



HAL
open science

Contamination des eaux de surface par les pesticides : évaluation de la part des dépôts gazeux aériens

Carole Bedos, Benjamin Loubet, Enrique Barriuso

► To cite this version:

Carole Bedos, Benjamin Loubet, Enrique Barriuso. Contamination des eaux de surface par les pesticides : évaluation de la part des dépôts gazeux aériens. *Innovations Agronomiques*, 2013, 28 (3), pp.25-33. hal-01003306

HAL Id: hal-01003306

<https://hal.science/hal-01003306>

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Contamination des eaux de surface par les pesticides : évaluation de la part des dépôts gazeux aériens

Bedos C., Loubet B., Barriuso E.

INRA, Unité Mixte INRA-AgroParisTech Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval-Grignon

Correspondance : carole.bedos@grignon.inra.fr

Résumé

La contamination des eaux de surface par le dépôt gazeux de pesticides volatilisés depuis les zones de traitements étant maintenant avérée, le développement d'outils d'évaluation de cette voie de contamination est nécessaire pour compléter l'évaluation des risques liés à l'utilisation des pesticides. L'hypothèse de travail ici explorée repose sur le fait que ces dépôts, s'étalant sur plusieurs semaines, sont susceptibles d'engendrer une contamination équivalente voire supérieure à celle liée à la dérive, qui ne dure que le temps de l'application. Cette hypothèse est confirmée par les résultats des premiers tests de modèles ainsi que par les résultats expérimentaux. Ce projet propose des abaques de dépôts gazeux (similaires aux abaques de dérive) construites à partir de simulations réalisées avec deux modèles couplés sur un nombre significatif de scénarios. Les facteurs clefs contrôlant le dépôt gazeux de pesticides ont été identifiés dans les cas d'un plan d'eau et d'un fossé de drainage. Ces résultats permettent d'identifier des mesures de gestion pour diminuer les risques de contamination.

Mots-clés : eaux de surface, pesticide, dépôt gazeux, abaques, atmosphère

Abstract: Contamination of surface waters by pesticides: evaluation of the share of gaseous dry deposition

Contamination of surface waters by pesticides is a common phenomenon close to agricultural areas (lakes, rivers, etc.) and the contribution of atmospheric pathways to such contamination has been demonstrated. At the local scale, modelling approaches as well as measurements show situations where the contribution of gaseous dry deposition is of the same order of magnitude or even higher than the contribution of drift. The longer duration of the volatilization process (several days or weeks) as compared to drift that is a major contributor but only during pesticide application, explains these results. The approach presented here consists in estimating the gaseous pesticide emissions from the sprayed field, the atmospheric local dispersion of these agricultural pesticides and finally their dry deposition into aquatic ecosystems at the local scale by running process-based models under a significant number of scenarios. Results can be used to generate deposition curves similar to those used to assess drift. Main factors governing gaseous deposition are identified and suggestions of criteria for risk management are given.

Keywords: surface waters, pesticide, gaseous deposition, curves, atmosphere

Introduction

L'évaluation de la contamination des eaux de surface situées à proximité des zones d'application des pesticides est souvent réduite à l'évaluation empirique de la "dérive", constituée par le dépôt des gouttelettes de pulvérisation transportées par le vent pendant le traitement. Le "dépôt gazeux" de pesticides est quant à lui souvent négligé. Il s'agit du dépôt des pesticides volatilisés après l'application depuis les surfaces traitées et transportés par voie aérienne. Or, ce dépôt gazeux, dont la source

d'émission peut durer plusieurs semaines, serait susceptible d'engendrer une contamination équivalente, voire supérieure, à la contamination liée à la dérive, qui est plus ponctuelle dans le temps. Cette hypothèse est confirmée par les premiers résultats expérimentaux (Siebers et al., 2003) et par la modélisation (Asman et al., 2003).

