

# Spatialiser l'exposition liée à l'utilisation agricole des pesticides : l'apport des matrices culture-exposition Matphyto

LAËTITIA PERRIN<sup>1</sup>  
ALEXIS ELBAZ<sup>2</sup>  
FRÉDÉRIC MOISAN<sup>1</sup>  
LAURA CHAPERON<sup>1</sup>  
JOHAN SPINOSI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Santé publique France  
Direction santé  
environnement et travail  
12, rue du Val d'Osne  
94410 Saint-Maurice  
France

<laetitia.perrin@  
santepubliquefrance.fr>  
<frederic.moisan@  
santepubliquefrance.fr>  
<laura.chaperon@  
santepubliquefrance.fr>  
<johan.spinosi@  
santepubliquefrance.fr>

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay,  
UVSQ, Univ. Paris-Sud  
Institut Gustave-Roussy,  
Inserm U1018, Equipe  
« Exposome, hérédité,  
cancer and santé » CESP  
114, rue Edouard Vaillant  
94807 Villejuif  
France  
<alexis.elbaz@inserm.fr>

Tirés à part :  
L. Perrin

**Résumé.** *Introduction.* Dans la littérature, l'étude de la relation entre l'exposition aux pesticides et diverses maladies se heurte à la difficulté d'évaluer l'exposition, en particulier de manière rétrospective. Les matrices culture-exposition (MCE) ont été développées pour répondre à cette difficulté.

*Objectif.* Notre méthode consiste à combiner les MCE aux données d'occupation du sol issues des recensements agricoles pour déterminer des indicateurs géographiques d'exposition environnementale et professionnelle. Nous illustrons cette approche pour deux substances actives.

*Méthodes.* Les MCE de quatre cultures sont utilisées (céréales à paille, maïs, pommes de terre, vigne). Elles décrivent trois groupes de pesticides, leurs familles chimiques et leurs substances actives à partir de trois indicateurs par région et par période depuis 1960. Ces données sont combinées aux recensements agricoles (1979, 1988, 2000, 2010) pour calculer des indicateurs d'exposition environnementale et professionnelle pour chaque canton du territoire métropolitain français. Deux substances actives (chlortoluron, pyrimicarbe) illustrent cette méthodologie et les résultats sont comparés aux données d'achats de pesticides (Banque nationale de vente des produits phytopharmaceutiques par les distributeurs [BNV-D]).

*Résultats.* Les deux substances actives montrent une évolution temporelle et spatiale. La proportion de surfaces/exploitations traitant au pyrimicarbe augmente entre 1979 et 2010, à l'inverse du chlortoluron. C'est le Nord qui a les valeurs les plus élevées pour le pyrimicarbe ; ce gradient est appuyé par une autocorrélation spatiale forte. Les zones sont plus disparates pour le chlortoluron. Les comparaisons avec les données d'achats montrent des corrélations élevées ( $\geq 0,80$ ).

*Conclusion.* La combinaison des MCE avec les données des recensements agricoles décrit l'exposition aux pesticides à un niveau géographique fin (le canton). Cette approche permet de déterminer des évolutions spatiales, confirmées par la comparaison avec les données d'achats de pesticides, et temporelles.

**Mots clés :** matrices culture-exposition ; indicateurs d'exposition ; pesticides ; système d'information géographique ; recensement agricole ; exposition professionnelle ; exposition environnementale.

**Abstract.**

***Spatializing exposure related to the agricultural use of pesticides: the contribution of the Matphyto crop-exposure matrices***

*Background.* In the literature, the study of the relationship between pesticide exposure and various diseases is hampered by the difficulty of assessing exposure, particularly in a retrospective manner. Crop-exposure matrices (CEM) have been developed to address this difficulty.

*Objective.* Our method consists in combining CEM with land use data from agricultural censuses to determine geographic indices of environmental and occupational exposure. We illustrate this approach for two active substances.

*Methods.* The CEM of four crops are used (straw cereals, corn, potatoes, vines). They each describe three groups of pesticides, their chemical families and their active substances using

Pour citer cet article : Perrin L, Elbaz A, Moisan F, Chaperon L, Spinosi J. Spatialiser l'exposition liée à l'utilisation agricole des pesticides : l'apport des matrices culture-exposition Matphyto. *Environ Risque Sante* 2023 ; 22 (S1) : 5-18. doi : 10.1684/ers.2023.1764

three indices per region and period since 1960. These data are combined with agricultural censuses (1979, 1988, 2000, 2010) to calculate indices of environmental and occupational exposure for each canton of the French metropolitan territory. Two active substances (chlortoluron, pyrimicarb) illustrate this methodology, and the results are compared with pesticide purchase data (BNV-D).

Results. The two active substances show a temporal and spatial evolution. The proportion of areas/farms treated with pyrimicarb increased between 1979 and 2010, in contrast to chlortoluron. The North has the highest values for pyrimicarb, this gradient is supported by a strong spatial autocorrelation. Areas are more heterogeneous for chlortoluron. Comparisons with purchase data show high correlations ( $\geq 0.80$ ).

Significance. The combination of CEMs with agricultural censuses data allows to describe pesticide exposure at a fine geographical level (the canton). This approach allows to identify spatial evolutions, confirmed by comparison with pesticide purchase data, and temporal changes.

**Key words:** crop-exposure matrices; exposure indices; pesticides; geographic information system; agricultural census; occupational exposure; environmental exposure.

Les produits phytopharmaceutiques sont utilisés pour protéger les cultures depuis des décennies. Dans la suite de l'article, le terme « pesticides », bien qu'il ait une définition généralement plus large, sera utilisé à la place de « substances actives phytopharmaceutiques » pour simplifier la lecture. Les pesticides sont associés à divers problèmes de santé, tels que certains troubles neurologiques, hormonaux ou cancers [1-5]. La France est un important pays agricole et utilise une quantité importante de pesticides (>1 000 substances) qui ont évolué au cours du temps [6]. Parmi ces substances, il est difficile de déterminer lesquelles ont un effet sur la santé, en particulier pour des maladies survenant de manière différée par rapport à l'exposition. L'absence de données exhaustives et rétrospectives rend cette évaluation difficile. La méthodologie la plus fréquente consiste, pour l'exposition professionnelle, à interroger les travailleurs agricoles sur leur historique professionnel [7]. Lors de ces entretiens, ils déclarent facilement les cultures sur lesquelles ils ont travaillé, mais plus difficilement les pesticides utilisés [8, 9].

Le programme Matphyto de Santé publique France a été développé pour pallier ces difficultés [10]. Il consiste à élaborer des matrices culture-exposition (MCE) pour estimer de façon rétrospective l'exposition professionnelle à différents pesticides à partir de l'intitulé des cultures agricoles.

L'objectif de cet article est de montrer une utilisation de ces MCE dans le cadre d'un système d'information géographique (SIG). En les associant aux données d'utilisation du sol issues des recensements agricoles, elles permettent d'évaluer les expositions environnementale et professionnelle aux pesticides, liées à leur utilisation agricole dans les cultures, sur l'ensemble de la France métropolitaine. Cette approche est illustrée pour deux substances actives pour lesquelles nous décrivons et validons les résultats.

## Méthodologie

### Bases de données

#### Les matrices culture-exposition Matphyto

Le programme Matphyto développe des MCE permettant de caractériser l'exposition aux pesticides en fonction des principales cultures agricoles françaises, des régions et du temps. Les pesticides pris en compte sont ceux définis dans le règlement européen CE n° 1107/2009. Pour chaque culture, ou groupe de cultures, une MCE décrit l'utilisation des groupes de pesticides (herbicides, insecticides et fongicides), déclinés par familles chimiques (FC) et substances actives (SA). Ce programme couvre le territoire français métropolitain et ultramarin. En métropole, il a investigué quatre cultures, décrites dans le *tableau 1*, et une substance active (SA) spécifique (pesticides arsenicaux).

Les MCE fournissent trois indicateurs d'exposition :

- probabilité : proportion d'exploitations agricoles utilisant le pesticide considéré ;
- fréquence : nombre moyen de traitements annuels sur les parcelles cultivées ;
- intensité : quantité moyenne de pesticide appliquée à chaque traitement.

