

Mesure et modélisation de la dispersion des pesticides dans l'air au voisinage des parcelles agricoles

Période : août 2010 à octobre 2010

Carole SINFORT et Bernard BONICELLI

* Montpellier SupAgro – ITAP – Montpellier

** Cemagref – UMR ITAP – Montpellier

Mots clés : Air, Dispersion, Eaux superficielles, Mesure, Modélisation, Pesticides

Lors des épandages de pesticides par pulvérisation, les pertes dans l'air sont très variables et dépendent principalement du matériel de traitement, de l'état de croissance des plantes, des conditions climatiques et des produits pulvérisés (Sinfort *et al.*, 2009). Au voisinage immédiat des parcelles, cela se traduit par des risques d'exposition, accidentels ou chroniques, pour les professionnels travaillant dans ces zones, les résidents présents dans la zone ou pour les passants occasionnels. La dynamique de ces expositions est importante et dépend essentiellement de la distance du lieu de traitement, des conditions climatiques favorisant la dispersion des produits dans l'air (Gil, 2005) et, bien sûr, de la hauteur des voies respiratoires. Cette exposition est potentiellement importante lors des épandages (Bozon *et al.*, 2009) mais se poursuit après application lors de la volatilisation des produits déposés sur les plantes ou sur le sol (Bedos, 2010). La caractérisation de ces expositions est donc difficile et les méthodes classiques de surveillance de la qualité de l'air sont notablement insuffisantes pour apprécier cette dynamique. Des essais exploratoires menés en 2001 (Bonicelli, 2003) ont ainsi montré que le niveau de contamination de l'air restait significatif jusqu'à quelques kilomètres et que le choix et l'emplacement des préleveurs, les durées de prélèvement relevaient d'une problématique complexe. À l'échelle européenne, ces problèmes préoccupants ont fait l'objet d'un important travail de synthèse (Kubiak, 2003). En France un groupe d'experts du CORPEN (Collectif, 2007) a complété ce travail en proposant des mesures d'accompagnement pour améliorer la situation. Ce travail se poursuit aujourd'hui pour déterminer quelles améliorations techniques sont à privilégier (Bonicelli, 2010).

De ce recueil d'expertise ressort toute l'importance qu'il faut accorder aux travaux de modélisation pour mieux estimer les expositions et par voie de conséquence concevoir les systèmes de surveillance. Dans ce cadre, afin de discuter l'ensemble des phénomènes mis en jeu, deux publications récentes sont analysées :

- la représentation des mécanismes de transport et de dépôt des sprays émis par un pulvérisateur (Melese Endalew *et al.*, 2010) ;
- la modélisation de la dispersion et de la volatilisation des pesticides pour estimer l'exposition des personnes au voisinage des épandages (Butler Ellis *et al.*, 2010).

Ces deux articles présentent deux niveaux de contribution de la modélisation pour l'estimation de l'exposition aux pesticides épandus en zone agricole. Le premier concerne l'échelle du procédé d'épandage et montre comment la modélisation peut être utilisée pour prévoir les émissions de pesticides pendant les pulvérisations. Le deuxième concerne l'échelle de la parcelle et de ses environs et vise à calculer les expositions après le traitement. Ces deux approches sont complémentaires et illustrent bien la démarche scientifique qui soutient l'étude des risques liés aux pulvérisations pour les personnes présentes au voisinage des parcelles (pollutions diffuses).

La modélisation du transport et du dépôt des sprays dans une végétation

Melese Endalew A, Debaer C, Rutten N, Vercammen J, Delele A and Ramon H. Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: A new integrated CFD approach. *Agricult Forest Meteorol.* 2010 ; 150 : 1383-1392.

Analyse

Melese Endalew *et al.* (2010) décrivent une méthode pour modéliser le transport et le dépôt d'un spray (flux de gouttes) généré par un pulvérisateur à jet porté⁽¹⁾ et destiné au traitement des arbres fruitiers. Cette approche utilise un code de calcul de mécanique des fluides (CFD⁽²⁾). Le modèle prend en compte les

interactions complexes entre le vent, l'air, le flux de gouttelettes et la végétation dans son environnement.