Une synthèse bibliographique exhaustive sur les outils de modélisation disponibles qui traitent à la fois de l'émission, de la dispersion atmosphérique et des dépôts de pesticides a été élaborée par le groupe de travail FOCUS Air (FOCUS, 2008). En l'absence d'outil validé au moment de cette synthèse, le groupe a préconisé comme outil d'évaluation le modèle empirique EVA2.0 basé sur les résultats expérimentaux obtenus par Fent (2004) en tunnel de ventilation. Lors de cette étude, quinze expériences ont porté sur la quantification du dépôt gazeux sur des bacs d'eau disposés en aval de placettes de betteraves à sucre et d'orge d'hiver traitées avec dix pesticides de caractéristiques physico-chimiques (pression de vapeur, solubilité dans l'eau) variées. Les auteurs de cette étude ont identifié la pression de vapeur comme le principal facteur conditionnant le dépôt gazeux sur les surfaces aquatiques du dispositif. Ainsi, EVA2.0 repose sur des abaques de dépôts pour 4 classes de composés de gammes de pression de vapeur définies. Lors de ces travaux, l'émission par volatilisation n'a pas été mesurée. Plusieurs modèles mécanistes permettent d'analyser les processus de façon plus poussée qu'avec les modèles empiriques. C'est le cas par exemple du modèle PESTDEP (*Pesticide Deposition*) développé au Danemark par Asman et al. (2003) pour estimer les dépôts secs de pesticides gazeux dans l'eau en aval de la source. PESTDEP décrit cependant la volatilisation des pesticides de manière empirique. Le modèle OPS (*Operational Priority Substances* ; Van Jaarsveld, 2004), basé également sur une approche mécaniste, simule sur des pas de temps de une à quelques heures, les processus atmosphériques tels que l'émission, la dispersion, le transport, la dégradation chimique, et enfin le dépôt. Ce modèle a été couplé au modèle PEARL (Leistra et al., 2001 ; van den Berg et Leistra, 2004) qui décrit la volatilisation des pesticides (Jacobs et al., 2007 ; Fragkoulis et al., 2011). Enfin, le modèle retenu dans le cadre de ce travail, FIDES (Loubet et al., 2001) est aussi un modèle déterministe. Un couplage de PEARL et de FIDES a été réalisé par Durand (2010) et Nuutinen et al. (2011).

L'objectif général du travail présenté ici est de développer un outil opérationnel d'évaluation de la contamination locale des eaux de surface par les pesticides par voie gazeuse, permettant notamment de réaliser des préconisations (i) de distance à respecter entre la zone traitée et la surface aquatique à protéger, ou (ii) de composés de substitution permettant de limiter cette voie de contamination. Cet outil se présente sous la forme d'abaques de dépôt résultant d'un couplage de modèles mécanistes décrivant chacun des processus impliqués, à savoir volatilisation, transfert atmosphérique, et dépôt gazeux.

1. Méthode

L'outil opérationnel proposé repose sur la construction d'abaques de dépôts gazeux (sous une forme proche de celles des abaques de dérive) à partir de simulations réalisées avec deux modèles couplés sur un nombre significatif de scénarios. Les modèles considérés fonctionnent en deux dimensions dans un plan constitué par l'axe de la direction du vent et par la verticale à la parcelle traitée. Ainsi, la dispersion selon la direction perpendiculaire au vent n'est pas considérée.

Deux configurations de la zone en aval de la parcelle émettrice sont définies : (1) un plan d'eau uniforme de 50 m, et (2) des fossés d'un mètre de large, situés à 5, 20 ou 50 m de la parcelle traitée avec 2 options de dépôt sur la Zone Non Traitée (ZNT) : un dépôt maximum ou un dépôt nul (Figure 1).

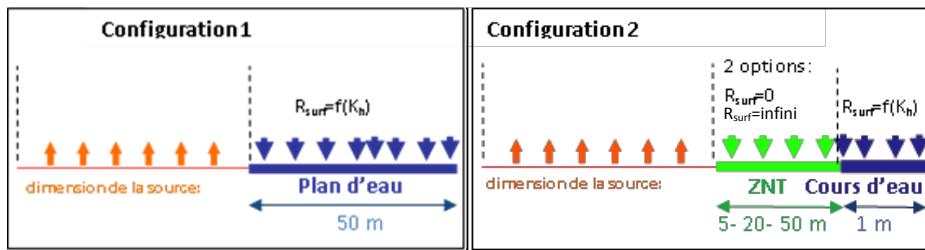


Figure 1 : Configurations de la zone en aval de la source : plan d'eau (à gauche) et cours d'eau (à droite).

1.1 Des scénarios multifactoriels pour prendre en compte la diversité des situations

Afin de représenter une diversité de pratiques, de conditions pédoclimatiques et de configurations source-puits, nous avons choisi différents scénarios construits par la combinaison des facteurs suivants (Figure 2) :

- i. Pratiques : choix de 3 périodes d'application dans l'année (mars, juin, septembre), avec une dose appliquée de 1 kg/ha quel que soit le pesticide et un choix de 26 produits présentant des propriétés physico-chimiques contrastées pris dans la base de données Sph'Air (L'Hermite et al., 2008; L'Hermite et Gouzy, 2009).
- ii. Conditions pédoclimatiques : choix de 3 conditions climatiques dans la base de données climatique Agroclim (INRA) sur une période de 9 ans, et de 3 sols de la base Infosol (INRA) associés à ces conditions climatiques .
- iii. Configuration source-puits : 3 dimensions de parcelle émettrice.