Comme il n'existe pas en France de recueil exhaustif de l'usage rétrospectif de pesticides, la réalisation des MCE nécessite la compilation de données obtenues à partir de sources souvent incomplètes, hétérogènes et difficiles d'accès. Les données proviennent d'une recherche bibliographique (dont la littérature grise) et d'une consultation des professionnels des filières agricoles : instituts techniques agricoles, chambres d'agriculture, etc. On ne dispose souvent pas de données fiables et précises avant les années 1980.

**Tableau 1.** Liste et caractéristiques des matrices culture-exposition Matphyto disponibles.**Table 1.** List and characteristics of available Matphyto crop-exposure matrices.

MCE	Cultures ou PPP	Période
Céréales à paille	Regroupe sans distinction blé (tendre/dur, hiver/printemps), orge (hiver/ printemps), avoine, seigle et triticales	1960 - 2010
Maïs	Distinction de deux cultures : <ul style="list-style-type: none"> <li>• maïs grain</li> <li>• maïs fourrage</li> </ul>	1960 - 2012
Pomme de terre	Distinction de quatre cultures : <ul style="list-style-type: none"> <li>• conservation</li> <li>• primeurs</li> <li>• plants</li> <li>• féculière</li> </ul>	1955 - 2009
Vigne	Regroupe sans distinction le raisin de cuve et le raisin de table	1980 - 2016
Pesticides arsenicaux	Distinction entre les PPP suivants : <ul style="list-style-type: none"> <li>• arsénite de cuivre</li> <li>• arséniate de plomb</li> <li>• arséniate de calcium</li> <li>• arsénite de sodium</li> <li>• pesticides arsenicaux</li> </ul> Distinction entre les cultures suivantes : <ul style="list-style-type: none"> <li>• vigne</li> <li>• arboriculture</li> <li>• pomme de terre</li> </ul>	1945 - 2001

Les facteurs pédoclimatiques ou socio-économiques jouent sur les pratiques agricoles. Les MCE sont donc régionalisées pour décrire des usages homogènes, mais ce découpage est en principe supérieur au département.

Chaque MCE aura, selon la qualité des données disponibles, sa propre période d'étude et son propre découpage géographique. Les zones géographiques de chaque MCE, ainsi que leur combinaison correspondant à 21 zones, sont décrites en *figure 1*.

### Le recensement agricole

Depuis 1955 et environ tous les dix ans, le ministère en charge de l'Agriculture réalise un recensement exhaustif des exploitations agricoles de métropole et des départements et régions d'Outre-mer (DROM) [11]. Six recensements agricoles (RA) (1970, 1979, 1988, 2000, 2010 et 2020) sont accessibles *via* une plateforme sécurisée (Centre d'accès sécurisé aux données [CASD]). Pour chaque exploitation, de nombreuses données sont disponibles dont la surface de chaque culture.

Les cultures bénéficiant de MCE (céréales à paille, maïs, pommes de terre, vigne) représentent 75 % des surfaces agricoles utiles (SAU) hors prairies et jachères, de l'ensemble de la France métropolitaine (*figure 2*) et plus de 80 % de la quantité de pesticides utilisée [12].

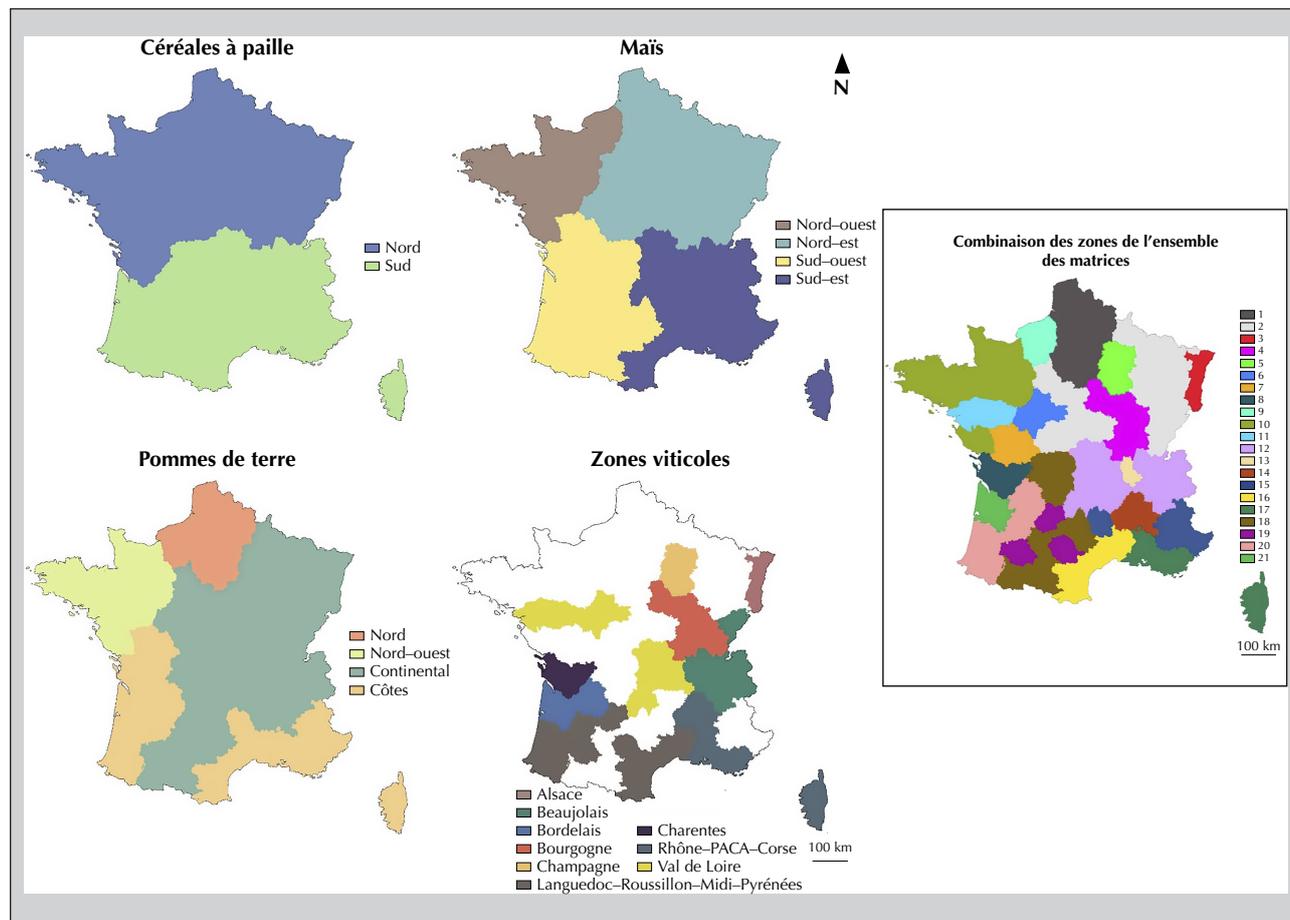
### Calcul des indicateurs : estimation de l'exposition liée à l'utilisation agricole des pesticides au niveau géographique

L'objectif des indicateurs est de déterminer l'exposition liée à l'utilisation agricole des pesticides au sein d'une zone géographique à partir de la caractérisation agricole issue des RA et des données d'exposition des MCE.

#### Distinction entre exposition environnementale et exposition professionnelle

Selon notre approche, l'estimation de l'exposition environnementale correspond à l'exposition des personnes habitant en zone agricole et exposées en raison de leur proximité aux surfaces traitées. Elle est fonction des pesticides appliqués sur les surfaces des cultures agricoles dans une zone géographique.

L'estimation de l'exposition professionnelle correspond à l'exposition des travailleurs dans les exploitations agricoles. Elle est fonction des pesticides utilisés par les exploitations agricoles. Les indicateurs sont calculés à partir des assolements de chaque exploitation d'une zone géographique.



**Figure 1.** Zones géographiques déterminées pour la matrice de chaque culture (à gauche) et combinaison des différentes zones géographiques des quatre cultures utilisées pour le calcul des indicateurs (à droite).

**Figure 1.** Geographic areas determined for the matrix of each crop (left), and combination of the different geographic areas of the 4 crops used for the calculation of the indices (right).

### Niveau géographique

Dans les RA, la commune du siège de l'exploitation est renseignée, mais ses parcelles peuvent se situer sur d'autres communes. Ainsi, la SAU de l'ensemble des exploitations d'une commune peut dépasser sa superficie (10 % des communes en 2010). Pour ces raisons, le canton a été choisi comme niveau géographique à étudier (médiane = 147 km<sup>2</sup>), réduisant la source d'erreur à 0,2 %.

