revanche, les recherches sur les mécanismes d'acquisition ou de transfert de la résistance ne relèvent pas de cet appel à propositions.

tion et les voies différentes que l'on envisage pour la mise en œuvre.

- Ou l'est ce que les utilisateurs considèrent comme de « bonnes pratiques » ou inversement comme des pratiques à risque ? En ce qui concerne la proposition de méthodes alternatives, des enquêtes pourront porter sur les raisons susceptibles d'expliquer les freins éventuels à l'utilisation des méthodes non chimiques.

- Élaboration des valeurs réglementaires et adoption de celles-ci dans l'évaluation des risques et l'appréciation de la qualité. Les questions porteront notamment sur la genèse de la réglementation et l'évolution des positions des différents acteurs au cours des débats et controverses. Une attention particulière sera portée sur les aspects de la politique que jouent les médias dans ces controverses. Des études sur les polémiques qui se sont déroulées ces dernières années permettront d'étudier les thèmes récurrents auxquels sont associés les pesticides et la forme particulière que prend ce débat public. Dans cet ordre d'idées il serait intéressant de comparer l'évaluation et la gestion des risques liés aux pesticides avec la gestion d'autres risques liés aux produits agricoles.

3.2.2 Acceptabilité de l'innovation et du changement.

Les études porteront sur l'identification et la caractérisation des acteurs et processus conduisant les exploitants agricoles à adhérer aux programmes d'action qui leur sont proposés et à modifier leurs comportements vis-à-vis de l'usage des pesticides, en prenant en compte le Contexte national (Loi d'Orientation Agricole) et européen (Politique Agricole Commune). On s'intéressera particulièrement à l'influence des thèmes de développement, des canaux de diffusion de l'information technique, et des relations contractuelles des exploitants avec leur travail sur les perspectives de développement de la protection intégrée et des méthodes de lutte non chimique.

3.2.3 Processus de transfert de savoir.

Avec un besoin de plus en plus prégnant d'efficacité, une approche globale ou intégrée des milieux naturels et des démarches d'évaluation des politiques qui se généralisent, les décideurs et gestionnaires souhaitent pouvoir identifier l'état du savoir et accéder aux informations dans des délais normaux et sous une forme compréhensible. Dans ce contexte, des travaux pourront être proposés sur la caractérisation des processus de transfert, l'étude des freins et la proposition de méthodes ou démarches innovantes.

3.2.4 Évaluation des politiques et programmes d'action.

Pour appuyer les décideurs et gestionnaires dans l'orientation de leurs choix, la recherche d'une meilleure efficacité des politiques sur l'eau et des programmes qui les accompagnent suppose de disposer de méthodes et d'outils permettant ex ante l'évaluation de solutions alternatives. Dans le domaine des pesticides, très peu d'applications de ce type sont actuellement disponibles. Les études conduites pourront porter sur l'analyse de cas mobilisant les approches coûts-avantages, coût-efficacité, analyse multicritères...

4- SÉLECTION DES PROJETS

- Les projets de recherche proposés devront avoir pour objectif d'aider les gestionnaires et les pouvoirs publics à essai-er leurs décisions sur des bases scientifiques bien établies : ils devront tenir compte des pratiques réelles : produits, doses, mélanges, périodes d'apports, etc. Les équipes devront indiquer clairement quelles sont les perspectives d'applicabilité et de transfert de leurs travaux. Les projets associant organismes de recherche fondamentale et instituts techniques sont encouragés.
 - Les projets regroupant des compétences sur plusieurs des thèmes couverts par l'appel à proposition seront particuliè-rement appréciés. Une attention particulière sera portée aux liens avec des équipes européennes ou projets européens. Le conseil scientifique se donne la possibilité de retenir toute proposition originale et de proposer aux équipes de recherche des regroupements.
 - Par ailleurs, les scénarios envisagés ne devront pas faire uniquement référence au contexte métropolitain, les situa-tions propres aux DOM-TOM étant aussi considérées comme pertinentes.
 - Compte-tenu de l'état des connaissances, les projets portant sur le milieu littoral et le milieu marin seront particu-lièrement appréciés.
 - En ce qui concerne les aspects analytiques, les équipes devront fournir un argumentaire sur la métrologie des fai-bles doses.
 - Le choix des substances étudiées devra être clairement justifié. La substance retenue devra de préférence soit offrir des possibilités d'interpolation avec des molécules de la même famille chimique, soit être une substance modèle utilisée en tant qu'outil dans un but expérimental (étude de la résilience des communautés en fonction de leur biodiversité, rôle des pesticides en tant que facteur de sélection au sein des populations, etc.).
- Il conviendra de privilégier les substances :
- figurant sur la liste des substances actives dont on sait qu'elles vont être réévaluées au niveau européen dans les années à venir en vue d'obtenir une autorisation de mise sur le marché en tant que produit phytosanitaire (directive 91/414) ou biocide (directive 98/8),
 - inscrites à l'annexe I de la directive 91/414, c'est à dire réévaluées.
- Les projets concernant la bio-réhabilitation de sites contaminés ou l'utilisation d'organismes génétiquement modi-fiés sont exclus de cet appel à propositions, certains pouvant par ailleurs être proposés dans le cadre d'autres pro-grammes (programme GESSOL, par exemple).