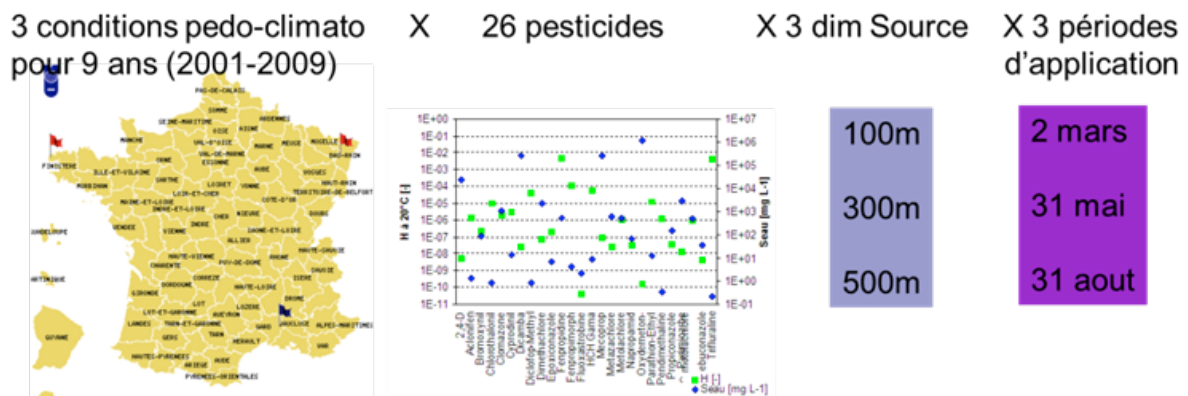


Figure 2 : Synthèse des différents éléments utilisés pour élaborer les scénarios : localisation géographique des 3 conditions pédoclimatiques, propriétés physico-chimiques des pesticides, dimension de la parcelle traitée et période d'application (identifiée ici par la date du premier jour de la période considérée).

Les simulations ont été réalisées grâce à un couplage off-line d'un modèle calculant la volatilisation des pesticides appliqués sur sol nu (modèle Volt'Air ; Génernont et Cellier, 1997 ; Bedos et al., 2009 ; Garcia et al., 2011) avec un modèle de dispersion atmosphérique et de dépôt gazeux des pesticides volatilisés (modèle FIDES ; Loubet et al., 2001). Le jeu de données obtenu est constitué par les résultats des 243 simulations du modèle Volt'Air-Pesticides et de 567 simulations du modèle FIDES (Figure 3). Chaque simulation porte sur 60 jours avec une application de pesticides le 30^{ème} jour de simulation.

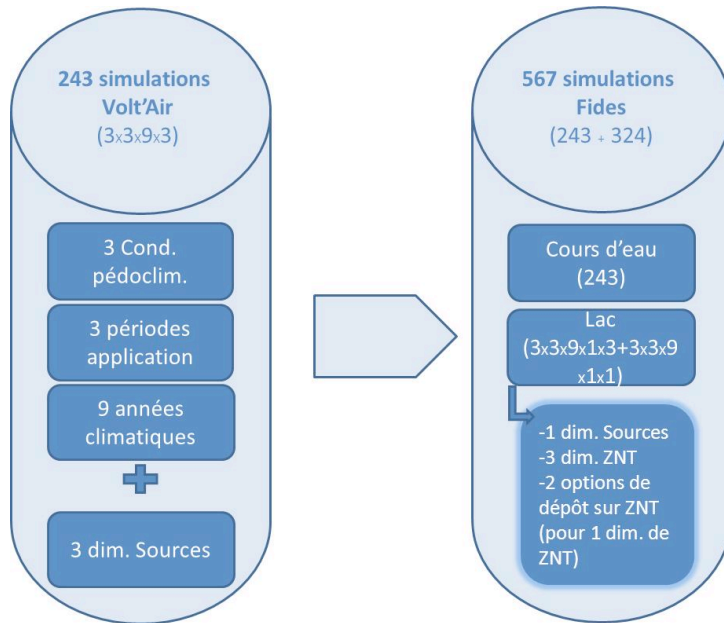


Figure 3 : Bilan des simulations réalisées selon la configuration considérée ("lac" ou "cours d'eau").

