

Pesticides

Des impacts aux changements de pratiques

E. Charbonnier, A. Ronceux, A.-S. Carpentier,
H. Soubelet, E. Barriuso, coordinateurs



Pesticides

Des impacts aux changements de pratiques

Bilan de quinze années de recherche
pour éclairer la décision publique

E. Charbonnier, A. Ronceux, A.-S. Carpentier,
H. Soubelet, E. Barriuso, coordinateurs

Collection *Savoir-faire*

Les coques

Biologie et exploitation

L. Dabouineau, A. Ponsero, A. Sturbois, F. Delisle
2015, 88 p.

La métagénomique

Développements et futures applications

M.-C. Champomier-Vergès, M. Zagorec, coord.
2015, 120 p.

Faut-il travailler le sol ?

Acquis et innovations pour une agriculture durable

F. Laurent, J. Roger-Estrade, J. Labreuche
2014, 192 p.

Les clémentiniers et autres petits agrumes

C. Jacquemond, F. Curk, M. Heuzet
2013, 368 p.

Torrents et rivières de montagne

Dynamique et aménagement

A. Recking, D. Richard, G. Degoutte, coord.
2013, 352 p.

Qualité du cacao

L'impact du traitement post-récolte

M. Barel
2013, 104 p.

En couverture : traitement chimique dans les vignes © Éléonor H./fotolia.com ; bananeraie © Pascal Xicluna/Min.Agri.fr (plus d'images sur <http://mediatheque.agriculture.gouv.fr>) ; la Lanterne, rivière de l'est de la France, affluent de la Saône © Arnaud Bouissou/MEDDE-MLETR (médiathèque Terra) ; abeille domestique © Olivier Brosseau/MEDDE-MLETR (médiathèque Terra).

Éditions Quæ

RD 10, 78026 Versailles Cedex, France

© Éditions Quæ, 2015

ISBN 978-2-7592-2344-2

ISSN 1952-1251

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

| | |
|------------------------------------|---|
| Introduction générale | 7 |
|------------------------------------|---|

Partie 1

Transferts de pesticides et réduction de la contamination de l'environnement

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Transfert et devenir des pesticides dans l'atmosphère | 15 |
| Mécanismes de transfert des pesticides vers l'atmosphère | 16 |
| Devenir des pesticides dans l'atmosphère..... | 33 |
| Conclusion..... | 46 |
| 2. Transfert et devenir des pesticides dans les sols et les eaux | 47 |
| Devenir des pesticides dans les sols | 47 |
| Transfert des pesticides dans les sols et contamination des eaux | 61 |
| Conclusion..... | 83 |
| Conclusion | 84 |
| Bibliographie | 87 |

Partie 2

Effets des pesticides et réduction des impacts sur les organismes et les écosystèmes

| | |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. Effets des pesticides sur les organismes cibles | 101 |
| Optimisation de la lutte chimique contre les taupins | 101 |
| Compréhension des phénomènes de résistance aux insecticides | 106 |
| Conclusion..... | 114 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. Effets des pesticides sur les organismes non cibles et les écosystèmes | 115 |
| Effets des pesticides sur les organismes et les écosystèmes terrestres | 116 |
| Effets des pesticides sur les organismes et les écosystèmes d'eaux douces ... | 147 |
| Effets des pesticides sur les organismes et les écosystèmes marins | 169 |
| Conclusion | 183 |
| Bibliographie | 186 |

Partie 3

Pratiques agronomiques innovantes pour réduire l'utilisation des pesticides

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5. Substitution d'autres techniques à l'utilisation des pesticides | 201 |
| Lutte physique : utilisation de filets Alt'Carpo en vergers de pommiers | 202 |
| Lutttes biotechnique et biologique..... | 206 |
| Conclusion..... | 213 |
| 6. Reconception des systèmes de culture pour réduire l'utilisation des pesticides | 215 |
| Reconception des systèmes en grandes cultures..... | 216 |
| Reconception des systèmes prairiaux pour gérer les risques de pullulation des campagnols terrestres..... | 244 |
| Reconception des systèmes en arboriculture fruitière pour lutter contre les contaminations fongiques | 245 |
| Reconception des systèmes de culture bananiers en milieu tropical..... | 251 |
| Conclusion | 266 |
| Bibliographie | 271 |

