

Caractérisation de l'exposition environnementale spatialisée à un pyréthrianoïde en Picardie

JULIEN CAUDEVILLE^{1,2}
 CORENTIN REGRAIN^{1,2,3}
 ROSELINE BONNARD¹
 VINCENT LEMAIRE⁴
 LAURENT LÉTINOIS⁴
 FRÉDÉRIC TOGNET⁴
 CÉLINE BROCHOT⁵
 VÉRONIQUE BACH²
 KAREN CHARDON²
 FLORENCE ZEMAN⁵

¹ Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)
 Unité impact sanitaire et exposition (ISAE)
 Parc Alata BP2
 60550 Verneuil-en-Halatte
 France
 <julien.caudeville@ineris.fr>
 <corentin.regrain@ineris.fr>
 <roseline.bonnard@ineris.fr>

² PeriTox - UMI 01
 UFR de Médecine
 Université de Picardie
 Jules Verne
 UMR I
 1-3, rue des Louvels
 80000 Amiens
 France
 <veronique.bach@u-picardie.fr>
 <karen.chardon@u-picardie.fr>

³ Laboratoire amiénois de mathématiques fondamentales et appliquées (LAMFA) – CNRS, UMR 7352
 Université de Picardie
 Jules Verne
 33, rue St Leu
 80000 Amiens
 France

⁴ Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)
 Unité modélisation atmosphérique et

Résumé. Les expositions aux pesticides se caractérisent par la multiplicité des voies d'exposition (alimentation, eau, sol, air) liée à leur présence dans l'ensemble des milieux environnementaux. Pour une caractérisation fine des expositions environnementales, un premier verrou réside dans la capacité à rassembler au sein d'un même système d'analyse un ensemble de données combinant le mode de vie des populations et la contamination locale des milieux environnementaux sur des résolutions spatiales appropriées et des territoires étendus (échelles régionales ou nationales).

Dans le cadre de cette étude pilote, l'objectif du projet CartoExpo était de tester la faisabilité d'une méthodologie intégrée pour la cartographie d'indicateurs d'exposition sur des résolutions spatiales et temporelles fines. Pour illustrer la démarche, la contamination de la population générale est étudiée pour un pyréthrianoïde (la cyperméthrine) sur la Picardie en considérant les voies d'ingestion (eau, sol, aliments) et d'inhalation (gaz et aérosol).

Pour la dispersion atmosphérique, une méthode innovante de métamodèle statistique a été développée. Elle repose sur une technique d'apprentissage automatique à partir d'une vaste base de données de simulations sur une parcelle élémentaire. Le métamodèle est dans un deuxième temps appliqué aux épandages relevés à une fréquence tri-horaire sur l'ensemble des parcelles agricoles en région Picardie. Des modèles d'exposition multimédia sont nécessaires pour 1) estimer les flux d'émission liés aux phénomènes de volatilisation du sol et des plantes au niveau des parcelles agricoles, 2) quantifier la contamination des produits alimentaires locaux (hors champ : jardin potager) liée à la proximité des parcelles agricoles et 3) combiner l'exposition externe.

L'exercice de caractérisation de l'exposition comporte cependant de nombreux manques et incertitudes dont l'impact, dans un sens ou dans l'autre, est à ce stade difficile à quantifier. Le besoin de valider les approches mises en œuvre nécessite de mobiliser des données (mesurées ou modélisées) supplémentaires.

Mots clés : cyperméthrine ; pesticide ; spatial ; exposition.

Abstract

Characterization of spatialized environmental exposure to a pyrethroid in Picardy, France

Pesticides are present in all areas of the environment and absorbed via many pathways (food, water, soil, and air). To characterize environmental exposures in detail, it is first necessary to combine within the same analysis data on the population's lifestyles and on the local contamination of environmental media at appropriate resolutions and over large areas.

Pour citer cet article : Caudeville J, Regrain C, Bonnard R, Lemaire V, Létinois L, Tognet F, Brochot C, Bach V, Chardon K, Zeman F. Caractérisation de l'exposition environnementale spatialisée à un pyréthrianoïde en Picardie. *Environ Risque Sante* 2019 ; 18 : 392-400. doi : 10.1684/ers.2019.1340

cartographie
environnementale
(MOCA)
Parc Alata BP2
60550 Verneuill-en-Halatte
France
<vincent.lemaitre-stage@
ineris.fr>
<laurent.letinois@ineris.fr>
<frederic.tognet@ineris.fr>
⁵ Institut national de
l'environnement industriel
et des risques (INERIS)
Unité modèles pour
l'écotoxicologie et la
toxicologie (METO)
Parc Alata BP2
60550 Verneuill-en-Halatte
France
<celine.brochot@ineris.fr>
<florence.zeman@ineris.fr>

Tirés à part :
J. Caudeville

Article reçu le 16 novembre
2018, accepté le 12 avril 2019

As part of this pilot study, the objective of the CartoExpo project was to test the feasibility of an integrated methodology to map exposure indicators for small-area resolutions and short time intervals. To illustrate the approach, contamination of the general population was studied for a pyrethroid (cypermethrin) in the Picardy region (Northern France). For atmospheric dispersion, an innovative statistical meta-model method was developed, based on a machine learning technique that used a large database of simulations on a representative parcel. The meta-model was then applied to cypermethrin application at three-hourly intervals on all agricultural parcels in the Picardy region. Multimedia exposure models are needed to: 1) estimate emissions from soil and plant volatilization phenomena on agricultural land, 2) quantify contamination of local food products (excluding home vegetable gardens) due to proximity to agricultural land, and 3) combine external exposures.