1.2 Des simulations couplées émission-transport-dépôt

La Figure 4 présente le principe du couplage off-line des deux modèles utilisés pour cette étude. Le modèle mécaniste et déterministe Volt'Air calcule la volatilisation de pesticides appliqués sur sol nu, à l'échelle infra-horaire et pour une parcelle, et ce à partir des propriétés physico-chimiques du composé, des pratiques culturales (dose, incorporation, irrigation), des conditions pédoclimatiques locales (météorologie et sol). Le modèle mécaniste et déterministe FIDES-2D simule la dispersion atmosphérique et le dépôt gazeux de composés chimiques à une échelle infra-horaire et à proximité des sources (<1 km), et ce à partir de l'intensité de l'émission, des conditions de turbulence locale (fournies par le modèle Volt'Air) et de la distance à la source. FIDES a été modifié afin d'introduire le dépôt de pesticides sur l'eau par le biais d'une résistance d'échange, R_{surf} , fonction de la constante de Henry (K_H) du composé et des conditions de turbulence (Loubet et al., 2006 ; Sameut Bouhaik, 2010, Bedos et al., 2011).

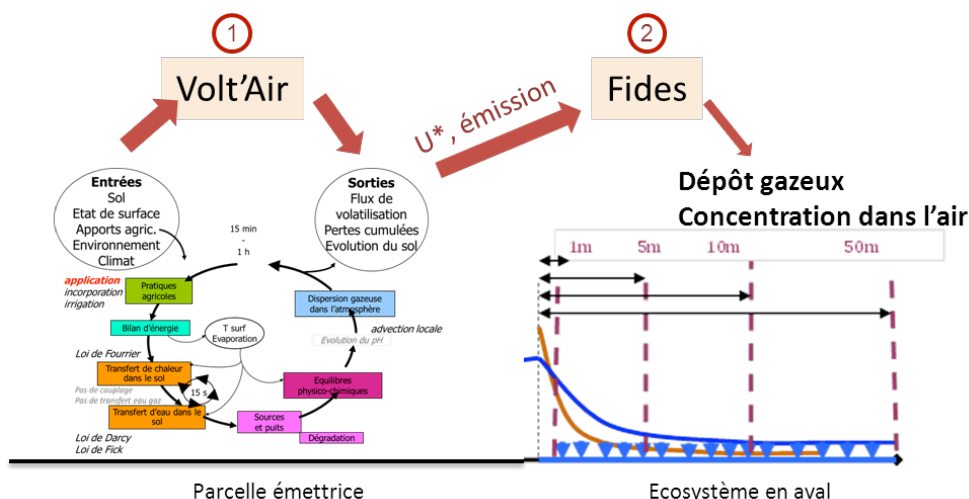


Figure 4 : Couplage off-line du modèle Volt'Air simulant la volatilisation de pesticides appliqués sur un sol nu et du modèle FIDES simulant la dispersion atmosphérique et le dépôt gazeux de composés chimiques à la surface des milieux aquatiques.

Les résistances au dépôt sont décrites dans FIDES selon le modèle de Liss et Slater (1974), adapté par Asman et al. (2003) au cas des lacs (Figure 5). Nous ne traitons donc pas ici le cas des dépôts sur des cours d'eau ayant un écoulement mais des systèmes aquatiques avec une surface immobile tels qu'un plan d'eau (lac, étang, mare, ...) ou un fossé de drainage.

Les résistances R_b ($s\ m^{-1}$) et R_{surf} ($s\ m^{-1}$) utilisées dans cette étude ont été paramétrées de la façon suivante :

$$R_b = \frac{1}{0.066 Sc_g^{-0.61} u_*} \text{ pour l'eau et } R_b = \frac{2 \left(\frac{Sc_g}{0.71} \right)^{\frac{2}{3}}}{\kappa u_*} \text{ pour la végétation}$$

$$R_{surf} = \frac{K_H(T_{eau})}{1.25 \times 10^{-6} u(10)^{1.6} \left(\frac{600}{Sc_w} \right)^{1/2}}$$

où Sc_g et Sc_w sont les nombres de Schmidt du pesticide dans l'air et dans l'eau, u_* est la vitesse de frottement ($m\ s^{-1}$), $K_H(T_{eau})$ est la constante de Henry adimensionnelle à la température T_{eau} , et $U(10)$ est la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol ($m\ s^{-1}$). Pour l'ensemble des paramètres, les valeurs sont issues du modèle Volt'air ou ont été calculées à partir des caractéristiques physico-chimiques du pesticide.