Les propositions seront analysées par :

- le Conseil scientifique, qui examinera les projets et évaluera leur adéquation à l'appel à propositions de recherche, leur originalité scientifique, leur qualité méthodologique, les compétences scientifiques des équipes et leurs complémentarités et la faisabilité des projets,
- le Comité d'orientation, qui sélectionnera les projets, en fonction des priorités de recherche établies.

Les propositions de recherche doivent être présentées selon le modèle joint en recto-verso, sans couverture cartonnée ou plastique, ni spine, pour le 13 septembre 2002 au plus tard : elles doivent parvenir à :

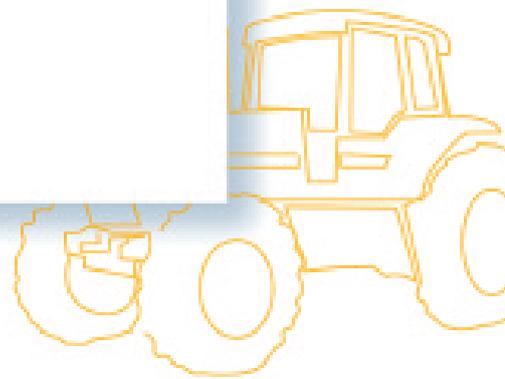
Catherine BASTEN VENTURA
Ministre de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement
DNE /SRP
20 avenue de Ségur
75302 PARIS 07 SP
catherine.basten-ventura@environnement.gouv.fr

En 2 exemplaires papier (proposition complète)
Et une version électronique – format RTF
(récapitulatif et fiche financière)

et à

Ilène MYROPE
INERIS
9 rue de Rocroy
75010 PARIS
ineris.myrope@wanadoo.fr

En 20 exemplaires papier (proposition complète)
Et une version électronique – format RTF
(récapitulatif et fiche financière)



Programme « Évaluation et Réduction des Risques liés à l'Utilisation des Pesticides »

APPEL A PROPOSITIONS DE RECHERCHE 2006

Introduction - Eléments de contexte

Les questionnements sur les usages actuels des pesticides, leur dispersion dans l'environnement, leurs impacts écologiques et la recherche de solutions permettant d'envisager une alternative ou une réduction de ces usages, voire dans certains cas de pouvoir se passer de ces substances, sont à l'origine d'une demande sociétale forte et multiforme.

Ces différents aspects ont été abordés lors du premier colloque de restitution du Programme finalisé "Évaluation et Réduction des Risques liés à l'Utilisation des Pesticides" organisé en Avignon (14-16 novembre 2005¹). Ils ont aussi été au centre des travaux de l'Expertise Scientifique Collective (ESCo) "Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux" réalisée par l'INRA et le Cemagref (www.inra.fr/expertise-pesticides) à la demande des ministères de l'Écologie et du Développement Durable et de l'Agriculture et de la Pêche, dont le colloque de restitution s'est tenu à Paris le 15 décembre 2005.

De nombreuses actions réglementaires en cours de mise en place ou à venir font par ailleurs explicitement référence à la problématique de l'utilisation des pesticides et des risques associés à cette utilisation :

- Réforme de la Politique Agricole Commune et mise en place de la conditionnalité,
- Mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE),
- Préparation du Plan Interministériel de Réduction des Risques liés aux Pesticides,
- Projet de Directive Cadre européenne sur les sols (<http://europa.eu.int/com/environnement/sol/index.htm>),
- Projet de Directive Cadre européenne sur les pesticides (<http://europa.eu.int/com/environnement/ppps/home.htm>).

¹ Caquet Th. & Bastien-Ventura C. (coord.), 2005. Pesticides, comment réduire les risques associés ? Actes du Colloque de Restitution du programme "Évaluation et Réduction des Risques liés à l'Utilisation des Pesticides", Avignon, 14-16 novembre 2005, 220 p.

Questions adressées à la recherche

Qu'il s'agisse de la future directive pesticides, ou de directives connexes comme la DCE ou le projet de directive sur les sols, la capacité de relier des pressions anthropiques telles que celles associées à la contamination de l'environnement par les pesticides, à des impacts chimiques ou écologiques constitue un point déterminant.