Characterizing exposure involves numerous uncertainties, primarily about the assumptions underlying the different modeling approaches, and the representativeness and accuracy of the integrated data. Further measured and modeled data are therefore needed to validate the different approaches.

Key words: cypermethrin; pesticide; spatial; exposure.

Les produits phytosanitaires sont majoritairement utilisés en agriculture par divers acteurs (industries, collectivités territoriales, médecine). Les pyréthri-noïdes constituent une famille d'insecticides. Dans les années 1970, ces substances ont émergé en tant qu'alternative aux pesticides déjà existants. Des études toxicologiques ou épidémiologiques ont montré que les pyréthri-noïdes peuvent provoquer des irritations ou des perturbations au niveau du système nerveux central ou endocrinien [1]. Plusieurs études d'imprégnation des populations ont montré une exposition environnemen-tale importante de la population de tout âge, par la présence de métabolites dans les urines ou de la molécule parente dans le méconium de nouveau-nés [2]. Parmi les 17 pyréthri-noïdes vendus et utilisés, la cyperméthrine correspond à plus de la moitié des ventes depuis 2013 (chiffre estimé à partir des données de la Banque nationale des ventes de produits phytopharma-ceutiques par les distributeurs agréés [BNV-D]).

Les méthodes d'évaluation de l'exposition des popu-lations peuvent utiliser des mesures d'indicateurs biolo-giques ou des mesures directes de la présence de pesticides dans l'environnement, reflétant l'exposition externe locale, et des données relatives au comportement des populations. Les expositions aux pesticides se caractérisent par la multiplicité des voies d'exposition [3] (alimentation [4], eau [5], sol [6], air [7]) liée à leur présence dans l'ensemble des milieux environnemen-taux. Pour une caractérisation fine des expositions environnementales, un premier verrou réside dans la capacité à pouvoir rassembler au sein d'un même

système d'analyse un ensemble de données issues de mesures ou modélisations hétérogènes pour évaluer l'exposition agrégée issue du transfert de contaminants de différents milieux environnementaux [8]. Leur intégration et interfaçage dans un système d'information géographique (SIG) constituent une approche privilégiée pour caractériser l'exposition combinant le mode de vie des populations et la contamination locale des milieux environnementaux à des résolutions fines et sur de larges territoires.

La contamination du compartiment atmosphérique par les produits phytosanitaires est bien moins connue que celle de l'eau et du sol. La plupart des études épidémiologiques partent de l'hypothèse que les niveaux de concentrations dans l'air des phytosanitaires sont les plus élevés à proximité directe des zones d'épandage et décroissent avec la distance [9]. Des indicateurs d'exposition ont ainsi été construits à partir de la quantité de phytosanitaires supposée épandue dans une zone, celle-ci étant estimée d'après la quantité de substances chimiques vendue aux agriculteurs de la zone. Selon ces données, l'estimation des émissions atmosphériques des produits phytosanitaires qui alimentent les modèles de dispersion est longtemps restée un élément bloquant pour la mise en œuvre de ces modèles, du fait de la diversité des modes d'application, de la dépendance aux conditions météorologiques et de la méconnaissance des processus complexes de microphysique, de dépôt et de remobilisation des substances. Ainsi, très peu d'études utilisent une modélisation spatiale de la diffusion aérienne des phytosanitaires [7]. Les avancées dans ce

domaine [10] et les possibilités de décrire les quantités d'application de phytosanitaires à des résolutions fines¹ permettent aujourd'hui l'utilisation de modèles atmosphériques à l'échelle locale.

Sur la base de cette étude pilote, l'objectif du projet CartoExpo était de tester la faisabilité d'une méthodologie intégrée pour la cartographie d'indicateurs d'exposition pour la population générale à des résolutions spatiales et temporelles fines, décrivant les variabilités liées aux localisations et aux modes de vie.

Dans le cadre de cet article, nous avons travaillé sur la contamination à un pyréthrianoïde (la cyperméthrine) en Picardie en considérant les voies d'ingestion (eau, sol, aliments) et d'inhalation (gaz et aérosol) pour la population générale.

Méthodologie

Périmètre de l'étude et approche employée

L'exposition par ingestion et inhalation a été calculée sur la région Picardie pour l'année 2013 pour la population générale. La région a été subdivisée en mailles de 2 km de côté (soit 5 183 mailles sur l'ensemble du territoire d'étude). Dans cette étude pilote, ne sont intégrées et caractérisées que les expositions dont les sources locales proviennent d'usage phytosanitaire et de provenance commerciale ; les usages domestiques sont exclus. Dans ce périmètre d'étude, seules les voies d'ingestion et d'inhalation sont considérées ici, la voie cutanée étant une voie négligeable pour la population générale et pour ce type de source.

L'approche développée intègre un modèle d'émission, de dispersion atmosphérique et un modèle d'exposition multimédia. Une étape importante du travail de modélisation a consisté à estimer les flux de phytosanitaires émis dans l'air à partir des surfaces traitées après application des phytosanitaires, afin de fournir un terme d'entrée pour modéliser le transport atmosphérique des substances des zones d'épandage.