Partie 4

Accompagnement des acteurs pour réduire les risques liés aux pesticides

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7. Analyse des freins et leviers à l'adoption de pratiques économes en pesticides | 287 |
| Exploitation de bases de données pour caractériser les pratiques phytosanitaires | 287 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Analyses sociologiques et anthropologiques des déterminants des changements de pratiques..... | 297 |
| Analyses économiques des déterminants des changements de pratiques | 334 |
| 8. Modalités d'intervention des politiques publiques pour favoriser les changements de pratiques | 343 |
| Outils disponibles pour la régulation des pesticides | 344 |
| Gouvernance locale d'actions de régulation des pesticides..... | 352 |
| Évaluation des impacts des politiques publiques | 360 |
| Conclusion..... | 366 |
| Conclusion | 368 |
| Bibliographie | 374 |
| | |
| Conclusion générale | 381 |
| Apprécier, évaluer et gérer les risques pour l'environnement | 381 |
| Étudier les solutions techniques alternatives possibles | 382 |
| Accompagner le changement | 383 |
| Quelle prospective pour la recherche sur les pesticides ?..... | 384 |
| | |
| Sigles et acronymes | 387 |
| Rapports de recherche du programme Pesticides utilisés pour la rédaction de l'ouvrage | 391 |
| Coordinateurs et contributeurs | 397 |

Introduction générale

Si l'utilisation de molécules comme le soufre ou l'arsenic pour la protection des plantes cultivées est signalée dès l'Antiquité, leur usage a été généralisé avec l'essor de la chimie minérale au XIX^e siècle, puis avec celui de la chimie organique au XX^e. Ces molécules d'emploi facile et de coût relativement limité sont utilisées contre de nombreuses familles de ravageurs et de végétaux indésirables (insectes, champignons, acariens, plantes, etc.). Dans le cadre de l'agriculture industrielle, la généralisation de leur utilisation pour protéger ces écosystèmes artificiels a conduit à l'augmentation des rendements et de la qualité des productions agricoles et permis le « contrôle » de ravageurs ou de maladies emblématiques des plantes tels que le charançon du bananier, la rouille du blé, etc.

L'augmentation de la production agricole a en effet été considérable en France depuis la fin de la seconde guerre mondiale, alors que parallèlement on assistait à une réduction du nombre des exploitations. Cette évolution s'est traduite par des systèmes de production simplifiés grâce à la mise à disposition des agriculteurs de variétés végétales à fort rendement, mais sensibles aux organismes nuisibles. La disponibilité de produits phytopharmaceutiques de plus en plus efficaces a permis d'accompagner ce développement. Les systèmes de production sont aujourd'hui très dépendants d'une couverture sanitaire reposant sur l'utilisation de pesticides.

Les produits biocides ont une vocation d'hygiène générale ou de santé publique visant la protection de l'homme, des animaux ou de l'environnement¹. Les produits phytopharmaceutiques couverts par la directive 91/414/CE² sont utilisés pour protéger les plantes ou les produits végétaux. Ils concernent les surfaces agricoles et non agricoles telles que les routes, les aéroports, les voies ferrées, les réseaux électriques, etc. Cependant l'usage agricole mobilise à lui seul 90 % de la consommation des produits phytopharmaceutiques en France. Les produits diffèrent sensiblement selon leur utilisation. Ainsi, l'agriculture consomme essentiellement

1. Règlement 528/2012 du Parlement européen et du Conseil de l'Europe du 22 mai 2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides.

2. Directive 91/414/CEE du Conseil de l'Europe du 15 juillet 1991 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques.

des fongicides (56 % des produits utilisés), tandis que l'entretien des jardins et des espaces verts requiert surtout des herbicides (87 % des produits)³.