Cette démarche peut s'envisager *a priori* (évaluation des risques) ou *a posteriori* (suivi post-homologation, diagnostics environnementaux, etc.) ; sa mise en œuvre soulève de nombreux problèmes méthodologiques, qui ne peuvent être considérés comme étant tous surmontés actuellement et qui peuvent se décliner en de très nombreuses questions de recherche :

- Choix des modèles utilisés en évaluation des risques, le terme "modèle" étant employé ici dans son acception la plus large (simulation des conditions d'exposition, choix des espèces ou groupes d'espèces d'intérêt, etc.).
- Questionnement sur le caractère adapté ou non des procédures d'évaluation des risques des pesticides dans le cas des milieux tropicaux/équatoriaux et pour les milieux aquatiques non dulçaquicoles (eaux de transition, estuaires, eaux côtières).
- Pertinence des réseaux de surveillance actuels, définition et validation de nouvelles stratégies de mise en œuvre de ces réseaux, y compris en régions tropicales/équatoriales, incluant notamment le développement de techniques adaptées aux molécules les plus récentes.
- Validité des valeurs seuils réglementaires (normes de qualité environnementales, DCE), selon les compartiments de l'environnement concernés et transfert en régions tropicales/équatoriales.
- Compréhension du déterminisme de la distribution spatio-temporelle des concentrations en pesticides dans les différents compartiments de l'environnement, y compris biologiques.
- Mise en relation des données d'exposition aux pesticides dans les différents compartiments de l'environnement (eaux, air, sols, organismes vivants) avec des effets biologiques.
- Mise en relation des contaminations (expositions) observées avec les pratiques des utilisateurs de pesticides d'une part et les impacts environnementaux d'autre part.
- Questionnement sur la stratégie de mise en œuvre et l'interprétation des études de suivi post-homologation.

D'autre part, la limitation du recours aux pesticides apparaît comme le meilleur moyen pour réduire la contamination de l'environnement par ces substances et leurs impacts. Dans ce domaine, l'examen des propositions actuelles et de leur degré d'adoption met en exergue divers besoins :

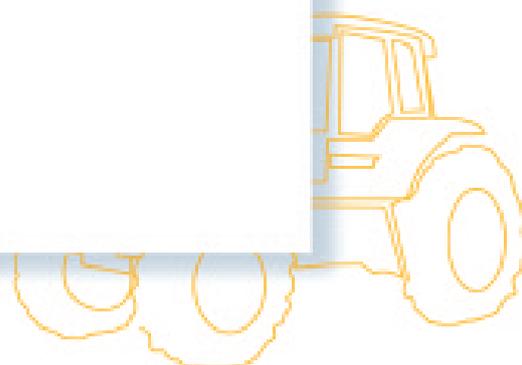
- Besoin de méthodes de caractérisation des pratiques phytosanitaires et leurs

déterminants au sein des principaux systèmes de cultures existants.

- Disponibilité insuffisante de méthodes/pratiques alternatives économes en pesticides, voire ne nécessitant pas le recours à ces substances. Besoin d'une recherche systémique pour développer des méthodes alternatives efficaces et durables.
- Nécessité d'une évaluation *ex ante* de ces méthodes/pratiques (impacts économiques et écologiques, acceptabilité, insertion dans les systèmes d'action).
- Questionnement sur les conditions du développement des méthodes alternatives, qui apparaît fréquemment comme très lent, manque de connaissances sur des applications en vraie grandeur.
- Nécessité de fixer des objectifs à moyen ou long terme et de définir/mettre en œuvre des indicateurs qui permettent de caractériser l'état d'une situation et son évolution.

Les objectifs de cet APR sont de favoriser l'émergence de projets qui abordent certaines de ces questions et qui permettent de combler ainsi certaines des lacunes mises en évidence au cours des travaux financés par les précédents APR du Programme. Il s'agit notamment d'apporter des éléments de connaissance dans le domaine de la caractérisation couplée des mécanismes de transfert des pesticides et de leur impact sur l'état chimique et écologique des milieux naturels. Dans la mesure du possible, cette caractérisation sera associée à l'évaluation des performances de différents scénarios destinés à réduire le transfert des pesticides, à raisonner leur usage, à développer la mise en œuvre de systèmes moins dépendants des pesticides (voire non dépendants), à apprécier la faisabilité et les impacts environnementaux du recours à des méthodes alternatives (cas par exemple de la lutte contre *Aedes albopictus* dans l'île de la Réunion).

Contrairement aux APR précédents, et afin de favoriser l'émergence de projets faisant intervenir conjointement des équipes spécialisées dans le domaine de l'étude de la dynamique et des impacts, cet APR ne comporte que deux volets. L'articulation, dans les mêmes projets, de travaux relevant des volets 1 et 2 de l'APR est par ailleurs vivement souhaitée.