Les contributions locales spatialisées ont alors été estimées hors champ pour caractériser l'exposition des populations riveraines par inhalation et ingestion de produits alimentaires autoproduits.

Le diagramme conceptuel présentant la chaîne de modélisation de transport et de transfert des contaminants dans les voies d'exposition locales est présenté *figure 1*. Le modèle multimédia permet de modéliser le transfert des substances entre les différents compartiments environnementaux (air, sol, cultures végétales) pour prédire l'exposition locale des populations sous la

forme de concentrations inhalées dans l'air (en g.m^{-3}) ou de doses ingérées quotidiennement pour les denrées alimentaires produites localement (en $\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$). À cette exposition locale, s'ajoutent d'autres expositions telles que celles induites par les aliments non locaux et l'eau de distribution.

Modélisation des émissions et de la dispersion atmosphérique

Pour estimer les quantités annuelles épandues sur les parcelles agricoles, les données de la BNV-D sont utilisées. Les ventes de produits au code postal de l'acheteur extraites de cette base sont réparties spatialement en fonction de l'occupation des sols, selon une méthodologie définie par l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) dans le cadre d'un projet de recherche. À partir des données de temporalisation des épandages fournies par les chambres d'agriculture, les quantités épandues sont ensuite estimées à un pas de temps tri-horaire sur l'ensemble des parcelles du territoire étudié. Un inventaire des modèles disponibles a été réalisé dans l'objectif d'identifier les outils les plus adaptés pour estimer les transferts et la distribution des phytosanitaires dans l'environnement après épandage. Le choix d'un modèle a été réalisé sur la base du meilleur compromis entre différents critères :

- sa disponibilité et la documentation des équations, des hypothèses de calcul et des paramètres implémentés ;
- son adéquation au design de l'étude sur les aspects phénoménologiques intégrant notamment la description :
 - des principaux compartiments environnementaux d'intérêt (le sol, l'air, les feuilles, la surface des feuilles, les fruits, les racines, etc.) ;
 - de la quantité de substance épandue décrite comme terme source de la pollution ;
 - des phénomènes de dégradation au sein de chaque compartiment, la prise en compte des flux sortant du système ;
- la flexibilité d'adaptation des hypothèses de modélisation et la rapidité des approches calculatoires. Au vu du nombre élevé de pas de temps et de parcelles, la performance de résolution du système d'équations différentielles constituait un verrou technique à maîtriser.

Les distributions sur le sol, la plante et dans l'air (dérive : déplacement aérien des gouttelettes de produit phytosanitaire lors du traitement des cultures) dans les premières minutes après épandage ont été estimées pour chacune des parcelles à partir du modèle Pest-LCI (USEtoxTM) [11]. Les flux d'émission issus de la volatilisation à partir du sol et des plantes ont été estimés selon le modèle dynamiCROP [12] pour fournir le flux émis dans l'air d'après des parcelles traitées, à l'échelle de la région Picardie, pendant une année, pour chaque pas de

¹ À partir des données de la BNV-D dans le cadre du plan EcoPhyto.

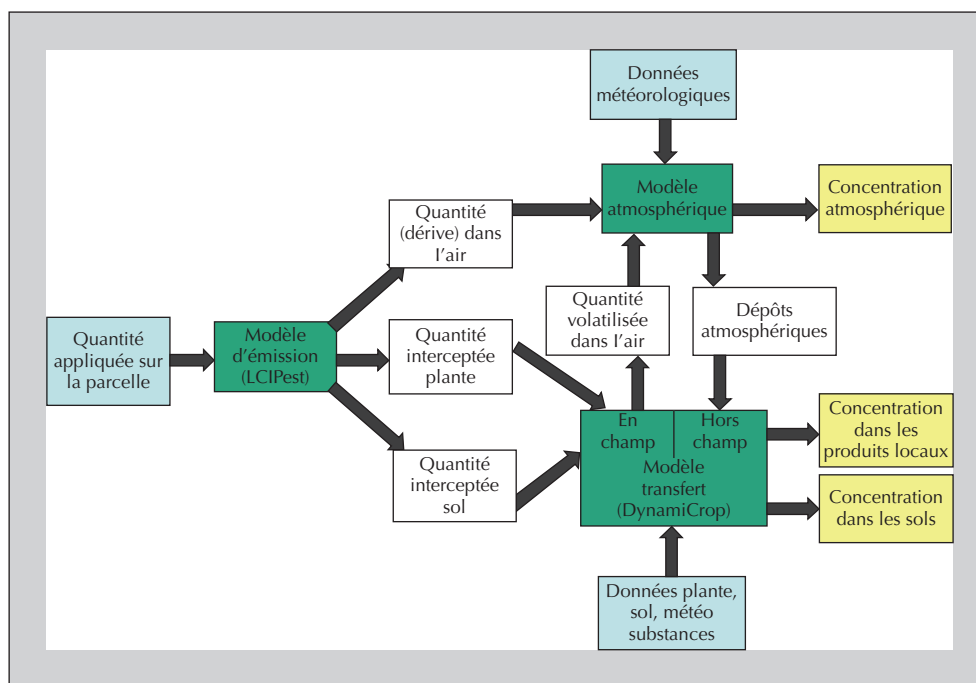


Figure 1. Diagramme conceptuel présentant la chaîne de modélisation du transfert des contaminants dans les voies d'exposition environnementales locales.