Les cantons ont été définis sur la base du recensement français de 2013 (n = 3 689 cantons).

### Calcul des indicateurs

La méthodologie utilisée pour combiner les MCE et les RA est décrite en détail dans un rapport méthodologique [13] et un article [14] et résumée en *figure 3*.

Pour l'estimation des expositions environnementale et professionnelle, trois indicateurs ont été calculés pour

chaque groupe de pesticides, chaque famille chimique (FC) et chaque SA présents dans les MCE :

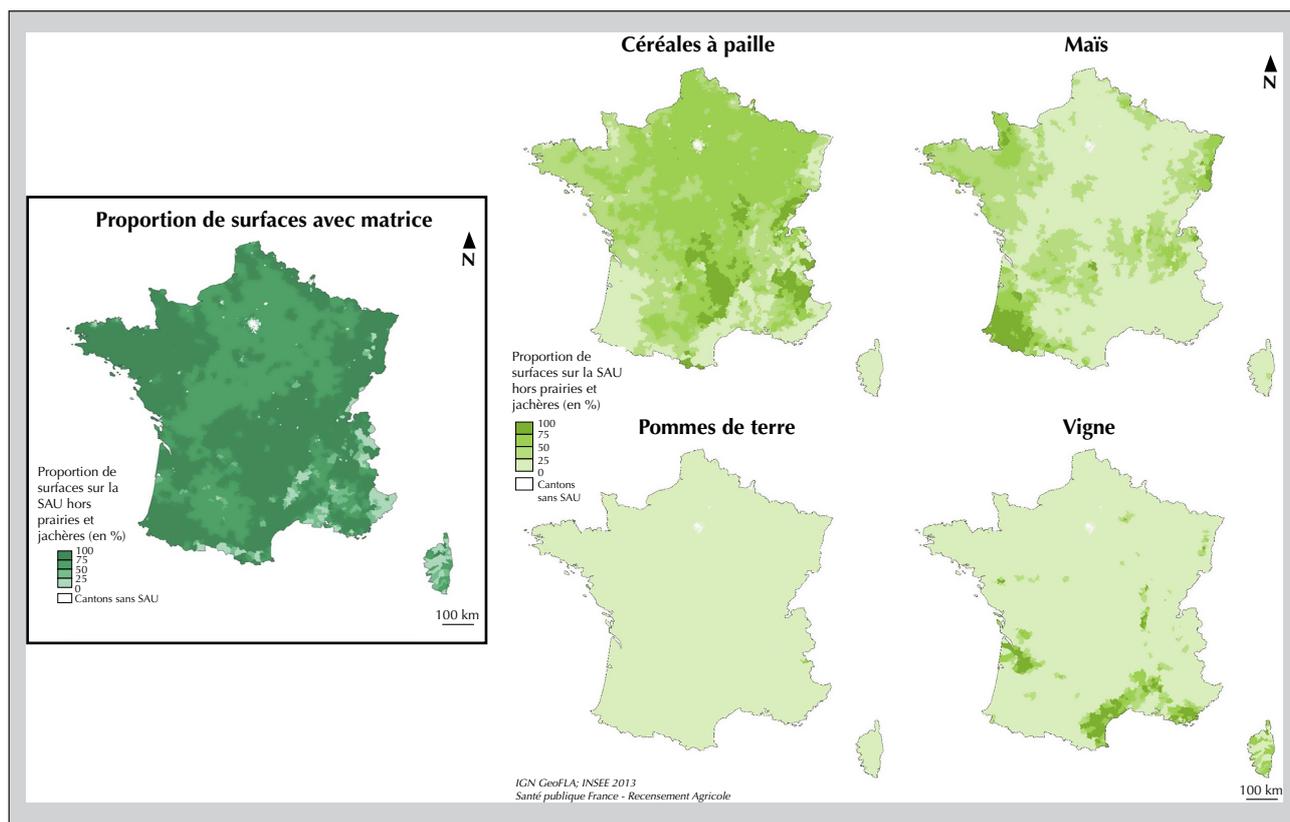
- la proportion de surfaces/exploitations exposées au pesticide ;
- le nombre moyen de traitements annuels ;
- la quantité moyenne épanchée par hectare pour les SA qui disposaient de l'intensité dans les MCE.

Un quatrième indicateur a été calculé pour estimer l'exposition environnementale : la quantité totale de SA diffusée sur les cultures avec MCE.

Pour l'estimation de l'exposition environnementale, le calcul de la proportion de surfaces dédiées aux cultures avec MCE traitées à un pesticide est :

$$Pe_i^X = \frac{\sum_C (P_{C_i}^X \times S_{C_i})}{S_i}$$

Dans un canton  $i$  et une année donnée, pour chaque culture  $C$ , on calcule le produit de la probabilité de  $X$



**Figure 2.** Répartition géographique de chaque culture composée de matrice (à droite) et de l'ensemble de ces cultures (à gauche) : proportion de surface par rapport à la surface agricole utile hors prairies et jachères.

**Figure 2.** Spatial distribution of each crop composed of matrix (right) and of all these crops (left): proportion of the area on the total agricultural area excluding pastures and fallows.

(groupe, FC ou SA) issue de la MCE de cette culture,  $P_{C_i}^X$ , par la surface de la culture,  $S_{C_i}$ . Ces produits sont sommés, puis divisés par la surface totale des cultures disposant de MCE dans ce canton.

Pour l'estimation de l'exposition professionnelle, le calcul se fait en deux temps :

- une probabilité est calculée pour chaque type d'exploitations défini par la combinaison des cultures qui les composent car l'utilisation des pesticides peut dépendre des cultures présentes sur une exploitation ;
- ces probabilités sont pondérées par le nombre d'exploitations de chaque type, sommées et divisées par l'ensemble des exploitations ayant des cultures avec MCE.

Que X (groupe, FC ou SA) soit présent dans une ou l'ensemble des MCE, le dénominateur comprend toujours l'ensemble des surfaces des quatre cultures avec MCE (exposition environnementale) ou l'ensemble des exploitations ayant des cultures avec MCE (exposition professionnelle).

Les différents indicateurs ont été calculés pour les trois groupes de pesticides, 109 familles chimiques et 197 substances actives dans l'ensemble des cantons de France métropolitaine pour les quatre RA.

Dans la section indicateurs des résultats, seules seront présentées la proportion de surfaces dédiées aux cultures avec MCE traitées pour l'estimation de l'exposition environnementale, et la proportion d'exploitations composées de cultures avec MCE exposées pour l'estimation de l'exposition professionnelle pour les RA de 1979 et 2010.

### Choix des substances actives présentées

Le choix des SA s'est fait en excluant celles précédemment décrites dans le rapport méthodologique [13], selon quatre critères :

- classées cancérogène en catégorie 2 par l'Union européenne ou l'*US Environmental Protection Agency* (US-EPA) ;
- présentes sur les quatre RA ;