Domaines couverts par l'APR

- La santé humaine est en dehors des domaines couverts par l'APR.
- L'APR concerne les substances actives pesticides (substances de synthèse, biopesticides ; molécules mères mais aussi métabolites majeurs) utilisées en protection des cultures, ainsi que pour des usages non agricoles (zones urbaines, lutte antivectorielle, biocides, etc.). Les molécules faisant l'objet de propositions de recherche peuvent éventuellement être des molécules ayant fait ou allant faire l'objet d'un retrait d'homologation, à condition que leur choix en tant que molécules modèles soit explicité et que les possibilités de transfert des connaissances acquises à d'autres substances soient argumentées. Seules les substances biocides utilisées comme

produits antiparasitaires (TP 14 à TP18 selon l'annexe V de la directive 98/8/CE : rodenticides, avicides, molluscicides, piscicides, insecticides, acaricides et produits utilisés pour lutter contre d'autres arthropodes) seront concernées. Les substances médicamenteuses (médicaments vétérinaires) ne sont concernées que s'il s'agit de molécules utilisées par ailleurs en tant que pesticides.

- L'APR n'a pas vocation à soutenir des observatoires ou des sites ateliers ; en revanche, les projets s'appuyant à un titre ou un autre sur un observatoire ou un site atelier sont recevables dans la mesure où la question scientifique qu'ils abordent est correctement circonscrite.

Volet 1. Pesticides et milieux naturels : évaluation a priori et suivi post-homologation

Le regroupement des thèmes "Dynamique des pesticides dans l'environnement" et "Évaluation des effets chroniques des pesticides sur des systèmes biologiques intégrés" des précédents APR en un seul volet correspond à un besoin fort en terme de projets de recherche novateurs abordant simultanément ces deux aspects. Toutefois, des projets portant uniquement sur l'une ou l'autre de ces thématiques peuvent être proposés. Leurs auteurs devront alors s'attacher à expliquer en quoi les travaux projetés s'inscrivent dans une démarche susceptible d'apporter des réponses cohérentes aux questionnements généraux évoqués dans l'introduction à cet APR.

L'objectif des projets de recherche proposés dans le cadre de ce volet doit être de produire des connaissances nouvelles ou de proposer des méthodologies permettant de faire évoluer les procédures d'évaluation des risques des pesticides pour les milieux naturels, que ce soit dans le cas de l'évaluation *a priori* des substances actives ou dans celui du suivi post-homologation.

Les projets pourront porter sur des usages non agronomiques des pesticides ou des produits/techniques alternatifs aux pesticides. Les projets privilégiant des développements méthodologiques dans le domaine de l'échantillonnage et de l'analyse des matrices environnementales seront éligibles dans la

mesure où ces développements s'inscrivent dans le cadre d'un projet plus vaste.

Trois axes de recherche ont été retenus. Le premier porte sur les réseaux de surveillance de la contamination de l'environnement par les pesticides. Le deuxième concerne l'amélioration des procédures d'évaluation des risques *a priori*. Enfin, le troisième aborde la caractérisation des effets des pesticides sur les écosystèmes (évaluation des risques *a posteriori*).

1.1. Réseaux de surveillance de la contamination de l'environnement par les pesticides

Les réseaux de surveillance de la contamination de l'environnement par les pesticides constituent des outils essentiels pour les gestionnaires de l'environnement. Des analyses convergentes soulignent les limites des réseaux actuels. Ces limites découlent notamment des stratégies d'échantillonnage et des méthodes analytiques mises en œuvre. Elles sont aussi la conséquence de lacunes dans la connaissance des caractéristiques spatiales et temporelles du devenir des substances ainsi que des difficultés inhérentes à l'interprétation des données ainsi obtenues en terme de risque écotoxicologique. Dans ce contexte, des projets sont attendus notamment sur :

- Le déterminisme de la répartition spatio-temporelle des concentrations en pesticides dans les différents compartiments de l'environnement, y compris biologiques.

- Le rôle de la végétation et des résidus de récolte dans la dynamique des résidus de pesticides dans les sols.
- Le développement et la validation de stratégies de surveillance des pesticides dans les zones marines côtières, y compris en régions tropicales/équatoriales. Une attention particulière devra être apportée à la prise en compte de la saisonnalité des phénomènes.
- La définition et/ou la mise en œuvre de protocoles de tests (applicables en particulier *in situ*) des normes de qualité environnementale (NQE) pour les pesticides dans l'eau.