Figure 1. Conceptual diagram showing the modeling chain for contaminant transfer in the local environmental exposure pathways.

temps de trois heures. Les flux d'émission issus des dérives (comportement aérosol) et des volatilisations sol et plante (comportement gaz) alimentent le modèle atmosphérique de calcul des concentrations et des dépôts atmosphériques.

Le nombre important de parcelles, leurs délimitations géométriques très hétérogènes ainsi que la forte variabilité temporelle des émissions ont orienté la démarche de modélisation de la dispersion atmosphérique vers le développement d'un métamodèle statistique (approximation statistique contrainte à partir d'un large ensemble de simulations de dispersion atmosphérique) plutôt que vers une modélisation déterministe, trop lourde à mettre en œuvre étant donné le nombre de simulations requis. Le métamodèle de dispersion atmosphérique a été développé à partir d'un jeu de données d'apprentissage et testé au fur et à mesure de sa construction sur un ensemble de données de validation indépendant afin d'éviter le sur-apprentissage. La base d'apprentissage utilise des résultats du modèle ADMS version 5.2 pour des simulations correspondant à une parcelle élémentaire suivant les paramètres météorologiques observés (vent, température, précipitation, humidité et nébulosité) en 2013 sur cinq stations météorologiques proches des Hauts-de-France du réseau Synop Essentielles à une fréquence trihoraire.

Afin de reproduire au mieux la dispersion des polluants et d'offrir les meilleures performances en termes de calcul, le métamodèle décrivant la dispersion utilise une technique de type « *gradient boosting* » [11, 13] (figure 2). Une fois ce modèle validé, il est appliqué pour l'ensemble des émissions horaires sur chacune des 48 880 parcelles en Picardie pour les substances concernées pour fournir des concentrations ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) et dépôts ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) atmosphériques. La nature de la substance (gaz ou aérosol) est supposée ne pas évoluer une fois émise et est considérée comme un traceur passif.

Évaluation de l'exposition spatialisée

Les expositions environnementales incluent :

- les expositions attribuables soit à l'ingestion de produits d'origine locale d'aliments autoproduits (jardins potagers uniquement, ne recouvre pas les aliments produits en circuit court) par les consommateurs, soit à l'ingestion de sol. Les concentrations dans ces aliments sont modélisées à partir de la concentration des compartiments environnementaux ;
- les expositions attribuables à l'ingestion d'aliments produits en dehors de la zone riveraine.

Les variables d'exposition (comportement alimentaire, masse corporelle, etc.) de la population de la région

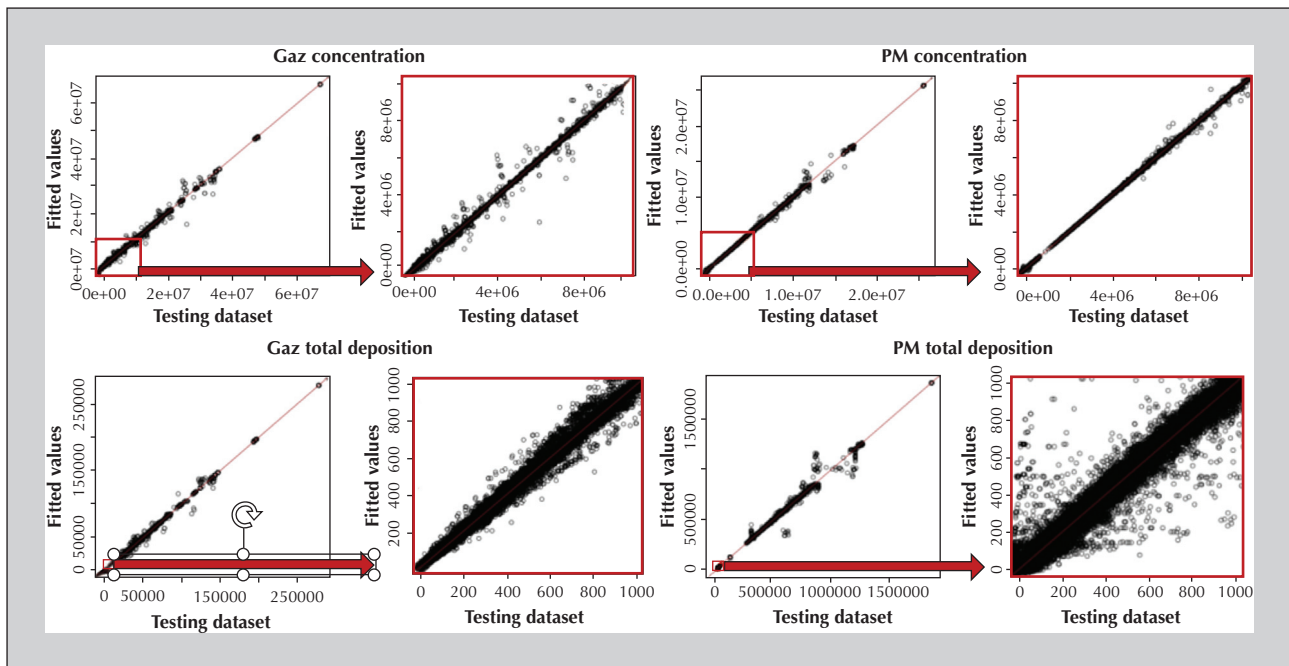


Figure 2. Représentation des valeurs prédites (dépôts totaux en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ et concentrations en $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$) par le modèle statistique contre les valeurs des simulations ADMS sur l'ensemble test, et focus sur les valeurs faibles pour une espèce gazeuse (à gauche) et une espèce particulaire (à droite).