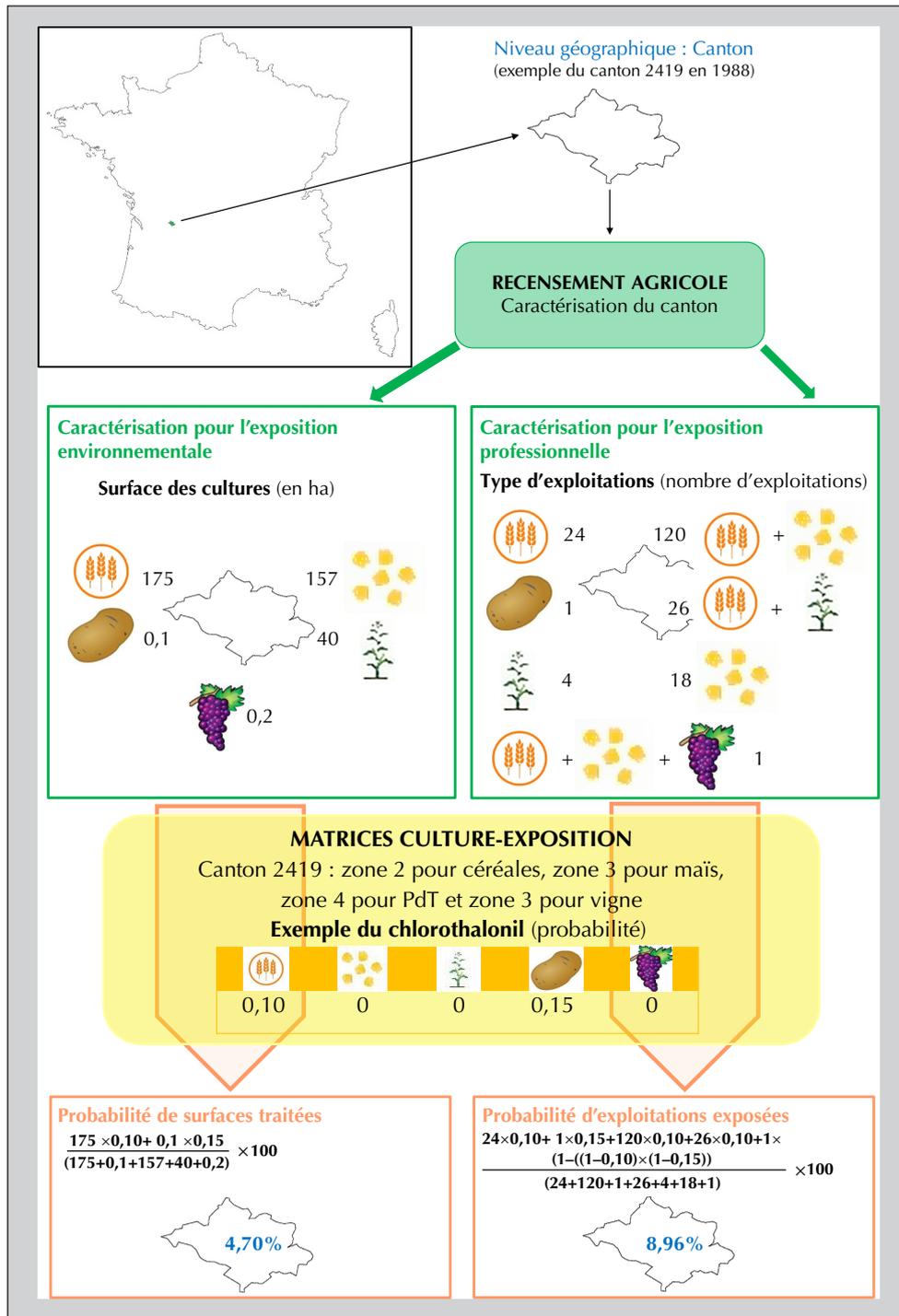


Figure 3. Méthodologie pour le calcul des indicateurs.

Figure 3. Methodology for the calculation of indices.

- médiane élevée de l'indicateur sur au moins un RA (parmi les cinq premières) ;
- intensité disponible dans les MCE.

Deux SA ont été retenues : le chlortoluron (FC des urées substituées) et le pyrimicarbe (FC des carbamates). La première a une action herbicide ; la deuxième une action insecticide.

Ces SA, utilisées depuis les années 1960, sont toujours autorisées. Elles apparaissent uniquement dans la MCE des céréales à paille.

## Comparaison avec les données de la BNV-D

Pour valider notre approche, la quantité totale calculée pour estimer l'exposition environnementale de 2010 a été comparée aux données d'achats de pesticides de la Banque nationale de vente des produits phytopharmaceutiques par les distributeurs (BNV-D) [15].

La BNV-D fournit, depuis 2014 de façon complète, les ventes de pesticides (par SA ou produit commercial) avec le code postal des acheteurs. Un code postal pouvant correspondre à plusieurs cantons, la comparaison des indicateurs a été réalisée au niveau départemental. De plus, afin de tenir compte des effets de stockage et déstockage ainsi que des variations dans les pressions de ravageurs, les données d'achats ont été moyennées sur deux années : 2014 et 2015.

## Statistiques

Les cartes ont été réalisées avec le package *cartography* (R version 4.1.3 ; R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche) en utilisant le référentiel géographique de l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee) de 2013.

Des corrélations de Spearman ont été calculées pour comparer la distribution géographique des quantités en kg achetées (BNV-D) *versus* utilisées (indicateur MCE/RA 2010) [16]. Pour évaluer si les écarts entre départements sont similaires dans les deux indicateurs, un z-score a été calculé [(valeur - moyenne) / écart-type] et cartographié.

L'autocorrélation spatiale a été calculée à l'aide de l'indice de Moran pour chaque SA [17, 18]. L'indice de Moran permet de déterminer si les valeurs des entités spatiales proches sont plus semblables que les valeurs d'entités lointaines. L'indice de Moran a des valeurs comprises entre -1 (dispersion parfaite, corrélation négative) et 1 (corrélation parfaite). Une valeur nulle signifie l'absence de corrélation et donc que la distribution spatiale de la variable étudiée est parfaitement aléatoire dans le territoire. L'autocorrélation spatiale a d'abord été calculée dans un rayon de 15 km puis à des distances plus éloignées par « pas » de 15 km. Ce seuil permet d'avoir un nombre similaire de cantons aux différentes distances.

## Résultats

### Indicateurs : estimation de l'exposition liée à l'utilisation agricole des pesticides au niveau géographique

#### Estimation de l'exposition environnementale

La *figure 4* représente la répartition géographique de la proportion de surfaces dédiées aux cultures avec MCE traitées par les deux substances actives.

##### *Le chlortoluron, action herbicide*

La proportion de surfaces traitées diminue au cours des années. En 1979, la proportion est élevée sur le territoire (> 21 %), exceptés dans la zone méditerranéenne et le Sud-Ouest. Les régions de Normandie et de Bretagne sont plus hétérogènes. En 2010, les zones où la proportion est la plus élevée (entre 10 et 15 %) concernent une zone entourant l'Île-de-France, l'Auvergne et les Alpes du Sud.

##### *Le pyrimicarbe, action insecticide*

Une distinction Nord/Sud est observée sur les deux recensements agricoles. En 1979, la proportion est plus forte dans le Nord, en particulier le Centre, l'Est et une bande allant jusqu'à la Charente-Maritime.

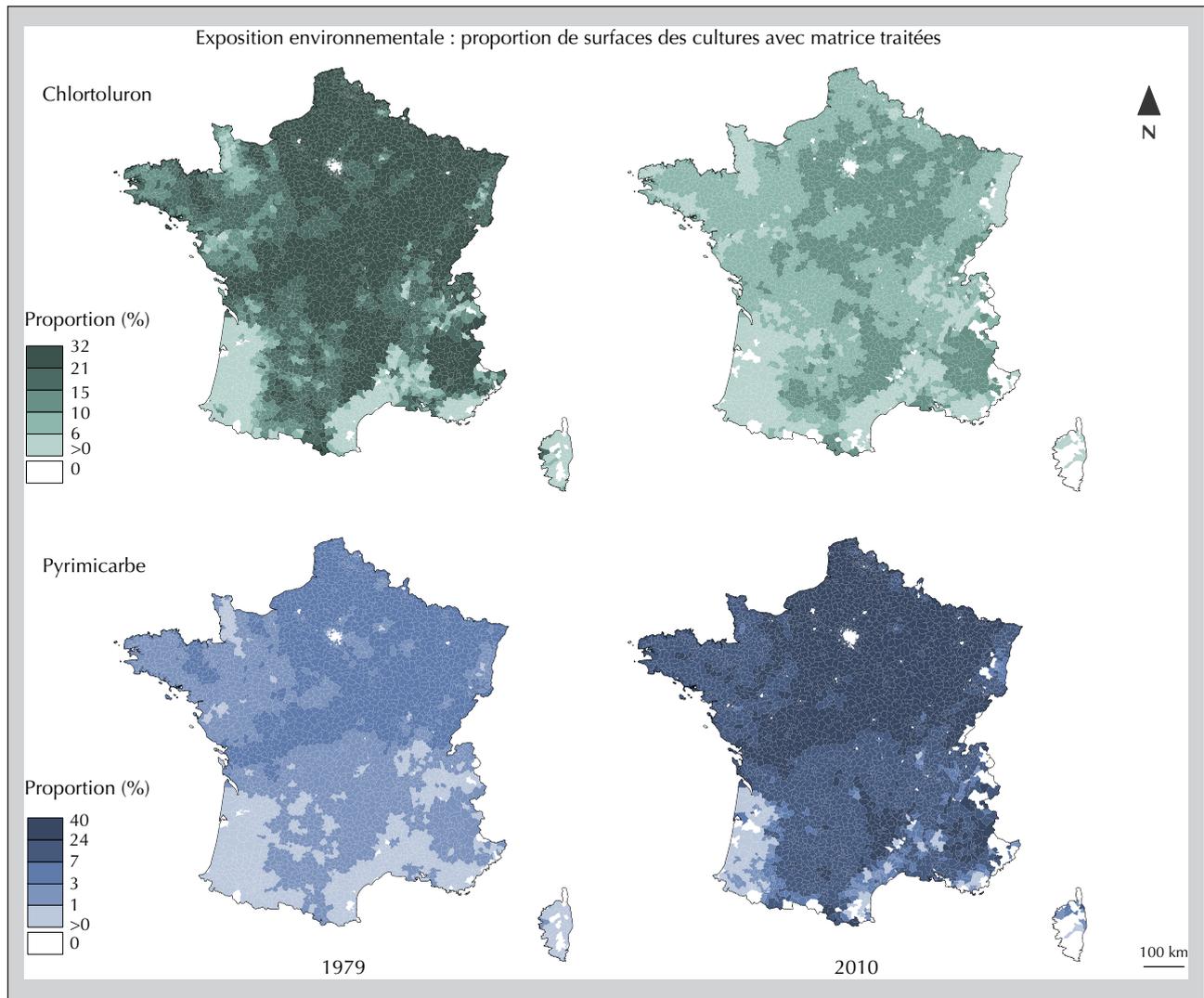
En 2010, la proportion augmente en général, exceptés dans la zone méditerranéenne et le Sud-Ouest. Les régions où la proportion est la plus élevée (> 24%) sont le Nord (Centre et Ouest), ainsi que quelques zones éparses dans le Sud (départements de Lozère, du Cantal et de l'Aveyron).