Les premières alertes sur la toxicité des pesticides ont été lancées au début des années 1960 avec la mise en évidence des propriétés cancérigènes du DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane) et de son impact sur la reproduction des oiseaux⁴. Cette découverte, confirmée par la suite, a conduit à l'interdiction progressive des pesticides organochlorés et à leur remplacement par d'autres familles comme les organophosphorés ou les carbamates, qui sont moins persistants dans l'environnement, mais qui présentent bien souvent une toxicité plus aiguë. Au début des années 1990, les effets perturbateurs de ces molécules sur le système endocrinien des animaux et des humains ont été révélés lors de la conférence de Wingspread (Wisconsin, États-Unis) du 21 au 26 juillet 1991, puis par plusieurs travaux ultérieurs⁵. La pollution des sols et des ressources halieutiques des Antilles par la chlordécone, utilisée jusqu'en 1993 pour lutter contre le charançon du bananier, illustre bien les risques liés à l'épandage de pesticides sur les cultures. C'est à la même époque que les premiers bilans réalisés par l'Institut français de l'environnement (Ifen) sur les ressources en eau ont montré un accroissement préoccupant des concentrations en divers pesticides dans l'hydrosphère, y compris dans les eaux de nappes profondes ou les eaux de pluie.

Face à ce constat et soucieux de prendre des mesures scientifiquement fondées pour protéger l'environnement, le ministère en charge de l'Écologie a mis en place en 1999 le programme de recherche « Évaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides », plus communément nommé programme Pesticides. Tout au long de sa mise en œuvre, le périmètre de ce programme s'est adapté aux nouvelles connaissances ainsi qu'aux demandes de la société, en intégrant notamment la question des déterminants de changements de pratiques afin de limiter l'usage des pesticides.

Pour garantir la qualité des recherches menées et leur adéquation avec les attentes des porteurs d'enjeux, ce programme est piloté par deux instances, le conseil scientifique, composé d'une vingtaine d'experts issus de différentes disciplines (écotoxicologie, agronomie, écologie, économie, sociologie, droit, etc.) et un comité d'orientation. Ce dernier, présidé par le chef du service de la recherche du ministère en charge de l'Écologie, est constitué de représentants des ministères, de professionnels agricoles, de différents organismes ou agences en lien avec la thématique et d'associations de protection de l'environnement ainsi que du président du conseil scientifique. Ces deux instances définissent des axes de recherche,

3. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2003. Rapport sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France, Tome II, 293 p.

4. Carson R., 1962. *Silent Spring*. Houghton Mifflin Co., Boston, 368 p.

5. Skakkebaek N.E., Toppari J., 1995. Rapport réalisé à la demande du ministère danois de l'Environnement et de l'Énergie ; Colborn T., Dumanoski D., Myers J.P., 1996. *Our stolen future: are we threatening our fertility, intelligence, and survival? A scientific detective story*. Dutton Books, New York, 306 p.

sélectionnent les projets et les évaluent tout au long de leur avancement. Ils participent également aux actions de valorisation des résultats de recherche.

Le ministère en charge de l'Écologie a ainsi lancé entre 1999 et 2014 six appels à propositions de recherche dont les thématiques couvrent des problématiques et des champs disciplinaires variés.

Les premiers appels, lancés en 1999 et 2002, visaient une meilleure connaissance des voies de dispersion, de transformation et d'accumulation des pesticides dans l'environnement, une meilleure connaissance des conséquences de leur présence sur les écosystèmes et le développement d'outils permettant de réduire leur usage et de diminuer leurs effets sur les systèmes biologiques non cibles.

Les appels à propositions de recherche lancés en 2006 et 2009 ont pris en considération la forte demande sociétale sur les alternatives à l'utilisation des pesticides et la réduction de leurs usages, clairement exprimée à l'occasion du Grenelle de l'environnement et qui s'est traduite en 2008 par la mise en place du plan Écophyto. Ces deux appels avaient pour objectifs la production de connaissances et de méthodologies pour faire évoluer les procédures d'évaluation des risques des pesticides en milieux naturels. Trois domaines de recherche ont ainsi été définis : l'amélioration des réseaux de surveillance de la contamination de l'environnement par les pesticides, l'amélioration des procédures d'évaluation des risques *a priori* et la caractérisation des effets des pesticides sur les écosystèmes.