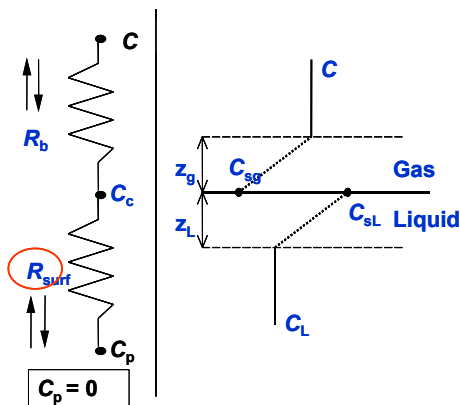


Figure 5 : Schéma d'échange atmosphère/surface aquatique implémenté dans FIDES basé sur le concept résistif et le modèle de Liss et Slater (1974) pour les résistances de couches limites atmosphériques (R_b) et résistance de surface R_{surf} . A gauche le schéma d'échange résistif. A droite la représentation physique de l'interface avec les couches limites gazeuse et liquide. C concentration en pesticide au-dessus de la surface, et C_{sg} à la surface du liquide. C_L et C_{sl} concentrations en pesticide dissout dans l'eau et à l'interface air-eau. z_g et z_L épaisseurs des couches limites dans l'air et l'eau. $C_p = 0$ implique une hypothèse de concentration négligeable dans l'eau.

Les principales limites de ces modèles sont :

- Dans le modèle FIDES, les surfaces considérées doivent être homogènes. Ainsi, les changements de rugosité brusques ne peuvent pas être pris en compte.
- Le modèle Volt'Air décrit la volatilisation des pesticides appliqués sur sol nu hors conditions très sèches.

Les variables de sortie sélectionnées sont : le dépôt cumulé dans le temps (30 jours) et l'espace (en kg/ha , avec une dose appliquée de $1\ kg/ha$) et la concentration moyenne dans l'air à 1,5 m de hauteur ($\mu g\ m^{-3}$).

Pour comparer le dépôt gazeux à la dérive, nous avons calculé la dérive d'après les courbes de Rautmann et Streloke (2001) avec l'équation suivante :

$$dérive\ (kg\ /\ ha) = 2.7705x^{-0.9787} \text{ avec } x\ (m) \text{ la distance à la source.}$$

2. Résultats

La Figure 6 présente le dépôt sec cumulé dans le temps (30 jours) et la distance sur un plan d'eau de 50 m de largeur situé à la lisière de la parcelle traitée ainsi qu'une comparaison avec la dérive calculée d'après les courbes de Rautman et Streloke (2001). La corrélation ainsi mise en évidence indique que pour la plupart des pesticides considérés ici, le facteur essentiel gouvernant l'amplitude du dépôt gazeux sur une surface aquatique est en réalité l'intensité de l'émission. La comparaison des différentes résistances impliquées confirme cette analyse. La résistance aérodynamique et la résistance de couche limite sont prépondérantes par rapport à la résistance de surface R_{surf} . Pour des composés présentant une valeur de constante de Henry élevée, cette résistance peut toutefois jouer un rôle dans les échanges atmosphère-eau. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Jacobs et al. (2007) et Durand (2010).

Par ailleurs, le processus d'émission, après une application sur le sol, et par conséquent le dépôt gazeux, est particulièrement bien corrélé au facteur R défini comme :

$$R = \frac{K_h}{K_{oc}} f(DT_{50})$$

R contient les propriétés physico-chimiques régissant la volatilisation (constante de Henry, K_h) et les propriétés environnementales régissant le devenir des pesticides (constante d'adsorption, K_{oc} , et durée de demi-vie, DT_{50}).