#### Estimation de l'exposition professionnelle

La *figure 5* représente la répartition géographique de la proportion d'exploitations composées de culture avec MCE exposées à ces deux substances actives. Par comparaison à l'estimation de l'exposition environnementale, l'estimation de l'exposition professionnelle a des valeurs plus élevées.

##### *Le chlortoluron, action herbicide*

Comme pour l'estimation de l'exposition environnementale, la proportion d'exploitations exposées diminue au cours du temps. Cependant, la répartition géographique est quelque peu différente, à l'exception de la proportion la plus faible qui concerne toujours la Corse, la côte méditerranéenne et la partie sud-ouest (Gironde, Landes, Pyrénées Atlantiques). En 1979, le Nord a une proportion plus élevée que le Sud (en moyenne, 30 % *versus* 23 %). En 2010, la disparité Nord/Sud est moins visible (diminution sur le Nord-Ouest, augmentation sur certaines zones du Sud) et les zones les plus exposées sont moins nombreuses. La majorité du territoire a une



**Figure 4.** Répartition géographique de la proportion de surfaces des cultures avec matrice traitées au chlortoluron (en haut) et au pyrimicarbe (en bas) pour les années 1979 et 2010 à partir des recensements agricoles (exposition environnementale).

**Figure 4.** Spatial distribution of the proportion of crops area with matrix sprayed with chlortoluron (top) and pyrimicarb (bottom) for the years 1979 and 2010 based on agricultural censuses (environmental exposure).

proportion d'exploitations utilisant du chlortoluron pour les cultures avec matrice évoluant entre 3 et 13 %.

#### *Le pyrimicarbe, action insecticide*

L'estimation de l'exposition professionnelle est très proche de l'estimation de l'exposition environnementale, excepté en 2010 où la bande allant jusqu'à la Charente-Maritime et la Vendée est plus large, et la Bretagne et les Pays-de-la-Loire ont la proportion la plus élevée.

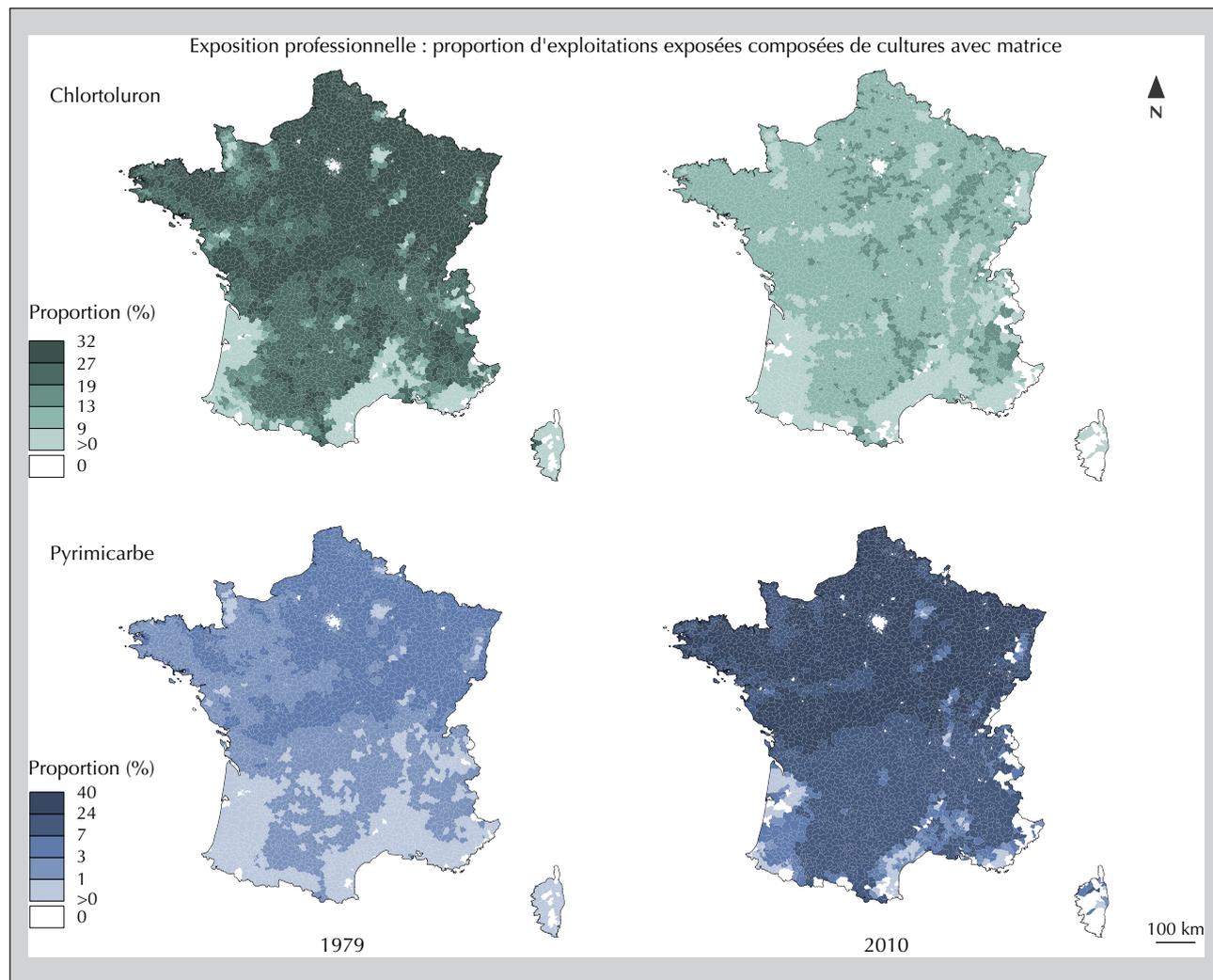
La proportion d'exploitations utilisant du pyrimicarbe pour les cultures avec matrice augmente au cours du temps, et la répartition géographique est très proche, avec une distinction Nord/Sud. En 1979, les zones où la

proportion est la plus faible concernent la Corse, la côte méditerranéenne qui inclue ici l'Ardèche, le Sud-Ouest et les départements de la Manche, de la Savoie, de l'Isère et du Rhône. C'est le Nord qui a les valeurs les plus élevées, en particulier le Centre et l'Est (entre 3 et 7 %).

En 2010, le Centre-Nord et le Centre-Ouest ont les proportions les plus élevées (entre 34 et 40 %).