1.2. Amélioration des procédures d'évaluation des risques a priori

Les procédures d'évaluation des risques *a priori* utilisées actuellement sont globalement satisfaisantes. Toutefois, des validations sont encore parfois nécessaires pour certains des modèles utilisés et il y a des interrogations récurrentes sur la pertinence de ces procédures pour certains usages ou pour certains écosystèmes. Des projets basés sur une analyse critique des procédures existantes sont attendus, qui apportent des données sur :

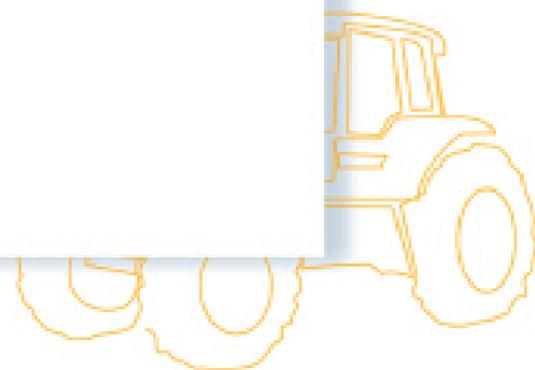
- La comparaison des prévisions des scénarios et modèles mis en œuvre dans le cadre de l'évaluation *a priori* avec des observations réelles en vue de la validation ou de l'amélioration des outils de l'évaluation des risques.
- L'exposition par voie atmosphérique et sa traduction en terme d'évaluation des risques.
- L'évaluation des méthodologies actuelles pour l'évaluation des risques pour les systèmes tropicaux et équatoriaux (tous milieux) et pour les milieux aquatiques littoraux (estuariens) et le milieu marin. Le cas échéant, des propositions d'amélioration et/ou d'adaptation devront être formulées et testées.

- Les conséquences de l'écart à la stationnarité des systèmes sur l'évaluation des risques.

1.3. Caractérisation des effets des pesticides sur les écosystèmes

Le faible nombre d'études convergemment menées sur la relation causale entre l'exposition aux pesticides dans les différents compartiments de l'environnement (eaux, air, sols) et les effets écotoxicologiques associés a notamment été mise en évidence dans le cadre de l'ESCO INRA-Cemagref. Les projets de recherche proposés ici pourront concerner notamment :

- L'amélioration de la caractérisation des termes d'exposition des organismes non-cibles et la mise en relation avec des effets biologiques à différents niveaux d'organisation. Il s'agira notamment de s'intéresser à la biodisponibilité des pesticides dans les différents compartiments de l'environnement.
- La réactualisation de la connaissance de la contamination des eaux marines côtières et des zones de transition, et de ses effets écotoxicologiques ; l'approche par la connaissance de la dynamique de transfert dans le continuum bassin versant / zone côtière devra être privilégiée, y compris pour les régions tropicales/équatoriales.
- La mise au point, la calibration et la validation d'outils de bioindication animale et végétale de la qualité des sols pollués par des pesticides.
- La définition et validation de protocoles permettant l'évaluation des risques écotoxicologiques *in situ* sur tous types d'organismes, susceptibles notamment d'être utilisés dans le cas des études de suivi post-homologation ou pour le suivi de plans d'action mis en œuvre à différentes échelles spatiales (groupes régionaux "phytos" par exemple).



Diverses propositions destinées à réduire l'utilisation des pesticides, qui se déclinent à différentes échelles temporelles (ajustement tactique des interventions, stratégies de campagne-itinéraires techniques, stratégies de long terme) et spatiales (parcelle, îlot de parcelles, bassin versant, bassin de production, régions, pays), ont été faites dans les années passées, mais elles présentent un niveau d'adoption globalement faible. Les projets de recherche pourront se centrer sur la formulation et le test de nouvelles propositions, mais on attend aussi des travaux permettant d'identifier les freins à cette adoption et les leviers sur lesquels il conviendrait d'agir. Les projets pourront aussi concerner les pratiques actuelles d'utilisation des pesticides, s'ils ont pour objectif de caractériser leurs déterminants en vue d'identifier les leviers d'action les plus pertinents et de mieux cibler les recherches en terme de conception/évaluation de systèmes de culture économes en pesticides. Cette caractérisation devra alors s'appuyer sur les bases de données existantes (enquêtes du SCEES¹ par exemple).

Quatre axes de recherches ont été identifiés. Deux considèrent directement les pratiques des agriculteurs et de leur environnement technico-économique. Ils portent d'une part sur les solutions techniques permettant d'utiliser moins de pesticides et d'autre part sur l'adoption de pratiques innovantes. Les approches proposées devront contribuer à une évolution des systèmes techniques (agricoles en particulier) dans le sens d'un développement durable. C'est pourquoi, au-delà de la proposition de démarches agronomiquement innovantes, les projets de recherche relevant de ce volet devront impérativement prendre en considération l'insertion de ces méthodes alternatives dans les systèmes de culture et/ou les dynamiques territoriales et leurs impacts socio-économiques et environnementaux. On pourra également s'intéresser aux méthodes de caractérisation des pratiques phytosanitaires et à leurs déterminants au sein des principaux systèmes de cultures existants. Les deux autres axes sont relatifs à la décision publique ; le premier aborde la question de la forme de l'intervention publique dans le domaine de la régulation de l'utilisation des pesticides, et le second le thème de l'évaluation des effets non-intentionnels des pesticides (y

compris dans les cas d'usages non agronomiques).