L'outil de CFD regroupe une représentation 3D de la structure de la plante (branches et volumes poreux représentant le feuillage autour des branches), et son influence sur les flux d'air et de gouttes pour calculer leur dépôt sur la végétation ainsi que les quantités perdues. Des termes source sont ajoutés pour prendre en compte la turbulence de l'air à l'échelle des branches et leur effet sur les feuilles. Le modèle inclut un modèle de fragmentation ainsi qu'un modèle Lagrangien pour le transport des gouttes. Un modèle stochastique est utilisé pour calculer les dépôts sur les feuilles : la probabilité des gouttes d'être piégées est égale à 1 si les gouttes rencontrent une surface solide (sol,

branches); dans les milieux poreux représentant le feuillage, cette probabilité est égale à la porosité optique de la végétation. Deux types de buses - une buse conique à jet creux, d'utilisation classique sur ce type de pulvérisateurs, et une buse à jet plat, avec des gouttes plus grosses que la première - sont comparées afin d'étudier l'influence du spectre de taille des gouttelettes sur le flux et le dépôt.

L'évaluation du modèle est réalisée à deux niveaux. Le modèle de fragmentation est évalué à partir des mesures granulométriques fournies par les constructeurs et donne d'excellents résultats (coefficients de corrélations supérieurs à 0,99). Une campagne de mesure est décrite qui vise à mesurer les concentrations dans l'air et à les comparer avec les prévisions du modèle. Pour cela, une solution de cuivre a été pulvérisée et les quantités piégées sur des « cure-pipes » placés au centre de la végétation ont été mesurées par spectrométrie atomique. Les concentrations ont été normalisées (c'est la fraction de la concentration maximale qui est utilisée) avant d'être comparées aux résultats expérimentaux ce qui laisse supposer que le modèle n'est pas capable de retrouver les masses effectivement émises. Les auteurs utilisent la somme normalisée des écarts absolus pour évaluer l'erreur des résultats du modèle. L'erreur obtenue est de l'ordre de 30 % ce qui peut paraître important mais le modèle représente bien les variations de concentration avec la hauteur et les résultats sont plutôt bons en comparaison aux autres approches de ce genre et compte-tenu que tout le processus est modélisé. On peut également noter une grande variabilité des résultats expérimentaux sur les 3 répétitions qui ont été réalisées pour chaque buse et les résultats du modèle se situent en général à l'intérieur des plages de variations indiquées sur les graphiques. Le modèle est ensuite utilisé pour calculer la répartition de produit sur les feuilles, les branches et le sol pour les deux buses. Les quantités retrouvées sur les feuilles sont de 55,8 % pour la buse conique et 54,2 % pour la buse à jet plat. Ces valeurs sont peu différentes car le modèle stochastique de dépôt ne prend pas en compte la taille des gouttes. Enfin les auteurs proposent d'utiliser leurs simulations pour fournir un indicateur de dérive en calculant le taux de produit déposé au-dessus des arbres (plus précisément la quantité mesurée au-dessus de la hauteur moyenne des arbres dans un plan vertical situé à 2m30 derrière les arbres). Ils en déduisent que la buse à jet conique permet de réduire la dérive de 57,2 % par rapport à la buse à jet plat et comparent cette valeur à un résultat expérimental de 69,6 %. En conclusion Melese Endalew *et al.* (2010) discutent la validité de leur modèle, notamment en ce qui concerne le modèle stochastique de dépôt et insistent sur les résultats obtenus pour la prédiction de la dérive.