### Comparaison avec la BNV-D

Les quantités calculées selon notre quatrième indicateur d'exposition environnementale en 2010 ne prennent



**Figure 5.** Répartition géographique de la proportion d'exploitations composées de cultures avec matrice exposées au chlortoluron (en haut) et au pyrimicarbe (en bas) pour les années 1979 et 2010 à partir des recensements agricoles (exposition professionnelle).

**Figure 5.** Spatial distribution of the proportion of farms with crops with matrix sprayed with chlortoluron (top) and pyrimicarb (bottom) for the years 1979 and 2010 based on agricultural censuses (occupational exposure).

pas en compte toutes les cultures agricoles et diffèrent donc des quantités issues de la BNV-D.

La figure 6 présente la répartition géographique des quantités de chlortoluron, et la figure 7, celle du pyrimicarbe.

Pour la quantité en kg du chlortoluron, la répartition est assez proche entre notre indicateur et celui de la BNV-D :

- une différence Nord/Sud ;
- des quantités plus élevées dans le Gers (Sud-Ouest) et autour de l'Île-de-France jusqu'à la Charente-Maritime.

Des différences apparaissent en Bretagne et dans l'Aude au Sud.

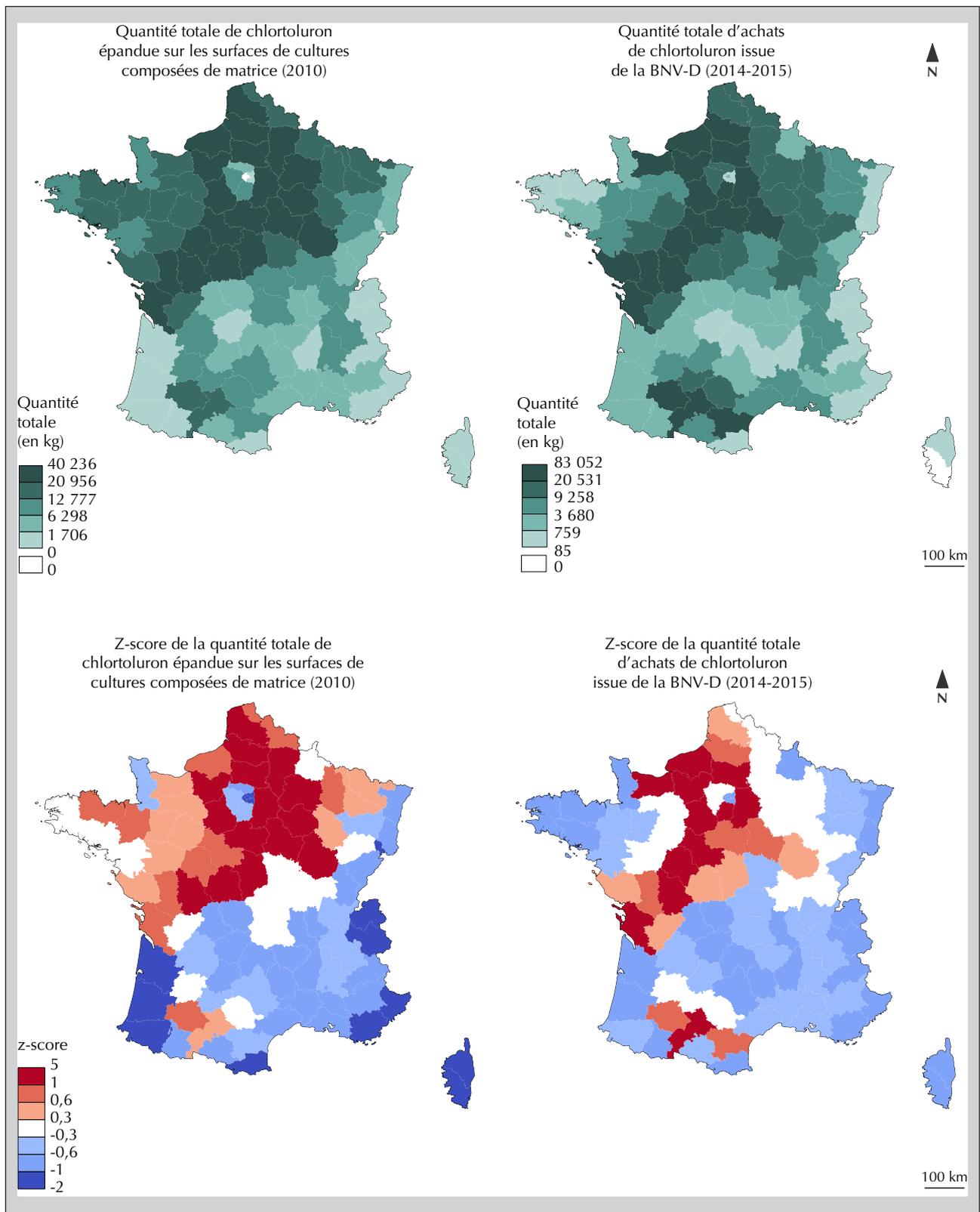
La corrélation de Spearman confirme une corrélation positive et élevée à 0,80.

La représentation géographique des z-scores confirme la similitude des deux indicateurs, même si l'Aude à une valeur supérieure à la moyenne départementale pour la BNV-D, et que le Nord de la Bretagne et le Grand-Est ont des valeurs plus fortes pour notre indicateur d'exposition environnementale.

Pour la quantité en kg du pyrimicarbe, la répartition est assez proche :

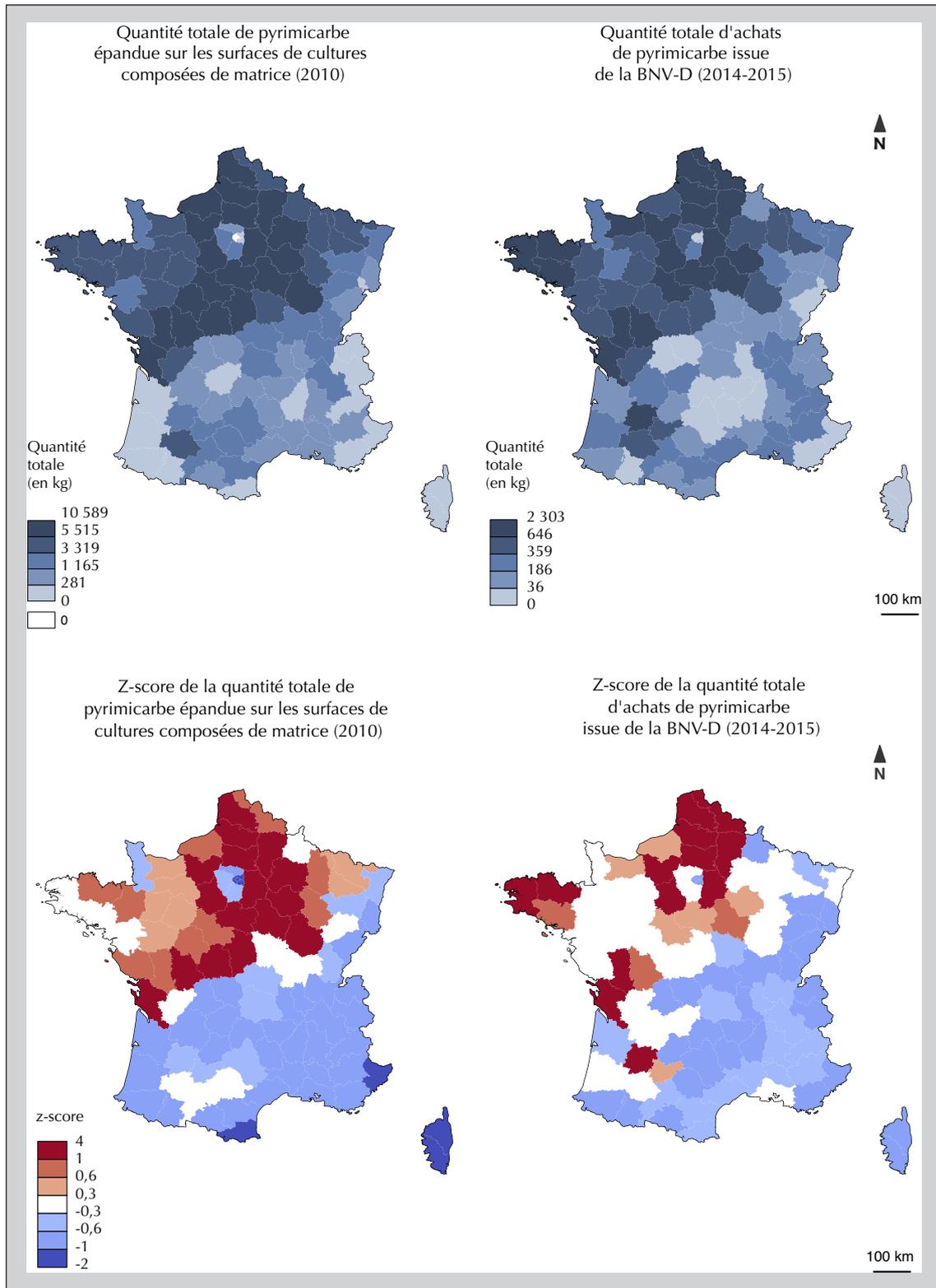
- une différence Nord/Sud ;
- des quantités plus élevées entourant l'Île-de-France et atteignant le département de la Charente-Maritime.