2.1. Stratégies innovantes : protection et production intégrées

Des projets sont attendus en ce qui concerne la proposition de solutions alternatives, en priorité pour les cultures fortement consommatrices de pesticides. Les projets devront considérer :

- les aspects agronomiques des solutions proposées (interférences avec les systèmes de culture et de production)
- leurs aspects socio-économiques (coûts de mise en œuvre, marges, organisation du travail, quantification des risques de production, quantification des risques d'erreur, ...).
- leurs aspects environnementaux (utilisations de pesticides, transferts potentiels, impacts sur la biodiversité...).

Ils devront prendre en compte, en fonction des caractéristiques spécifiques des cas d'étude, les échelles de la parcelle, de l'exploitation agricole, du paysage, du bassin versant ou du bassin de production, et les relations entre ces différentes échelles. Le domaine de pertinence (en terme d'extension géographique, de systèmes de production ou de paysages concernés) de ces solutions alternatives devra aussi être étudié. Enfin, dans la mesure du possible, une comparaison de l'efficacité et des impacts de ces solutions avec les solutions conventionnelles est attendue.

Les travaux à caractère méthodologique sur le développement ou l'adaptation d'indicateurs ou d'outils de caractérisation des nouveaux systèmes de production ou de gestion des paysages seront également considérés. Ils pourront se décliner à différentes échelles temporelles et spatiales (nationale, mais aussi régionale ou locale comme par exemple dans le cas de la mise en œuvre de plans d'action). Ils devront comporter une phase de validation impliquant l'utilisation de données réelles (sites des groupes régionaux "phyto" par exemple). Ces indicateurs devront prendre en compte les risques pour la biodiversité et une attention prioritaire devra être accordée à la question de l'existence et de la disponibilité des données nécessaires à leur mise en œuvre opérationnelle.

¹ Service Central des Enquêtes et Études Statistiques du ministère de l'Agriculture et de la Pêche

2.2. Adoption d'alternatives à l'utilisation des pesticides et de pratiques économes en pesticides

Il est attendu que des projets mobilisant les sciences biologiques, agronomiques et socio-économiques, s'attachent à l'étude des conditions de la mise en œuvre des méthodes alternatives. On pourra en particulier s'intéresser à l'analyse des dynamiques sociales en œuvre pour leur adoption (réseaux socio-techniques, concertation, incitation, systèmes de conseil, etc.) et aux freins à l'utilisation de nouvelles pratiques de production (organisation du travail, aversion au risque, représentations sociales). Les travaux proposés pourront concerner les attitudes des agriculteurs et celles des acteurs de leur environnement économique (évolution de la PAC...) et technique (sources de conseil technique, exigences des utilisateurs des produits agricoles, fournisseurs d'intrants, ...). Ils pourront aussi aborder l'identification et la quantification des déterminants économiques de l'utilisation des pesticides dans différents secteurs de la production agricole, ainsi que l'influence des relations du secteur agricole avec les secteurs amont (coopératives d'approvisionnement, semenciers, ...) et aval (entreprises de collecte-stockage, organisations de producteurs, coopératives, négociants, ...).

2.3. Proposition et évaluation ex ante des nouveaux scénarios proposés en vue de réduire l'utilisation des pesticides

Divers scénarios en vue de réduire l'utilisation des pesticides ont été proposés dans le cadre de l'ESCo INRA-Cemagref et lors du colloque d'Avignon. D'autres pistes peuvent être envisagées. Dans tous les cas, il est indispensable que ces scénarios fassent l'objet d'une évaluation ex ante. Les projets de recherche sur ce thème devront aborder notamment :

- l'analyse des scénarios de mise en œuvre des innovations : prise en compte des stratégies, parfois antagonistes, des différents acteurs impliqués ; organisation collective du conseil et de l'élaboration de références ; rôle possible de l'assurance financière des récoltes dans la réduction de l'usage des pesticides.
- l'analyse des scénarios de politiques publiques (réforme de la PAC, coordination entre politiques agricoles et environnementales).
- l'analyse des interactions entre innovation et politiques publiques : relation entre les instruments de soutien, de contrôle, d'évaluation et de régulation de l'agri-

environnement, et l'émergence ou le développement de méthodes alternatives à la lutte chimique.