Figure 2. Representation of the predicted values (total deposits in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and concentrations in $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$) by the statistical model compared with the ADMS simulation values from the test dataset, focusing on the low values for a gaseous species (left) and a particulate species (right).

Picardie sont renseignées dans le modèle d'exposition MODULERS [8] pour quantifier leurs expositions aux différents polluants. Les individus sont supposés présents 365 jours par an sur les mailles considérées. L'évaluation de l'exposition permet d'estimer l'exposition globale à travers l'appréhension d'un ensemble de voies d'exposition. L'utilisation de la dose journalière d'exposition (DJE) permet la combinaison des expositions relatives à l'ensemble des médias d'exposition de la voie d'ingestion [13-15]. La DJE est calculée selon les équations classiques par sommation de chacune des voies. Les teneurs en polluants dans les aliments de la part non locale sont issues de la compilation des mesures européennes réalisée par l'Agence européenne de sécurité des aliments (Efsa) [16], et correspondent aux niveaux moyens observés de contamination des aliments de provenance commerciale. La concentration moyenne dans les eaux de distribution est estimée à partir du rapport d'évaluation des risques liés aux résidus de pesticides dans l'eau de distribution [17].

Les transferts de substances des milieux sol et air vers les végétaux autoproduits sont estimés à partir des équations de bilans massiques d'après dynamCROP. La contamination locale est estimée d'après des dépôts atmosphériques gazeux et particulaires (aérosol) et le transfert racinaire à partir de la contamination des sols

pour quatre types de végétaux (pomme de terre, tomate, pomme, laitue) correspondant aux principaux aliments autoconsommés au niveau national. Pour chacune de ces catégories d'aliments, un pourcentage de production locale a été calculé selon les données de l'enquête de l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) [18].

Résultats

Afin de modéliser les concentrations et dépôts atmosphériques des différentes espèces précitées, des modèles statistiques décrivant la dispersion atmosphérique se basant sur des variables météorologiques ont été construits, puis appliqués. Les concentrations (figure 3) et les dépôts atmosphériques sont obtenus sur un pas de temps tri-horaire à partir des émissions de cyperméthrine et de la dispersion calculée avec le métamodèle atmosphérique à petite échelle déployé sur l'ensemble de la Picardie avec le système d'information géographique parallélisé (développement d'algorithmes permettant de traiter les calculs de manière simultanée pour réduire les temps de calcul). Les concentrations atmosphériques moyennes annuelles les plus élevées

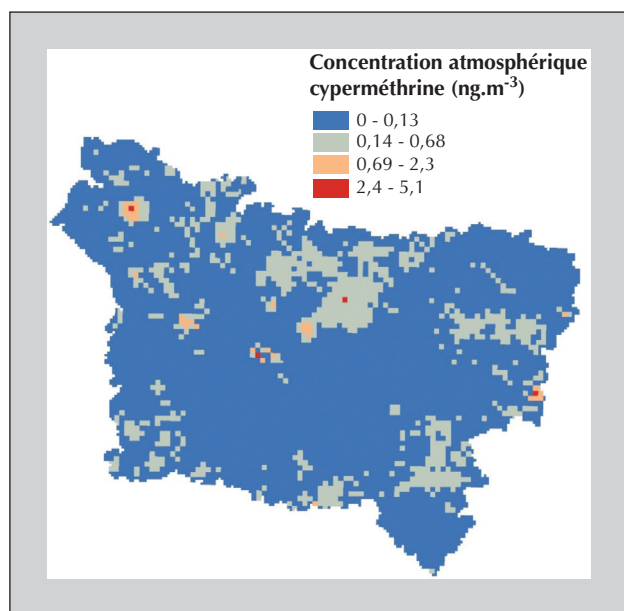


Figure 3. Concentration moyenne annuelle dans l'air en ng.m^{-3} (cyperméthrine) sur une maille de 2 km de côté.

Figure 3. Mean annual air concentration in ng.m^{-3} (cypermethrin) on a grid measuring 4 square kilometers.

sont mises en évidence à proximité des parcelles sur lesquelles les substances actives sont potentiellement plus épandues.

La cyperméthrine est un des pesticides les plus retrouvés dans l'ensemble des aliments mesurés et pour l'ensemble des pays européens [17]. Toutefois, les fréquences de détection dans les aliments restent très faibles (0 % dans l'Étude de l'alimentation totale 2 [EAT2] et 5,3 % pour l'Efsa pour les limites de quantification). Les valeurs de concentration dans les produits alimentaires de provenance commerciale utilisées correspondent aux valeurs estimées des hypothèses basses et hautes de l'Efsa. L'hypothèse basse (HB) correspond à un scénario pour lequel les valeurs non détectées sont estimées égales à 0 et les valeurs détectées, mais non quantifiées, sont estimées égales à la limite de détection. Selon cette hypothèse, pour la cyperméthrine, les valeurs de concentration pour les différents aliments sont nulles. L'hypothèse haute (HH) correspond à un scénario pour lequel les valeurs non détectées sont estimées égales à la limite de détection et les valeurs détectées, mais non quantifiées, sont estimées égales à la limite de quantification. On obtient ainsi des intervalles de concentrations pour chacun des végétaux considérés (figure 4, histogrammes de couleur bleue) et des doses journalières d'exposition correspondant à l'ensemble des autres contributions de provenance strictement commerciale.