Quelques différences apparaissent : cette bande est moins apparente pour l'indicateur de la BNV-D, et dans des zones du Sud-Ouest.



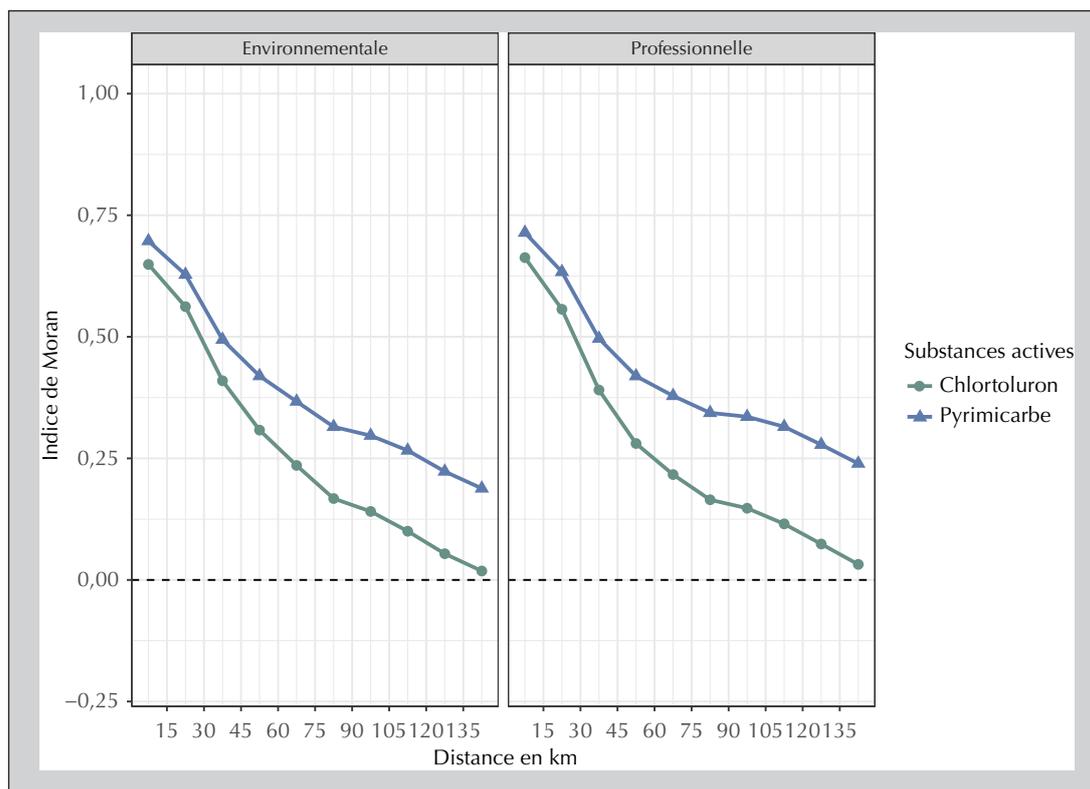
**Figure 6.** Comparaison entre les quantités de chlortoluron calculées à partir de notre méthodologie et à partir des achats de la Banque nationale de vente des produits phytopharmaceutiques par les distributeurs (BNV-D) : quantité totale (en kg) en haut et z-score [(valeur - moyenne) / écart-type] en bas.

**Figure 6.** Comparison between the quantities of chlortoluron calculated using our methodology and from BNV-D purchases: total quantity (kg) at the top and z-score [(value-mean)/standard deviation] at the bottom.



**Figure 7.** Comparaison entre les quantités de pyrimicarbe calculées à partir de notre méthodologie et à partir des achats de la Banque nationale de vente des produits phytopharmaceutiques par les distributeurs (BNV-D) : quantité totale (en kg) en haut et z-score [(valeur - moyenne) / écart-type] en bas.

**Figure 7.** Comparison between the quantities of pyrimicarb calculated using our methodology and from BNV-D purchases: total quantity (kg) at the top and z-score [(value-mean)/standard deviation] at the bottom.



**Figure 8.** Corrélogramme de l'indice de Moran (indice d'autocorrélation spatiale) entre les cantons distants de 0 et 150 km par « pas » de 15 km pour le chlortoluron et le pyrimicarbe en 2010 : proportion de surfaces des cultures avec matrice traitées (exposition environnementale) à gauche et proportion d'exploitations composées de cultures avec matrice exposées (exposition professionnelle) à droite.

**Figure 8.** Moran index correlogram (spatial autocorrelation index) between the cantons 0 and 150km apart by « step » of 15km for chlortoluron and pirimicarb in 2010: proportion of crops area with matrix sprayed (environmental exposure) on the left and the proportion of farms with crops with matrix sprayed (occupational exposure) on the right.

La corrélation de Spearman présente une corrélation positive très forte de l'ordre de 0,83.

La représentation géographique des z-scores confirme la similitude spatiale des deux indicateurs. Quelques différences existent : le Lot-et-Garonne, le Tarn-et-Garonne et la Bretagne ont des valeurs supérieures à la moyenne départementale pour la BNV-D, les Pays-de-la-Loire et le Grand-Est pour notre indicateur.

### Autocorrélation spatiale

La figure 8 présente les autocorrélations spatiales (indice de Moran) des indicateurs d'estimation des expositions environnementale et professionnelle de 2010 entre les cantons distants de 0 à 150 km par « pas » de 15 km. Leurs évolutions en fonction de la distance sont similaires pour les deux types d'exposition. L'indice de Moran est élevé entre les cantons les plus proches (> 0,5 pour moins de 15 km), puis sa valeur diminue lorsque la distance augmente.

L'évolution des autocorrélations spatiales diffère entre les deux pesticides. L'indice est plus élevé pour le pyrimicarbe. L'autocorrélation spatiale est inférieure à 0,2 dès 75 km pour le chlortoluron, mais au-delà de 130 km pour le pyrimicarbe.

## Discussion

Nous décrivons une application innovante des MCE. Dans les études précédentes, elles représentaient généralement un complément aux entretiens des participants. Notre approche permet de combiner les MCE aux données d'occupation des sols issues des RA pour définir des indicateurs spatialisés d'exposition environnementale et professionnelle aux pesticides sur l'ensemble de la France métropolitaine. L'estimation de l'exposition environnementale est déterminée par la proximité des cultures, approche classique des études épidémiologiques [19]. L'estimation de l'exposition professionnelle des travailleurs est approchée

au niveau de l'exploitation agricole et prend en compte les utilisations de pesticides sur l'ensemble des cultures présentes dans chaque exploitation.