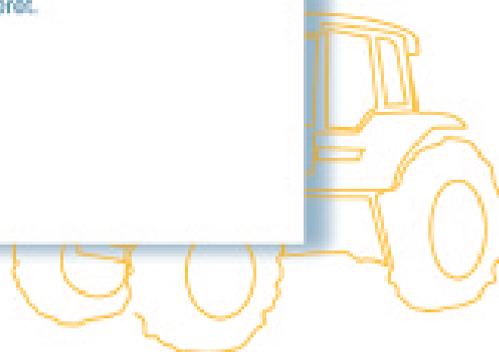
A ce niveau, un intérêt particulier pourra être porté à la mise en place d'outils politiques ou réglementaires visant à diminuer les usages ou les effets non-intentionnels des pesticides

Les travaux de recherche pourront concerner l'analyse des résultats d'une expérience déjà mise en place, l'analyse des effets attendus de différents types d'instruments (différents types de contrats, approches volontaires, ...) ou la simulation des effets d'instruments envisageables à partir de modèles de comportement des agriculteurs ou de modèles d'équilibre général calculable, ... De même, des travaux sur le choix des modalités d'intervention (coûts de transaction, mécanismes de contrôle, mesures de compensations éventuelles, ...) sont particulièrement attendus. Par ailleurs, la question de la cohérence des outils de régulation de l'utilisation des pesticides avec (i) ceux dédiés aux régulations des pollutions par les fertilisants, de l'irrigation, ..., (ii) les mesures agri-environnementales existantes et (iii) les politiques agricoles apparaît cruciale.

Peu de travaux considèrent les effets des politiques agri-environnementales sur les secteurs en amont et en aval du secteur agricole. Aussi, des études des effets de différents types de régulation de l'utilisation des pesticides sur les secteurs de l'agro-alimentaire, du conseil agricole, ... seront encouragées. Enfin, les travaux d'économie ou de science politique sur la régulation des pesticides (fonctionnement des procédures d'homologation, ...) s'intègrent aux problématiques définies ici.

2.4. Évaluation des effets non-intentionnels des pesticides.

Cet axe s'intéresse à la mesure des bénéfices sociaux de la régulation de l'utilisation des pesticides. Il s'agit d'évaluer l'intérêt des consommateurs pour des produits sans pesticides mais également d'étudier les déterminants de la demande de ces produits. Les stratégies d'évaluation pourront s'appuyer sur l'analyse de marchés existants (produits de l'agriculture biologique, produits frais sans traitements après récolte, ...). Des études de sociologie ou d'économie expérimentale visant à expliquer les motivations d'achat (et leur évolution) de ce type de produit sont encouragées. Les approches utilisant les méthodes d'évaluation hypothétiques (évaluation contingente, analyse conjointe, ...) seront également considérées avec intérêt.



Critères de sélection des projets

- Les projets de recherche devront avoir pour objectif d'aider les gestionnaires et les pouvoirs publics à asseoir leurs décisions sur des bases scientifiques bien établies. La mention explicite de débouchés opérationnels à l'issue de l'étude sera particulièrement appréciée. Les projets associant des équipes d'organismes de recherche fondamentale et des instituts techniques ou des gestionnaires sont encouragés. Une attention particulière sera portée aux liens avec des équipes européennes ou projets européens.
 - Le conseil scientifique se donne la possibilité de retenir toute proposition originale et de proposer aux équipes de recherche des regroupements.
 - Des projets proposés dans des sites où sont mis en œuvre des plans d'action concernant l'utilisation des pesticides seront appréciés (sites des groupes régionaux "phyto" : voir www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/bilan_GRAP_2003-2.pdf).
 - Seront considérés comme prioritaires les projets concernant :
 - + les usages des pesticides dans des zones considérées comme sensibles (espaces périurbains, zones naturelles protégées, estuaires, ...).
 - + les cas de contamination multiple, qu'elle découle de l'application de mélanges de préparations commerciales ou de la succession de traitements, dans le cas d'itinéraires techniques représentatifs de ceux mis en œuvre à l'heure actuelle ou proposés dans le cadre de nouvelles pratiques.
 - + l'étude des effets des fortes doses/concentrations et des effets à long terme.
 - + les études de solutions alternatives sur cultures fortement consommatrices de pesticides.
 - Les travaux de modélisation sont encouragés dans la mesure où ils permettent notamment d'envisager une généralisation, la construction d'outils de prédiction et/ou un changement d'échelle.
 - La cohérence de l'organisation des projets, leur faisabilité générale ainsi que la planification des démarches feront partie des éléments analysés. D'une manière générale, et a fortiori pour les projets associant des opérationnels (e.g., adossés à des sites bénéficiant de plans d'action), une attention particulière sera aussi portée à l'animation et à la coordination des projets.
- Les propositions seront analysées par :
- Le Conseil Scientifique, qui examinera les projets et évaluera : leur adéquation à l'appel à propositions de recherche, leur intérêt et leur qualité scientifique (innovation, acquisition de connaissances, adéquation entre l'approche expérimentale et les objectifs), les compétences des équipes et leur complémentarité, les propositions d'animation et de valorisation et les perspectives d'application, ainsi que la faisabilité des projets.
 - Le Comité d'Orientations, qui sélectionnera les projets, en fonction des priorités de recherche établies, en s'attachant à privilégier ceux dont l'utilité pour les politiques publiques est la plus prometteuse.