Commentaire

Ces travaux sont représentatifs des efforts actuels de la communauté scientifique de coupler modélisation de la structure des plantes et CFD pour prédire le devenir des gouttes pulvérisées. Devant la complexité des phénomènes en jeu et grâce à l'évolution des moyens de calculs, on s'approche d'une modélisation de plus en plus précise des phénomènes réels mais

les résultats ne permettent pas encore d'estimer précisément les quantités émises dans l'environnement. Les tendances sont par contre de mieux en mieux approchées et des résultats plus précis devraient voir le jour prochainement. Ces modèles sont lourds à configurer, ils sont limités à des conditions très précises (un appareil et une culture) et ils ne sont pas aisés à utiliser (génération d'un très grand nombre de données). Ils fournissent cependant une voie de recherche importante pour limiter les protocoles expérimentaux pour lesquels on ne peut contrôler toutes les variables (plante et météo) dans le but d'établir des lois de comportement afin de prévoir les quantités perdues dans l'environnement, ce qui constitue un préalable obligatoire pour l'estimation des expositions.

La modélisation de la dispersion et de la volatilisation des pesticides pour l'évaluation de l'exposition des riverains de parcelles épandues

Butler Ellis MC, Underwood B, Peirce MJ, Walker CT and Miller PCH. Modelling the dispersion of volatilised pesticides in air after application for the assessment of resident and bystander exposure. *Biosystems Engineering*. 2010; 107: 149-154

Analyse

L'évaluation des expositions des personnes (passants et résidents) aux vapeurs issues des parcelles agricoles après application devrait être une composante essentielle du processus d'homologation des produits phytosanitaires. Actuellement, cette phase gazeuse n'est pas prise en compte alors que de nombreuses expérimentations montrent qu'elle peut être aussi importante, sinon supérieure, que les départs directs lors des épandages. Pour aborder cette problématique, Butler Ellis *et al.* (2010) détaillent l'information et les méthodes disponibles pour la révision des procédures d'évaluation des préparations chimiques. Il en ressort que la dispersion de la phase gazeuse des préparations épandues dans les parcelles agricoles pourrait être modélisée en utilisant des codes commerciaux de dispersion à l'aide d'une méthode normalisée.

La principale source d'incertitude de ce type d'approche est due à la grande variabilité des conditions rencontrées lors des épandages. De plus, les auteurs estiment qu'aucun modèle existant ne permet actuellement d'estimer des taux d'émission en phase gazeuse en bonne correspondance avec la réalité.

La méthode proposée par les auteurs permet d'évaluer l'exposition des personnes par le choix du cas le plus défavorable. Contrairement au modèle précédent, on s'intéresse ici aux quantités émises par la parcelle par évaporation après traitement. Les quantités émises sont fixées en supposant un épandage sur la parcelle de 100 g/ha et en utilisant le taux d'émission en phase gazeuse de la substance appliquée. Lorsque ce taux n'est pas connu (cas général), une valeur arbitraire de 95 % en 24 h est proposée pour représenter un « pire cas ». Les auteurs calculent ensuite la dispersion de ces quantités à l'aide du modèle de dispersion ADMS⁽⁴⁾ développé par Cambridge Environmental Research Consultants, choisi car il est utilisé dans de nombreuses

situations pour les évaluations environnementales au Royaume-Uni. Le modèle ADMS fonctionne à partir d'une chronique météorologique horaire et détermine la dispersion d'un nuage de polluants à partir d'un modèle Gaussien⁽⁵⁾ (Plume). Ce type de modèle a fait l'objet de nombreuses recherches pour l'étude des risques industriels et donne des résultats fiables. Le calcul a été mené pour deux sites agricoles qualifiés de « typiques » par les auteurs et pour lesquels 2 ans de chroniques météo horaires étaient disponibles (2005 et 2006).