Un cinquième appel à propositions de recherche a été lancé en 2011. Dans le prolongement des précédents, il visait à fournir les éléments de connaissances aux décideurs politiques et aux acteurs de l'agriculture et de l'environnement, pour leur permettre de déclencher et de conduire le changement. Il avait pour objectif d'identifier des verrous éventuels à l'adoption des innovations et les moyens de les lever. L'appel a été organisé en prenant en compte les réflexions du « groupe d'experts recherche » du plan Écophyto autour de deux axes : l'évaluation des impacts des pesticides sur les services écosystémiques et les changements des pratiques et la proposition d'outils de gouvernance afin d'accélérer la transition vers les objectifs du plan Écophyto.

Le programme Pesticides participe ainsi à l'axe recherche du plan Écophyto piloté par le ministère chargé de l'Agriculture, qui porte sur l'innovation dans la conception et la mise au point d'itinéraires techniques et de systèmes de culture économes en pesticides.

À ce jour, le programme Pesticides a permis de sélectionner, de suivre et d'animer 57 projets de recherche : 36 financés par le ministère en charge de l'Écologie, 1 par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et 20 dans le cadre du plan Écophyto sur des crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses gérés par l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema).

Cet ouvrage présente les résultats de 40 projets de recherche conduits entre 1999 et 2014, dont certains, encore en cours lors de la rédaction, produiront des résultats complémentaires. Il comporte quatre parties.

La première traite de la réduction des risques de contamination de l'environnement par une meilleure compréhension des transferts de pesticides dans l'atmosphère,

le sol, les eaux superficielles et souterraines. L'identification et la compréhension des processus impliqués dans ces transferts entre les différents compartiments de l'environnement sont indispensables pour, à terme, mettre au point des pratiques agricoles permettant de réduire les risques de contamination par les pesticides.

La deuxième s'intéresse aux recherches visant à réduire les risques des pesticides sur les organismes et les écosystèmes par une meilleure compréhension de leurs effets. Les travaux ont porté sur l'étude des effets biologiques des pesticides : effets sublétaux sur les organismes, coût de la résistance aux pesticides, modifications structurales et fonctionnelles des communautés biologiques dans les écosystèmes terrestres, dulcicoles et marins.

La troisième est consacrée aux pratiques agronomiques innovantes permettant de réduire l'utilisation des pesticides. Il s'agit d'une part de concevoir et d'évaluer des méthodes de lutte pouvant se substituer aux pesticides dans les systèmes de culture actuels et d'autre part d'élaborer des stratégies de protection des cultures en intégrant une révision des systèmes de culture pour limiter en amont le développement des organismes nuisibles.

Enfin, la quatrième et dernière partie traite des conditions facilitant l'adoption de pratiques permettant de réduire les risques liés aux pesticides. Les recherches ont porté sur l'analyse des freins au changement de pratiques, les leviers qui pourraient être utilisés, notamment par les pouvoirs publics, et les outils à mobiliser.

Nous espérons que cet ouvrage aidera à l'élaboration et à la mise en œuvre de solutions pour limiter les risques environnementaux liés à l'usage des pesticides grâce à l'accent mis sur le transfert des résultats à leurs utilisateurs potentiels. Les décideurs, porteurs de politiques publiques, professionnels du monde agricole ou encore gestionnaires de l'environnement y trouveront des éléments pour concevoir et mettre en œuvre de nouvelles actions. Les chercheurs, les enseignants, mais aussi les étudiants accéderont à une synthèse des connaissances ainsi qu'à de nombreuses références scientifiques. L'ouvrage identifie également des lacunes scientifiques sur la question des pesticides et ouvre donc la réflexion sur de futures pistes de recherche.