Les propositions de recherche doivent être présentées selon le modèle joint ; les envois papier seront produits en recto-verso, sans couverture cartonnée ou plastique, ni spirale ; les envois électroniques devront comporter le récapitulatif du projet en format RTF et l'annexe financière jointe au modèle de réponse.

Les propositions complètes doivent parvenir, pour le 15 juin 2006 au plus tard à :

Pascale EBNER
pascals.ebner@ecologie.gouv.fr

MEDD / D4E / SRP
20 avenue de Ségur
75302 PARIS 07 SP

En 2 exemplaires papier recto-verso, sans couverture plastique ni carton
(proposition complète)
Et une version électronique – format RTF et XLS
(récapitulatif et fiche financière)

et

Liliane MYROPE
liliane.myrope@ineris.fr

INERIS
60 rue d'Hauteville
75010 PARIS

En 2 exemplaires papier recto-verso, sans couverture plastique ni carton
(proposition complète)
Et une version électronique – format RTF et XLS
(récapitulatif et fiche financière)



Le programme est doté d'un comité d'orientation et d'un conseil scientifique.

LE COMITÉ D'ORIENTATION

Présidé par le chef du service de la prospective de la direction des études économiques et de l'évaluation environnementale (D4E), le Comité d'orientation est constitué de représentants des ministères et organismes impliqués :

- du ministère en charge de l'environnement : la direction de l'eau (DE), la direction de la nature et des paysages (DNP), la direction de la prévention et des pollutions et des risques (DPPR), le Secrétariat du Comité d'orientation pour la réduction de la pollution des eaux par les nitrates, les phosphates et les phytosanitaires provenant des activités agricoles (CORPEN) et les agences de l'eau ;
- du ministère en charge de l'agriculture : la direction générale de l'alimentation (DGAL), la direction générale de la forêt et des affaires rurales (DGFAR);
- du ministère en charge de la recherche : la direction de la recherche et la direction de la technologie.

Il a pour mission de définir les orientations du programme, de déterminer les projets prioritaires à partir de la présélection réalisée par le Conseil Scientifique et de mettre en place les actions d'animation, d'évaluation et de valorisation du programme.





LE CONSEIL SCIENTIFIQUE

Présidé par Thierry Caquet (INRA Rennes), le Conseil scientifique est composé d'experts en agronomie, en protection des végétaux, en pathologie des plantes, en hydrologie, en dynamique des polluants dans l'environnement (air, eau, sols), en écotoxicologie et en économie de l'environnement :

Marc BABUT (Cemagref),
Enrique BARRIUSO (INRA),
Thierry CAQUET (INRA),
Alain CARPENTIER (INRA),
Marc CHEVREUIL (Université Paris VI),
Christophe DAVID (ISARA),
Felippe De ALENCASTRO (EPFL),
Ramon LAPLANA (CEMAGREF),
Philippe LUCAS (INRA),
Michel MARCHAND (IFREMER),
Jean-Marc MEYNARD (INRA),
Philippe REULET (MAP) .

Il a pour mission de formaliser les orientations en termes scientifiques pour aboutir à un appel à propositions de recherche, d'expertiser les réponses et proposer des actions d'animation, d'évaluation et de valorisation du programme.

L'animation scientifique du programme est assurée par l'INERIS.



& PESTICIDES ENVIRONNEMENT

DE LA CONNAISSANCE AUX OUTILS & À L'ACTION

Le programme de recherche «Évaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides» a pour objectif d'améliorer la connaissance des risques liés à l'utilisation des pesticides pour mettre en place une meilleure gestion de ces risques, ainsi que le développement de pratiques conduisant à la réduction de cette utilisation.

Axé autour de la dynamique des pesticides dans l'environnement, de l'évaluation de leurs effets et des solutions envisageables pour limiter, voire abandonner, leur utilisation, le colloque organisé à Reims les 7, 8 et 9 novembre rassemblera chercheurs, représentants des services de l'Etat, de la profession agricole, des agences, de l'industrie et des associations. Au delà de la présentation des résultats scientifiques (restitution des recherches conduites entre 2002 et 2006, présentation des recherches débutées en 2006), ce colloque sera l'occasion d'un dialogue entre tous les acteurs impliqués dans la gestion de l'environnement.

Le programme Pesticides a été lancé en 1999 par le Service de la recherche du Ministère chargé de l'environnement, en lien avec les autres directions du ministère ainsi qu'avec le Ministère chargé de l'agriculture. Des instituts techniques tels que l'ACTA, le CETIOM et ARVALIS sont également associés à ce programme.

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

www.ineris.fr/pesticides