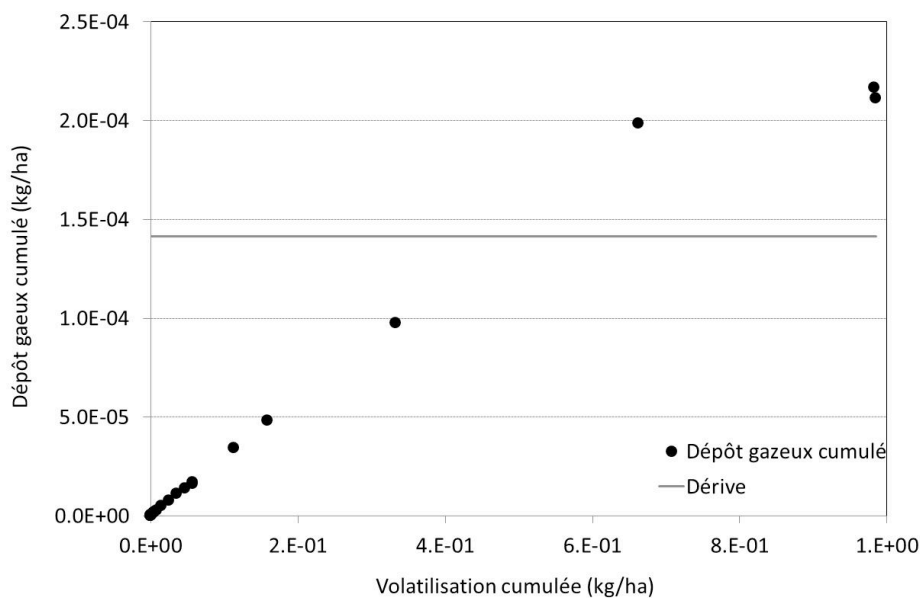


Figure 6 : Dépôt gazeux cumulé sur 50 mètres (points) en fonction de la quantité de pesticides volatilisée sur une parcelle adjacente dans le cas d'un plan d'eau. Moyenne pour les 3 périodes d'application, les 9 années climatiques et les 3 sites, pour une dose appliquée de 1 kg/ha. Le dépôt cumulé par dérive de gouttelettes est également donnée à 50 m (ligne continu).

Cette étude apporte alors un nouvel éclairage sur l'interprétation des résultats obtenus en tunnels de ventilation par Fent (2004). En effet, cet auteur a trouvé que le dépôt gazeux, sur une surface aquatique, de pesticides appliqués sur un couvert végétal était corrélé à la pression de vapeur des composés étudiés. Notre étude suggère que le dépôt est en fait lié à l'intensité de la volatilisation qui, dans le cas d'une application sur un couvert végétal, est elle-même en général corrélée à la pression de vapeur des composés (van den Berg et al., 1999 ; Leistra, 2005).

La Figure 6 présente aussi une comparaison entre le dépôt gazeux et la dérive. D'après cette étude, la contribution des dépôts gazeux peut être supérieure à celle de la dérive. Ceci est particulièrement vrai pour la configuration « cours d'eau », selon la largeur de la ZNT. En effet, plus la ZNT est large, plus le cours d'eau est éloigné de la parcelle émettrice et plus faibles sont les dépôts, mais plus grande est la proportion de dépôt gazeux dans le dépôt total. La Figure 7 illustre cet effet dans le cas d'un cours d'eau : sur un total de 26 composés, la contribution du dépôt gazeux est supérieure à celle de la dérive pour 6 (ZNT de 5 m) et 12 composés (ZNT de 50 m).

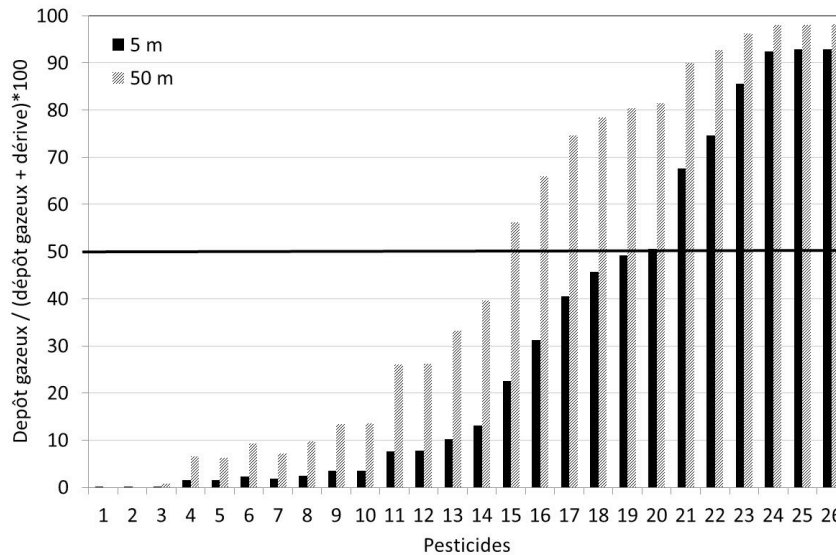


Figure 7 : Contribution moyenne du dépôt gazeux cumulé au dépôt total (gazeux + dérive) pour la configuration "cours d'eau" et pour une zone non traitée de 5 m ou de 50 m, pour l'ensemble des pesticides testés. Le trait horizontal indique une contribution égale des dépôts gazeux et par dérive de gouttelettes.