Les concentrations dans les végétaux produits et consommés localement ont été estimées par le modèle

d'exposition sur chacune des mailles de la zone d'étude à partir du transfert des dépôts au sol et sur les végétaux. À la différence des épandages appliqués directement sur les cultures agricoles, ces produits végétaux produits par les riverains (jardin potager), excluant les usages domestiques de produits phytosanitaires, ne sont contaminés qu'indirectement par déposition des substances issues des dérives et volatilisation après épandage sur les parcelles agricoles à proximité. Sur l'ensemble des zones de l'étude, les concentrations modélisées dans les végétaux locaux (figure 4, histogrammes de couleur orange) restent comprises dans les intervalles des valeurs de l'Efsa.

La carte de la figure 5A présente la DJE totale correspondant au scénario HB pour les produits alimentaires de provenance commerciale. Sur cette carte, seules les contributions alimentaires locales sont apparentes (les concentrations des HB étant nulles). Les zones où les doses d'exposition sont les plus élevées correspondent à des zones à proximité des parcelles sur lesquelles les épandages sont les plus importants. Pour l'HH (figure 5B), au-delà des proximités des parcelles, les structures spatiales associées aux comportements alimentaires (quantité ingérée journalièrement et part d'autoconsommation par catégorie d'aliment) contrôlent une partie des

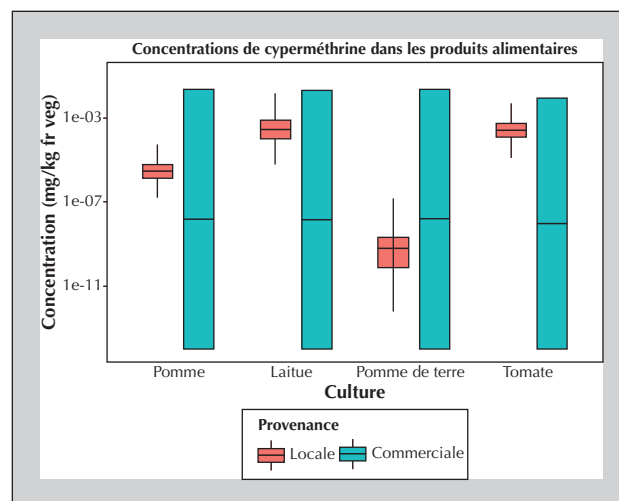


Figure 4. Comparaison des prédictions de concentrations dans les produits végétaux modélisées avec les données de mesure de l'Agence européenne de sécurité des aliments (Efsa) pour la cyperméthrine. Les boîtes à moustache en orange correspondent à l'ensemble des valeurs de concentration modélisées dans les produits locaux sur l'ensemble des mailles de la région Picardie. Les barres verticales bleues correspondent aux intervalles minimum et maximum de concentration par végétaux estimés à partir d'hypothèses basses et hautes. Les valeurs sont exprimées en mg.kg^{-1} de matière fraîche.

Figure 4. Comparison of predicted concentrations in plant products modeled with Efsa measurement data for cypermethrin. The values are expressed in mg.kg^{-1} of fresh material.

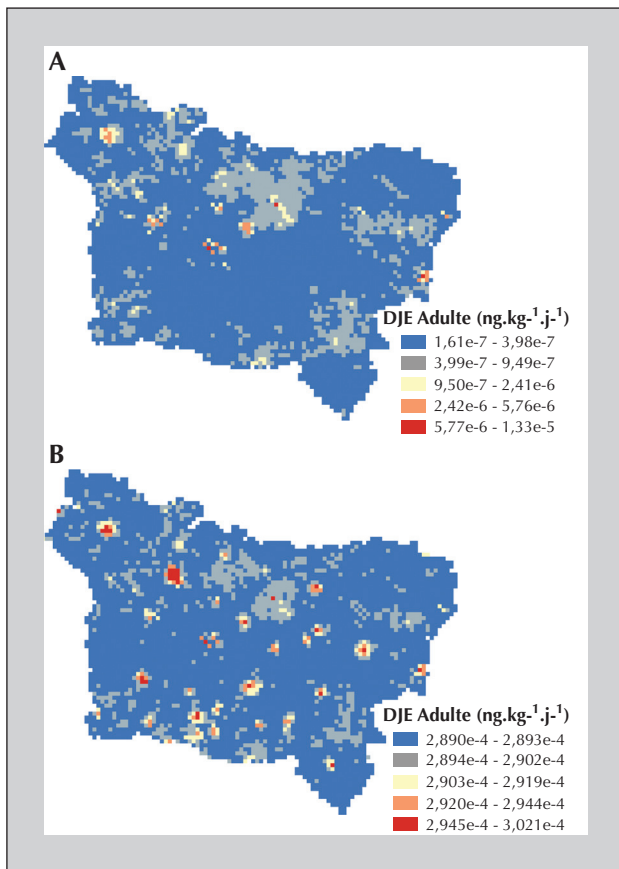


Figure 5. Dose journalière d'exposition totale en $\text{ng.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$ intégrant les contributions des ingestions de sol, d'eau, d'aliments de provenance locale et utilisant l'hypothèse basse (A) et l'hypothèse haute (B) pour le calcul des concentrations dans les aliments de provenance commerciale.