Charles Manceau, directeur de la santé végétale, Anses,
président du conseil scientifique

Philippe Courtier, chef du service de la recherche,
ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie,
président du comité d'orientation

Partie 1

Transferts de pesticides
et réduction
de la contamination
de l'environnement

Depuis l'avènement d'une agriculture à vocation productive, les différents compartiments de l'environnement ont été progressivement contaminés par les intrants organiques ou chimiques utilisés parfois massivement. Alors que les eaux continentales de surface et souterraines souffrent d'une contamination⁶ quasi généralisée par les pesticides, les données relatives à la contamination de l'air et des dépôts atmosphériques restent fragmentaires. Toutefois, elles permettent de mettre en évidence la présence de pesticides dans toutes les matrices atmosphériques (gazeuse, liquide, particulaire), en concentrations variables dans le temps et l'espace. Enfin, bien qu'il n'existe pas de dispositif équivalent à ceux relatifs à l'eau et à l'air pour caractériser la contamination des sols par les pesticides, des exemples de contaminations chroniques (cuivre, chlordécone...) sont bien connus. Cette contamination généralisée des milieux par les pesticides soulève de nombreuses questions sur les impacts environnementaux et sanitaires induits (impacts sur la biodiversité, sur les écosystèmes, sur la santé humaine, sur la sécurité sanitaire des aliments, etc.). Les problèmes de contamination et les dangers qui en découlent sont souvent associés à la dispersion ou au transfert des pesticides. Un des leviers pour mettre au point des pratiques agricoles – et plus spécifiquement phytosanitaires – permettant de réduire ces risques de contamination est donc de limiter les transferts des pesticides dans l'environnement, ce qui nécessite l'identification et la compréhension de l'ensemble des processus impliqués dans ces phénomènes (figure 1.1).

Ces enjeux ont été placés au cœur du programme Pesticides depuis sa création. Ainsi, plusieurs appels à propositions de recherche (APR) ont encouragé les projets portant sur l'identification, la quantification et la hiérarchisation des voies de dispersion des pesticides, sur l'analyse de l'étendue et de la variabilité de la contamination des différents compartiments de l'environnement ou encore sur les mécanismes de rétention des molécules dans les milieux. Le programme Pesticides a ainsi soutenu une douzaine de projets sur la dynamique des pesticides dans l'environnement ; les résultats de neuf d'entre eux sont présentés dans cet ouvrage⁷.

6. La contamination est définie comme la présence anormale de substances dans un compartiment de l'environnement : l'emploi de pesticides constitue donc formellement une contamination. Le terme de pollution désigne quant à lui la présence de substances au-delà d'un seuil pour lequel des effets négatifs sont susceptibles de se produire (Aubertot *et al.*, 2005).

7. Les trois autres projets n'étaient pas terminés lors de la rédaction de cet ouvrage.

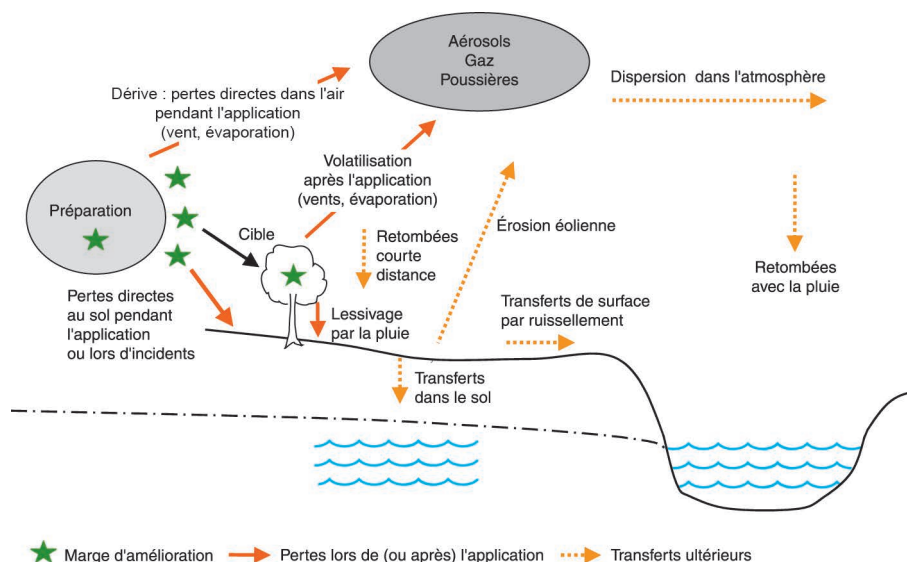


Figure 1.1. Mécanismes mis en jeu lors des épandages par pulvérisation. Les flèches indiquent les interactions avec les différents compartiments de l'environnement (d'après Aubertot *et al.*, 2005).