Il est important de noter ici que le dépôt gazeux dépend des caractéristiques physico-chimiques des pesticides (ainsi que des conditions pédoclimatiques après l'application) alors que la dérive est identique quelle que soit la nature physico-chimique des composés. La dérive est plutôt liée aux techniques d'application (buses, hauteur de rampe, ...) ainsi qu'aux conditions ambiantes lors de l'application (vent, turbulence). Cette différence a des répercussions en termes de gestion puisque les leviers sur lesquels il est possible de jouer pour limiter ces voies de contamination sont donc différents.

Cette étude permet aussi d'identifier d'autres facteurs influençant le dépôt gazeux tels que la nature de la zone non traitée (notamment l'intensité du dépôt sur cette zone) ou la dimension de la parcelle source (plus elle est grande, plus forte est la contamination par dépôt gazeux).

Une analyse plus détaillée des résultats sera fournie dans une publication actuellement soumise (Bedos et al., soumis).

Conclusion

L'atout principal de cet outil repose sur la description mécaniste des processus qui conduisent au dépôt de pesticides gazeux sur les eaux de surface : émission par volatilisation, dispersion atmosphérique et dépôts gazeux sur des surfaces variées (sol/eau/végétation) alors que jusqu'à présent les études étaient essentiellement focalisées, soit sur les émissions, soit sur les dépôts. Des simulations réalisées sur un grand nombre de scénarios ont permis d'identifier les facteurs clé du dépôt qui ont été combinés dans un indicateur unique, le facteur *R*. Cette approche mécaniste permet de rendre compte de façon explicite de l'effet de chaque facteur influant sur le dépôt gazeux – intensité et dimension de la source, dimension et nature de la ZNT et propriétés des pesticides. Ces facteurs sont différents de ceux gouvernant la dérive (technique d'application, conditions météorologiques au moment de l'application,

...). Cette approche pourra permettre, via l'élaboration de scénarios, d'optimiser les zones non traitées (dimensions, localisation, nature). L'identification du facteur *R* permet d'envisager l'établissement d'un classement *a priori* des pesticides présentant les plus forts risques de contamination par dépôt gazeux, classement utile pour rechercher des composés de substitution.

Pour compléter cette étude, nous pouvons étendre l'analyse à d'autres types de zones tampons (haies, arbres, ...) et d'autres sources d'émission (depuis un couvert végétal). Vu les limites des modèles utilisés ici, cela requerra de changer de modèle d'émission pour pouvoir décrire la volatilisation après une application sur couvert, ainsi que de dispersion atmosphérique pour pouvoir décrire des hétérogénéités de surfaces. De tels outils sont soit disponibles dès à présent, soit en cours de développement. Il n'y a par ailleurs aucun verrou scientifique lié à l'utilisation de ces modèles. Une des étapes indispensables sera toutefois d'évaluer l'outil avec des jeux de données de terrain.

Remerciements: G. Fent (RLP AgroScience GmbH, Institute for AgroEcology, Neustadt, Allemagne) pour les nombreuses et fructueuses discussions sur son jeu de données. Les auteurs remercient également le plan Ecophyto et l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (partenariat ONEMA – INRA 2010) pour sa participation, N. Domange en particulier pour le suivi tout au long du projet.