Figure 5. Daily dose of total exposure in $\text{ng.kg}^{-1}.\text{d}^{-1}$ integrating the contributions of soil, water, and local food ingestion, applying (A) the low hypothesis and (B) the high hypothesis to calculate concentrations in foods of commercial origin.

variabilités spatiales des doses externes, les concentrations dans les produits locaux étant relativement faibles. Les zones les plus élevées correspondent :

- aux zones urbaines pour lesquelles les fractions de produits de provenance commerciale sont les plus élevées (Amiens, Abbeville, Creil, etc.) ;
- aux zones à proximité des parcelles sur lesquelles les épandages sont les plus importants.

Discussion

La construction d'une démarche d'évaluation intégrée de l'exposition dans le cadre de l'identification des zones de surexposition potentielle et de la

caractérisation des inégalités environnementales nécessite d'être capable de disposer d'outils permettant de produire ou de traiter des données variées et hétérogènes de façon rigoureuse. Différentes techniques peuvent traiter spécifiquement les bases de données environnementales, comportementales ou populationnelles de manière à augmenter leur représentativité par rapport aux objectifs de caractérisation de l'exposition : les méthodes statistiques et la modélisation déterministe.

L'utilisation du SIG permet de cartographier les inégalités d'exposition environnementales, à une résolution fine, par la spatialisation des doses journalières d'exposition issues du modèle d'exposition multimédia. Ce type d'approche aide à évaluer une dose totale et la contribution relative des différentes voies d'exposition à partir des données populationnelles et des concentrations estimées dans les médias d'exposition.

Lors de cette étude, les voies d'exposition d'inhalation et d'ingestion ont été considérées ; d'autres voies, comme l'ingestion de poussières, la voie cutanée pourraient aussi par la suite être prises en compte.

Les structures spatiales des cartes d'exposition que nous avons obtenues reflètent différemment l'influence d'une série de facteurs démographiques, comportementaux et environnementaux qui varient dans l'espace et interagissent avec les différentes échelles spatiales. Les concentrations dans les végétaux autoproduits sont d'autant plus faibles que les périodes d'épandage agricole sont distantes par rapport aux périodes de récolte des végétaux autoproduits considérés. Les cartographies de concentrations atmosphériques et de DJE-HB ont des structures spatiales très proches qui sont liées à la localisation des zones importantes d'émission : les populations les plus exposées vivent à proximité des parcelles sur lesquelles les substances sont potentiellement plus épandues. Les zones pour lesquelles les DJE sont les plus élevées correspondent aux zones pour lesquelles les dépôts atmosphériques étaient les plus élevés au moment des dates de récolte des différents végétaux considérés. Nous observons ainsi des zones maximales différentes pour les voies d'ingestion et d'inhalation, les concentrations atmosphériques étant présentées sous forme de moyenne annuelle.

L'exercice de caractérisation de l'exposition comporte de nombreux manques et incertitudes. Ceux-ci dépendent principalement des hypothèses qui sous-tendent les différentes approches de modélisation, de la représentativité et de l'exactitude des données intégrées. Par exemple, le périmètre d'étude exclut de fait les sources de contamination issues des usages biocides. D'autre part, il est encore difficile d'évaluer la pertinence dans le contexte du projet des données issues de la spatialisation de la BNV-D (est-ce que les valeurs très prononcées sont réalistes ? La résolution d'analyse est-elle appropriée ?). Concernant la modélisation du

transfert atmosphérique, une approche novatrice a été développée qui repose sur la construction d'un métamodèle de dispersion contraint sur une base d'apprentissage de modélisations déterministes. Dans cette approche, la transformation chimique des substances n'est pas encore prise en compte (la nature de la substance – gaz ou aérosol – est supposée ne pas évoluer une fois émise, et est considérée comme un traceur passif).

Nous retrouvons un nombre élevé de concentrations inférieures aux limites de quantification et de détection dans les bases de données de mesures des compartiments d'exposition (alimentation, eau). L'utilisation de ce type de valeurs est souvent plus difficile et différentes méthodes statistiques doivent être mobilisées pour y faire face. Dans le cas des fréquences de détection et de quantification trop faibles, les données deviennent inexploitable (cas des données de l'EAT2 et des valeurs européennes). Les concentrations mesurées disponibles à ce stade ne permettent pas de comparer les parts locales et commerciales. Au vu de ce constat, le besoin de mobiliser des données (mesurées ou modélisées) supplémentaires devient nécessaire.

Conclusion

L'étude pilote visait à tester la faisabilité de cartographies d'indicateurs d'exposition sur des résolutions spatiales et temporelles fines, intégrant le comportement alimentaire des populations et la contamination locale des milieux environnementaux. L'étude pilote permet pour la substance étudiée :

- l'identification des zones de surexposition potentielle par l'analyse des variations des indicateurs dans l'espace ;
- d'expliquer la variabilité des inégalités d'exposition sur la zone d'étude.