Parmi ceux-ci figurent quatre projets pionniers en France sur la dynamique des pesticides dans l'atmosphère. Ils se sont intéressés au passage en milieu aérien, pendant et après l'application, et au devenir des pesticides dans l'atmosphère. Le chapitre 1 leur est consacré. Cinq projets ont, quant à eux, traité du transfert et du devenir des pesticides dans les sols et dans les eaux continentales – superficielles ou souterraines –, dans différents bassins-versants agricoles de France métropolitaine ; leurs résultats sont présentés dans le chapitre 2.

1

Transfert et devenir des pesticides dans l'atmosphère

Les travaux financés dans le cadre du programme Pesticides ont permis de mieux appréhender le transfert et le devenir des pesticides dans l'atmosphère (figure 1.2), *via* :

- la quantification des phénomènes de dérive⁸ et de volatilisation⁹, et leur contribution à la contamination de l'environnement (Cellier *et al.*, 2004) ;
- l'étude de la dérive sur culture de vigne, de l'échelle locale à l'échelle subrégionale en relation avec le paysage (Brunet *et al.*, 2013) ;
- l'analyse des cinétiques et mécanismes de dégradation des pesticides dans l'atmosphère, en lien avec les variations des concentrations de pesticides en milieu urbain et rural (Mellouki *et al.*, 2007) ;
- l'étude de l'évolution spatio-temporelle des retombées atmosphériques de pesticides dans la moitié nord de la France (Chevreuil *et al.*, 2003).

Les résultats de ces travaux sont présentés en deux parties : la première traite des mécanismes de passage des pesticides dans l'atmosphère, après application ; la seconde aborde le devenir des pesticides dans l'atmosphère.

8. La dérive est la dispersion atmosphérique ayant lieu pendant l'application des gouttelettes de spray voire de la phase gazeuse. Elle est souvent quantifiée en mesurant les dépôts au sol des gouttelettes de spray proches de la parcelle traitée (Corpen, 2007a).

9. La volatilisation *stricto sensu* est le passage d'un composé de sa phase solide, liquide, en solution aqueuse ou adsorbé sur le sol vers la phase gazeuse. Dans son acception la plus large, le flux de volatilisation représente le flux global de composé depuis les compartiments sol ou plante vers le compartiment atmosphérique et comprend donc non seulement les processus de changement de phase, mais aussi les processus de transport.

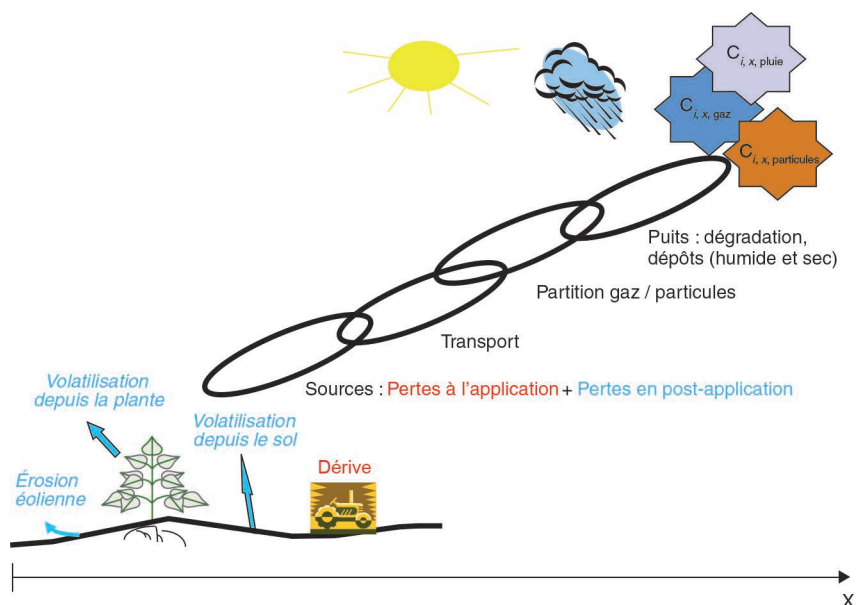


Figure 1.2. Transfert et devenir des pesticides dans l'atmosphère : principaux processus impliqués (© Bedos, Inra).