Références bibliographiques

- Asman W., Jorgensen A., Jensen P.K., 2003. Dry deposition and spray drift of pesticides to nearby water bodies (Pesticide research nr66 No. 87-7972-946). Danish Environmental Protection Agency.
- Bedos C., Générmont S., Le Cadre E., Garcia L., Barriuso E., Cellier P., 2009. Modelling pesticide volatilization after soil application using the mechanistic model Volt'Air. *Atmospheric Environment* 43, 3630–3669.
- Bedos C., Loubet B., Sameut Bouhaik A., Feiz A., Barriuso E., 2011. A model of volatilization and subsequent dry deposition of pesticides to surface waters., in: XIV Symposium on Pesticide Chemistry, Piacenza, Italy.
- Bedos C., Loubet B., Barriuso E., soumis. Contamination of surface waters by pesticides close to treated field: an evaluation of the contribution of gaseous deposition following volatilization. *Environ Sci & Technol*.
- Durand E., 2010. Modélisation de la volatilisation, du transport atmosphérique et du dépôt des pesticides à proximité de champ traité. (No. Master 2).
- Fent G., 2004. Short-range transport and deposition of volatilised pesticides. Aachen, Germany.
- FOCUS, 2008. Pesticides in Air: Considerations for Exposure Assessment (No. SANCO/10553/2006 Rev 2). FOCUS Working Group, FOCUS AIR.
- Fragkoulis G., Van den Berg F., Butler Ellis M.C., Trevisan M., 2011. Modelling volatilisation in BROWSE project. The BROWSE-PEARL model. Presented at the XIV symposium on Pesticide Chemistry, Piacenza, Italy.
- Garcia L., Bedos C., Générmont S., Braud I., Cellier P., 2011. Assessing the ability of mechanistic volatilization models to simulate soil surface conditions. A study with the Volt'Air model. *Science of the Total Environment* 409, 3980–3992.
- Générmont S., Cellier P., 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 88, 145–167.
- Jacobs C.M.J., Van den Berg F., Van Jaarsveld J.A., 2007. Principles and main uncertainties of a methodology to assess gaseous deposition of pesticides onto small water bodies. Presented at the XII Symposium on Pesticide Chemistry, Piacenza, Italy, pp. 270–277.
- L'Hermite N., Gouzy A., 2009. Identification and classification of preoccupying pesticides for health and the environment: Sph'Air, a decision support system for air monitoring (No. N° DRC-09-80278-00977A). INERIS.

- L'Hermite N., Gouzy A., Le Gall A.C., Bedos C., Bonicelli B., 2008. Identification and classification of pesticides for health and environment: Sph'Air, a decision support system for air monitoring. Presented at the Abstracts book of the 5th European conference on pesticides and related organic micropollutants in the environment, Marseille, pp. 638–641.
- Leistra M., 2005. Estimating input data for computations on the volatilisation of pesticides from plant canopies and competing processes (No. 1256, ISSN 1566-7197). Alterra, Wageningen.
- Leistra M., Van der Linden A.M.A., Boesten J.J.T.I., Tiktak A., Ven den Berg F., 2001. PEARL model pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems; Descriptions of the processes in FOCUS PEARL v 1.1.1 (No. Alterra- report 013, ISSN 1566-7197, RIVM report 711401 009). Alterra RIVM, Wageningen.
- Liss P.S., Slater P.G., 1974. Flux of gases across the air-sea Interface. *Nature* 247, 181–184.
- Loubet B., Milford C., Sutton A.A., Cellier P., 2001. Investigation of the interaction between sources and sinks of atmospheric ammonia in an upland landscape using a simplified dispersion-exchange model. *Journal of geophysical research* 106, 24, 183–24, 195.
- Loubet B., Panic I., Bedos C., Briand O., Seux R., Cellier P., 2006. Local deposition of volatilised pesticides may be as large as drift. A modelling study. Presented at the Conference on Pesticides Behaviour in Soils, Water and Air, 27-29 March 2006, Warwick, UK.
- Nuutinen S., Durand E., Roulier S., 2011. Modelling of volatilisation, transport and deposition of pesticides at short distance for regulatory purposes. Presented at the XIV Symposium on pesticide Chemistry, Piacenza, Italy.
- Rautmann D., Streloke M., 2001. Die Verzahnung der prufung der pflanzenschutzgerate mit der zulassung der pflanzenschutzmittel. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutz* 270–273.
- Sameut Bouhaik A., 2010. Modélisation de dépôt des pesticides sur des plans d'eau. Master Géoenvironnement Spécialité Géomatériaux et Environnement (2^e année), Université de Marne La Vallée.
- Siebers J., Binner R., Wittich K.P., 2003. Investigation on downwind short-range transport of pesticides after application in agricultural crops. *Chemosphere* 51, 397–407.
- Van den Berg F., Kubiak R., Benjey W.G., Majewski M.S., Yates S.R., Reeves G.L., Smelt J.H., Van der Linden A.M.A., 1999. Emission of pesticides into the air. *Water, Air, and Soil Pollution* 115, 195–218.
- Van den Berg F., Leistra M., 2004. Improvement of the model concept for volatilisation of pesticides from soils and plant surfaces in PEARL. Alterra, Wageningen, Netherlands.
- Van Jaarsveld J.A., 2004. The Operational Priority Substances model. Description and validation of OPS-Pro 4.1. (No. RIVM report 500045001/2004). RIVM, Bilthoven.