Le couplage de modèles numériques et statistiques a permis d'asseoir une base scientifique et technique pour l'intégration, le traitement de données et l'évaluation du transfert des contaminants de l'environnement vers les

populations. Cette étape a permis de tester la faisabilité du déploiement des modèles statistiques et déterministes sur un large territoire. Pour la dispersion atmosphérique, une méthode innovante de métamodèle statistique a été développée. Elle repose sur une technique d'apprentissage automatique à partir d'une vaste base de données de simulations sur une parcelle élémentaire. Le métamodèle est dans un deuxième temps appliqué aux épandages relevés à une fréquence tri-horaire sur l'ensemble des parcelles agricoles en région Picardie. Des modèles d'exposition multimédia sont nécessaires pour :

- estimer les flux d'émission liés aux phénomènes de volatilisation du sol et des plantes au niveau des parcelles agricoles ;
- quantifier la contamination des produits alimentaires locaux (hors champ : jardin potager) liée à la proximité des parcelles agricoles ;
- combiner l'exposition externe.

Dans le cadre du projet CartoExpo, une gamme plus large de substances de la famille des pyréthrianoïdes sera considérée jusqu'à l'estimation des concentrations internes dans l'ensemble des tissus, organes et fluides à partir de modèles physiologiques toxicocinétiques. Le SIG fournira ainsi la possibilité de croiser l'exposition estimée avec des données d'imprégnation biologique pour fournir des éléments d'interprétation des déterminants environnementaux de l'exposition. Des étapes de validation de l'ensemble des étapes de modélisation sont prévues qui nécessitent l'acquisition de données supplémentaires (mesures de la campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air ambiant, imprégnation biologique, mesures spécifiques de végétaux développés autour de zones d'épandage, etc.). Une fois consolidée, cette méthodologie sera étendue à d'autres substances et sur d'autres territoires. ■

Remerciements et autres mentions

Financement : Agence française de la biodiversité (AFB) dans le cadre du plan Ecophyto 2 ; **liens d'intérêts :** les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. Viel J-F, Rouget F, Warembourg C, *et al.* Behavioural disorders in 6-year-old children and pyrethroid insecticide exposure: the PELAGIE mother-child cohort. *Occup Environ Med* 2017 ; 74 : 275-81.
2. Berton T, Mayhoub F, Chardon K, *et al.* Development of an analytical strategy based on LC-MS/MS for the measurement of different classes of pesticides and their metabolites in

meconium: application and characterisation of foetal exposure in France. *Environ Res* 2014 ; 132 : 311.

3. ANSES. *Exposition de la population générale aux résidus de pesticides en France : Synthèse et recommandations du comité d'orientation et de prospective scientifique de l'observatoire des résidus de pesticides, ORP. Rapport scientifique.* Maisons-Alfort : ANSES, 2010.

4. ANSES. *Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) – Tome 2*. Maisons-Alfort : ANSES, 2011.
5. Davezac H, Grandguillot G, Robin A, et al. *L'eau potable en France 2005-2006*. Paris : Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative, 2008.
6. Villanneau E, Saby NPA, Arrouays D, et al. Spatial distribution of lindane in topsoil of Northern France. *Chemosphere* 2009 ; 77 : 1249-55.
7. Aschan-Leygonie C, Baudet-Michel S, Lavie E, et al. Comment évaluer l'exposition aux pesticides de l'air en population générale? Enseignements d'une revue bibliographique. *Cybergeo : European Journal of Geography* 2015 ; 729. [En ligne].
8. Bonnard R. *Sets of equations for modelling exposure associated with soil contamination or emissions from an industrial facility*. Verneuil-en-Halatte : INERIS-DRC-14-141968-04378A, 2014.
9. Babina K, Dollard M, Pilotto L, Edwards J. Environmental exposure to organophosphorus and pyrethroid pesticides in South Australian preschool children: a cross sectional study. *Environ Int* 2012 ; 48 : 109-20.
10. Fantke P, Jolliet O. Life cycle human health impacts of 875 pesticides. *Int J Life Cycle Assess* 2016 ; 21 : 722-33.
11. Dijkman T, Birkved M, Hauschild M. PestLCI 2.0: a second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA. *Int J Life Cycle Assess* 2012 ; 17 : 973-86.
12. Fantke P, Juraske R, Antón A, Friedrich R, Jolliet O. Dynamic multicrop model to characterize impacts of pesticides in food. *Environ Sci Technol* 2011 ; 45 : 8842-9.
13. Chen C, Guestrin X. *GBoost: a scalable tree boosting system*. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York : ACM, 2016.
14. Caudeville J, Bonnard R, Boudet C, Denys S, Govaert G, Cicolella A. Development of a spatial stochastic multimedia model to assess population exposure at a regional scale. *J Total Environ* 2012 ; 432 : 297-308.
15. Ioannidou D, Malherbe L, Beauchamp M, Saby N, Bonnard R, Caudeville J. Characterization of environmental health inequalities due to Polyaromatic Hydrocarbons exposure in France. *Int J Environ Res Public Health* 2018 ; 15 : 2680.
16. EFSA. Reporting data on pesticide residues in food and feed according to Regulation (EC) No 396/2005 (2014 data collection). *EFSA Journal* 2015 ; 13 (7) : 4195.
17. ANSES. *Évaluation des risques liés aux résidus de pesticides dans l'eau de distribution – Contribution à l'exposition alimentaire totale*. Bron : ANSES, 2013.
18. Bertrand M. *Consommation et lieux d'achat des produits alimentaires en 1991*. Paris : INSEE, 1993.