$C_{i,x}$ désigne la concentration du pesticide i à la distance X de la source dans la pluie, la phase gazeuse ou particulaire. Les notions de « sources » et « puits » sont définies en prenant comme système d'étude le compartiment atmo sphérique : les sources concernent les processus d'émissions de pesticides vers l'atmosphère, les puits désignent les processus engendrant une disparition du produit dans le compartiment atmosphérique.

Mécanismes de transfert des pesticides vers l'atmosphère

Dérive et volatilisation post-application

Dès les années 1990, des concentrations significatives et persistantes de pesticides sont détectées dans l'air urbain ou rural en France (Chevreuil *et al.*, 1996 ; Millet *et al.*, 1997), témoignant d'une émission vers l'atmosphère de ces composés, notamment par les surfaces agricoles, suivant différents mécanismes de transfert : pertes à l'application par dérive, pertes en post-application par volatilisation depuis la surface traitée (sol ou plante) ou érosion éolienne.

Très peu de travaux de recherche ont porté sur une analyse globale du devenir des pesticides à l'échelle du cycle cultural incluant ce transfert vers l'atmosphère. Si un modèle spécifique décrivant la volatilisation des pesticides a pu être mis au point au Canada (Scholtz *et al.*, 2002), rares sont les travaux concernant le contexte agricole français. Par ailleurs, la détermination des concentrations en pesticides dans l'atmosphère est complexe et nécessite le développement de protocoles expérimentaux et analytiques spécifiques (Bedos *et al.*, 2002a ; Clément *et al.*, 2000 ; Scheyer *et al.*, 2005).

Dans ce contexte, Cellier *et al.* (2004) ont eu pour objectifs de :

- mettre au point des méthodes de quantification des pertes à l'application par dérive et par volatilisation post-application, en situations agricoles réelles ;
- estimer le niveau de contamination de l'atmosphère selon la distance à l'application et selon la période considérée (application, post-application) ;
- mettre au point un modèle de simulation décrivant la volatilisation après application sur le sol et permettant d'analyser l'importance des différents facteurs liés aux pesticides, au sol, au climat et aux modes d'application ;
- évaluer la contribution du processus de volatilisation dans le bilan du devenir des pesticides dans l'environnement.

Caractérisation des émissions de pesticides vers l'atmosphère

Il n'existe pas encore de méthode analytique permettant une mesure directe de la concentration de pesticides dans l'air ambiant (bien que le *Proton Transfer Reaction – Mass Spectrometry* PTR-MS constitue une piste intéressante, Vesin *et al.*, 2012). La détermination de ces concentrations passe obligatoirement par une première étape de prélèvement par aspiration d'un volume d'air au travers d'un dispositif de rétention, suivie d'une étape d'extraction puis d'analyse. La quantification précise des concentrations est difficile, car les pesticides sont en faible concentration dans l'atmosphère (de l'ordre de quelques pg/m^3 à quelques ng/m^3 à l'écart des sources d'émission et de quelques ng/m^3 à quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à leur proximité ; van der Werf, 1996) et mélangés avec une multitude d'autres molécules organiques. Ceci nécessite de développer des méthodes d'échantillonnage et d'extraction performantes et des techniques d'analyse à la fois sensibles (avec des faibles seuils de détection) et précises (s'affranchissant des bruits de fond élevés et des interférences). Par ailleurs, les pesticides sont distribués dans les phases gazeuse et particulaire (c'est-à-dire sous forme d'aérosols¹⁰) et cette distribution, dépendant fortement des paramètres physico-chimiques des pesticides ainsi que des conditions météorologiques, est difficile à mesurer.