Les auteurs ont réalisé des simulations pour 4 scénarios de situation (terrain plat, champ en haut d'une colline, dans le creux d'une vallée et sur une pente uniforme) et ont retenu le cas du terrain plat pour lequel les concentrations en bordure de parcelle les plus importantes ont été ponctuellement calculées. L'exposition d'un individu entouré de parcelles agricoles (à une distance de 4 m) a alors été estimée toutes les heures pour deux cas particuliers : à hauteur de respiration d'un enfant de 2 ans (0,75 m) et d'une femme adulte (1,40 m). Les concentrations moyennes sont calculées pour chaque période de 24 h. Le niveau d'exposition retenu correspond au 75^e percentile des concentrations moyennes obtenues (sur les deux années simulées, on observe une concentration moyenne inférieure ou égale à cette valeur dans 75 % des journées simulées). Les auteurs montrent que des valeurs supérieures à 15 µg/m³ peuvent être obtenues, cette valeur étant la grandeur utilisée au Royaume-Uni pour évaluer la toxicité par voie respiratoire, et que ces valeurs pourraient être encore plus grandes en considérant les quantités d'épandage réelles (au lieu des 100 g/ha).

Ainsi, pour maximiser le calcul des expositions, les auteurs ont choisi les conditions les plus défavorables, notamment un flux d'émission correspondant à la volatilisation de 95 % du produit épandu dans les 24 h suivant l'application, même si cela ne correspond pas à la réalité dans la majorité des cas. Ils estiment en effet qu'il est difficile d'être plus précis car il y a à la fois un manque de données sur les phénomènes de volatilisation ou d'autres paramètres *a priori* très importants comme la distance des riverains sous le vent des épandages, les dates des épandages ou l'influence des propriétés physico-chimiques des préparations chimiques étudiées.

Commentaire

Comme le soulignent les auteurs, la principale faiblesse de cette approche réside dans la prise en compte d'un taux d'émission surévalué (95 % de la dose appliquée dans les 24 h). Néanmoins, en travaillant à partir de chroniques météorologiques réelles, la méthode proposée permet d'établir des niveaux d'exposition réalistes et de les adapter aux substances actives commercialisées (en prenant en compte la dose maximale autorisée par exemple). Elle présente également une réflexion importante pour intégrer la modélisation de la dispersion spatio-temporelle des pesticides dans une réflexion sur l'évaluation des risques pour les personnes riveraines des applications.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les réflexions de Melese Endalew *et al.* (2010) et de Butler Ellis *et al.* (2010) confirment la nécessité de coupler des approches théoriques et expérimentales à différentes échelles pour estimer l'exposition des personnes aux pesticides et optimiser les procédés d'épandage afin de minimiser cette exposition. Les travaux de Melese Endalew *et al.* (2010) illustrent les apports de la modélisation pour quantifier le devenir des gouttes pulvérisées et prenant en compte le couplage du flux d'air, du spray et de la végétation et à partir de là estimer les sources de contamination. Ce type de démarche est à développer car il n'existe pas, à ce jour, de méthode de quantification des sources de contamination alors que cela serait nécessaire pour toute démarche d'évaluation des expositions. Les travaux de Butler Ellis *et al.* (2010) proposent une méthode d'analyse des risques adaptée à l'évaluation de l'exposition des populations riveraines des applications. La prise en compte de la pulvérisation des parcelles dans leur contexte spatial (géographique) et temporel présente une avancée certaine qui doit être généralisée pour évaluer plus précisément les risques liés à l'emploi des pesticides pour les riverains.

De la goutte à l'atmosphère, les décisions agronomiques, les procédés de traitement, l'architecture des plantes, l'organisation des parcelles et des travaux, la topographie et le climat constituent un puzzle complexe dont chaque élément interagit avec les autres. Pour répondre à cette complexité, les démarches à la fois pluridisciplinaires et collaboratives, s'appuyant sur des modèles mathématiques et des expériences de terrain, sont indispensables.

Lexique

- (1) Jet porté : pulvérisateurs utilisant des buses qui fragmentent la bouillie en fines gouttes sous l'effet de la pression et une assistance d'air qui aide au transport des gouttes et à la pénétration dans le feuillage. Ces pulvérisateurs sont le plus souvent utilisés dans les traitements des vergers
- (2) CFD : Computational Fluid Dynamics. Les modèles CFD sont basés sur l'écriture des équations de bilan instantanées
- (3) LAD : Leaves Area Density
- (4) ADMS : Atmospheric Dispersion Modelling System
- (5) Modèle Gaussien : modèle décrivant l'expansion d'un nuage en régime permanent à partir d'une fonction gaussienne (l'écart-type s'agrandit avec la distance).