Le dispositif de prélèvement consiste en général en un filtre permettant la rétention des molécules adsorbées sur les aérosols particulaires et d'une cartouche contenant un adsorbant capable de fixer les pesticides à l'état gazeux. Les campagnes de mesures réalisées sur le territoire national révèlent que la phase particulaire des pesticides est généralement minoritaire, voire négligeable (Corpen, 2007a) ; cependant la partition gaz/particules reste incertaine. Pour permettre une description précise des cinétiques de contamination de l'atmosphère, les durées des prélèvements doivent être courtes. L'analyse est ensuite effectuée au laboratoire après désorption des pesticides retenus dans les cartouches de prélèvement. Cellier *et al.* (2004) ont ainsi développé plusieurs méthodes d'extraction des pesticides retenus dans l'adsorbant en fonction des composés étudiés et de leur concentration.

10. Un aérosol est une particule, solide ou liquide, d'une substance chimique ou d'un mélange de substances chimiques, en suspension dans un milieu gazeux.

Dans le cas des herbicides utilisés en grandes cultures, Briand *et al.* (2002a) ont retenu l'extraction par désorption thermique ou « thermodésorption ». Cette technique permet une injection directe des molécules dans le chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse (CG-SM). L'absence de dilution avant analyse permet l'obtention de limites de quantification très basses, ce qui est crucial pour calculer des flux de volatilisation (Bedos *et al.*, 2004). La thermodésorption n'est cependant pas applicable aux composés thermolabiles ou insuffisamment volatils pour être désorbés thermiquement.

Pour les pesticides thermolabiles ou non thermiquement désorbables, l'extraction est réalisée au moyen de solvants et d'ultrasons (Briand *et al.*, 2002b), puis les molécules sont analysées par CG-SM.

La quantification des pertes en pesticides par dérive au moment de l'application s'avère complexe. La dérive est souvent estimée à partir de deux approches :

- par la différence entre la quantité sortant du pulvérisateur (dose théorique calculée à partir de la mesure de la concentration en pesticides dans la bouillie) et celle arrivant sur la cible (sol et plantes) (dose appliquée mesurée) ; dans ce cas, elle correspond à l'ensemble des pesticides exportés en phase gazeuse et en phase particulaire dans l'air pendant l'application ;
- par les quantités déposées à proximité immédiate de la parcelle ; elle néglige alors la fraction des pesticides exportés à plus grande distance pendant l'application.

Ces deux aspects ont été explorés par Cellier *et al.* (2004) grâce à deux expérimentations menées en arboriculture et sur grandes cultures (application d'atrazine et d'alachlore sur culture de maïs).

Lors des expérimentations en grandes cultures, différentes modalités de calcul de la dose appliquée sur la cible ont été mises en œuvre afin de suivre la répartition entre le sol et la plante, tenant compte de l'hétérogénéité de l'application au niveau de la rampe du pulvérisateur. Le suivi de l'évolution spatio-temporelle du nuage de pulvérisation a permis, quant à lui, d'apprécier le phénomène de dérive, notamment du point de vue des dépôts et des niveaux de contamination induits à proximité de la zone d'application, et d'identifier les processus associés qui permettent de comprendre le phénomène : dépôts, dilutions, transformations (Ravier *et al.*, 2005). Dans ces expérimentations, les pertes par dérive estimées à partir de l'écart entre la dose arrivant sur la cible (mesurée) et la dose théorique étaient proches de 45 % pour l'atrazine et comprises entre 38 et 82 % pour l'alachlore ; ces valeurs élevées peuvent s'expliquer par des conditions climatiques exceptionnellement favorables à la dérive lors de l'application : un vent d'intensité moyenne, une température élevée et une humidité relative faible.

Des mesures effectuées dans un verger de pommiers et de poiriers ont montré des concentrations de pesticides souvent faibles en aval de la parcelle traitée (quelques dizaines de ng/m^3). Ce niveau est vraisemblablement lié aux caractéristiques des préparations commerciales et au type de pulvérisateur utilisé, très différent de ceux utilisés en grandes cultures : la taille des gouttelettes produites est beaucoup plus grande et leur projection sur les arbres à l'aide d'un ventilateur favorise la pénétration du spray dans le couvert végétal. Toutefois, en conditions agronomiques