Publications de référence

Bedos C. Fungicide Volatilization Measurements: Inverse Modeling, Role of Vapor Pressure, and State of Foliar Residue. *Environ Sci Technol.* 2010; 44: 2522–2528.

Bonicelli B, Voltz M, Marliere F et al. Rapport d'expérimentation 2001-2002 Cemagref/Inra/Ineris. 2003: 23 pages.

Bozon N, Sinfort C, Mohammadi B et al. Drift-X: un modèle de dispersion atmosphérique des pesticides couplé à un SIG. XXXIX^e congrès du Groupe Français des Pesticides - 13-15 mai. 2009: 4 pages.

Collectif. Les produits phytosanitaires dans l'air. Brochure du CORPEN. 2007: 122 pages.

FOCUS. Pesticides in air: consideration for exposure assessment. Report of the FOCUS Working Group on Pesticides in Air. EC Document Reference SANCO/10553/2006 Rev2. 2008: 327 p.

Gil Y, Sinfort C, Brunet Y et al. Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying. *Atmospheric Environment.* 2007; 41: 2945–2957.

Sinfort C, Cotteux E, Bonicelli B et al. Influence des conditions et matériels de pulvérisation sur les pertes de pesticides au sol et dans l'air en viticulture Languedocienne. XXXIX^e congrès du Groupe Français des Pesticides - 13-15 mai. 2009: 4 pages

Butler Ellis MC, Lane AG, O'Sullivan CM, et al. Bystander exposure to pesticide spray drift: New data for model development and validation. *Biosystems engineering.* 2010; 107: 162-168

De Ruiter H, Holterman HJ, Kempenaar C et al. Influence of adjuvants and formulations on the emission of pesticides to the atmosphere. A literature study for the Dutch Research Programme Pesticides and the Environment (DWK-359) theme C2. 2003. Plant Research International B.V. Wageningen, Report 59: 48 p.

Reus P, Leederstse C, Bocktaller I et al. Comparing Environmental Risk Indicators for Pesticides—Results of the European CAPER Project, Centre for Agriculture and Environment, Utrecht, The Netherlands (1999) ISBN 90-5643-106-5.

Mots clés utilisés pour la recherche bibliographique

Air, Bystanders, Compounds, Dispersion, Exposition, Modelisation, Pesticides, Sampling, Sprays, Volatilization

Reuves de la littérature

Bonicelli B, Ruelle B, Sinfort C et al. Épandage des pesticides agricoles: état des connaissances sur les pertes directes et déterminants des améliorations techniques possibles. Recueil des présentations du colloque SFER, Lyon 2010: 4 pages.

Gil Y, Sinfort C. Emission of pesticides to the air during sprayer application. A bibliographic review. *Atmospheric Environment.* 2005; 39: 5183-5193

Kubiak R, Bürkle WL, Cousins I et al. FOCUS-AIR: remits and first results 2003. In: A.A.M. Del Re, E. Capri, L. Padovani, M. Trevisan (Eds.) *Pesticide in Air, Plant, Soil & Water System. Proceedings of XII Symposium Pesticide Chemistry, June 4–6 2003, Piacenza, Italy.* La Goliardica Pavese s.r.l.: 473–485.

Autres publications identifiées

Birkved M, Hauschild MZ. PestLCI - A model for estimating field emissions of pesticides in agricultural LCA. *Ecological Modelling.* 2006; 198: 433-441

Étude danoise qui décrit une approche pour évaluer les pertes de pesticides vers l'environnement dans les analyses du cycle de vie (ACV). Prend en compte plusieurs approches pour les pertes vers l'air: pertes par dérive pendant les applications (utilisation d'une loi exponentielle fonction de la distance d'après EPPO 1996), volatilisation depuis les feuilles (loi exponentielle fonction du temps, d'après EPPO, 1996) et volatilisation à partir du sol (modèle de fugacité d'après Reus et al., 1999).