Nous illustrons cette approche pour deux substances actives, mettant en évidence une évolution temporelle et des disparités spatiales. Le chlortoluron présente une proportion qui diminue avec le temps. En 2010, les zones les plus exposées concernent le Centre-Nord et quelques zones dans le Centre-Sud et au Sud-Est. Pour le pyrimicarbe, la proportion de surfaces ou d'exploitations exposées augmente au cours du temps, mais la répartition spatiale montre un gradient Nord-Sud qui perdure entre 1979 et 2010. Le Nord présente une proportion plus élevée, et les régions les moins exposées concernent le Sud-Ouest et la Corse. En 2010, le pyrimicarbe présente une autocorrélation spatiale plus élevée que le chlortoluron, signifiant une plus forte régionalisation de son utilisation se traduisant par une différence Nord/Sud. Ces deux substances actives sont présentes uniquement dans la MCE des céréales à paille. Cela démontre que la distribution spatiale de l'utilisation des substances actives ne dépend pas uniquement de celle des cultures, mais aussi de la régionalisation de leur utilisation (hétérogénéité des caractéristiques pédoclimatiques et socio-économiques entre régions). La MCE des céréales à paille est découpée en deux zones géographiques Nord/Sud. Alors que le chlortoluron a une utilisation similaire sur les deux zones (19 %), le pyrimicarbe a une utilisation plus forte dans le Nord (40 % *versus* 25 %). Cette différence se justifie car les traitements herbicides sont homogènes sur le territoire, contrairement aux insecticides utilisés plus intensément au Nord [20].

Les MCE et les questionnaires sont les mesures indirectes les plus utilisées, mais leur validité est hétérogène selon les études [7]. La validation de nos indicateurs est difficile en raison de l'absence de données exhaustives sur l'ensemble du territoire. La BNV-D est une des rares bases de données complètes. Notre indicateur ne prenant pas en compte toutes les cultures, la comparaison ne peut se faire sur la simple valeur des indicateurs, mais la représentation géographique, appuyée par le calcul des corrélations qui sont supérieures à 0,80, montre une ressemblance évidente bien que la comparaison ne porte pas exactement sur les mêmes années (2010 pour notre indicateur et 2014-2015 pour la BNV-D). Les différences concernant les valeurs réelles entre les deux indicateurs sont faibles pour le chlortoluron car son usage porte principalement sur les grandes cultures et il reste stable sur cette période. On peut cependant noter que les valeurs des premières catégories sont beaucoup plus faibles sur les données de la BNV-D. Cette différence s'explique par des restrictions et interdictions d'utilisation du chlortoluron apparues après 2010 (année de notre indicateur) pour les sols artificiellement drainés. Pour le pyrimicarbe, les valeurs sont très différentes car son usage diminue fortement en 2012 (baisse de 34 % observée dans la BNV-D). Bien que la quantité totale d'insecticides augmente d'après la BNV-D (2,2 millions de kg en 2010, 2,7 en

2012 et 3,2 en 2014), des disparités existent selon les pesticides. La baisse du pyrimicarbe n'est pas liée à une modification de la réglementation, mais à des substitutions. Notons par exemple, les fortes augmentations de certains pesticides de la famille des néonicotinoïdes, comme le thiaméthoxame et l'imidaclopride, ou bien le chlorpyrifos-éthyl de la FC des organophosphorés.

La BNV-D possède des limites : parmi les acheteurs se trouvent les collectivités, entreprises et particuliers ; le code postal de l'acheteur n'est pas forcément celui des parcelles agricoles ; la culture sur laquelle le pesticide sera utilisé n'est pas renseignée.

Malgré ces limites, la BNV-D est une source d'informations cruciales et directes, non soumise aux erreurs de rappel, et prenant en compte toutes les substances actives.

La ressemblance de nos indicateurs avec les données de la BNV-D représente un argument fort en faveur de la validité des MCE du programme Matphyto et de nos indicateurs.

Plusieurs limites sont présentes sur les MCE et les indicateurs :

- les MCE décrivent les estimations des expositions d'une exploitation, et non les caractéristiques individuelles des travailleurs agricoles (tâches, ré-entrée, etc.). Ces données peuvent être recueillies dans des études *ad-hoc* ;
- en métropole, les MCE de quatre cultures sont disponibles représentant 75 % de la SAU hors prairies et jachères. L'exposition est donc sous-estimée. Deux MCE sont en cours d'élaboration : une sur la culture de la betterave sucrière et une spécifique au glyphosate ;
- le niveau géographique le plus fin possible pour limiter des erreurs de classement des surfaces est le canton ;
- les indicateurs décrivent l'utilisation des pesticides sur les cultures agricoles dans des unités géographiques et n'évaluent pas le niveau d'imprégnation des personnes y résidant.

Ce travail présente également des forces :

- les MCE décrivent, à partir de trois indicateurs, une liste de pesticides (trois groupes, sous-divisés en FC puis SA) utilisés depuis les années 1960 pour différentes cultures, et tiennent compte de leur évolution dans le temps et l'espace ;
- les MCE ont de nombreuses utilisations possibles : évaluation de l'exposition des travailleurs agricoles, aide pour les études portant sur des données individuelles, caractérisation des pesticides utilisés sur un buffer géographique à partir de l'adresse des participants (zone représentant une distance autour de l'adresse) ;
- deux approches ont été développées permettant de déterminer dans chaque zone géographique plusieurs indicateurs pour estimer les expositions environnementale et professionnelle ;
- cette méthodologie est évolutive et peut prendre en compte les nouvelles MCE ou les prochains recensements agricoles (2020).

## Conclusion

Cet article présente un exemple d'utilisation de MCE croisées avec les données d'occupation des sols issues des recensements agricoles. Cette méthode permet une description temporelle et géographique des estimations des expositions environnementale et professionnelle liées à l'utilisation agricole des pesticides sur l'ensemble du territoire métropolitain français. Elle permet d'identifier des zones géographiques où l'utilisation des pesticides est importante. La description de deux substances actives montre l'hétérogénéité temporelle et spatiale de leur utilisation. Ces approches peuvent être utilisées dans le cadre d'études écologiques en mesurant l'association entre ces

indicateurs et l'incidence de diverses maladies. De plus, le fait que l'exposition soit décrite sur un grand nombre d'années permet de calculer des expositions cumulées et de prendre en compte un temps de latence long entre l'exposition et la survenue de maladies comme les cancers ou les maladies neurodégénératives. Enfin, la comparaison avec les données de la BNV-D apporte des arguments en faveur de la validité des indicateurs définis à partir des MCE. ■

## Remerciements et autres mentions

**Liens d'intérêts :** les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

## Références

1. Inserm Collective Expertise Centre. *Effects of pesticides on health: new data*. Inserm, 2022.
2. Fucic A, Duca RC, Galea KS, et al. Reproductive health risks associated with occupational and environmental exposure to pesticides. *Int J Environ Res Public Health* 2021 ; 18 : 6576.
3. Gangemi S, Miozzi E, Teodoro M, et al. Occupational exposure to pesticides as a possible risk factor for the development of chronic diseases in humans (Review). *Mol Med Rep* 2016 ; 14 : 4475-88.
4. Pedrosa TMA, Benvindo-Souza M, de Araujo Nascimento F, Woch J, Dos Reis FG, de Melo ESD. Cancer and occupational exposure to pesticides: a bibliometric study of the past 10 years. *Environ Sci Pollut Res Int* 2022 ; 29 : 17464-75.
5. Vellingiri B, Chandrasekhar M, Sri Sabari S, et al. Neurotoxicity of pesticides - A link to neurodegeneration. *Ecotoxicol Environ Saf* 2022 ; 243 : 113972.
6. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. *Infographie - Palmarès des produits agricoles et agroalimentaires français*. 2021. <https://agriculture.gouv.fr/infographie-palmares-des-produits-agricoles-et-agroalimentaires-francais>
7. Ohlander J, Fuhrmann S, Basinas I, et al. Systematic review of methods used to assess exposure to pesticides in occupational epidemiology studies, 1993-2017. *Occup Environ Med* 2020 ; 77 : 357-67.
8. Nanni O, Ricci M, Lugaresi C, Amadori D, Falcini F, Buiatti E. Iterative use of a priori exposure matrices to improve the characterization of chemical exposures in agricultural work studies. *Scand J Work Environ Health* 1993 ; 19 : 191-9.
9. Semple SE, Dick F, Cherrie JW. Exposure assessment for a population-based case-control study combining a job-exposure matrix with interview data. *Scand J Work Environ Health* 2004 ; 30 : 241-8.
10. Spinosi J, Févotte J. *Le programme Matphyto : Matrices cultures-expositions aux produits phytosanitaires*. Santé publique France, 2008. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/pesticides/documents/rapport-synthese/le-programme-matphyto.-matrices-cultures-expositions-aux-produits-phytosanitaires>
11. Agreste. *A propos des recensements agricoles et enquêtes structures des exploitations*. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2014. <http://46.29.123.56/enquetes/structure-des-exploitations-964/a-propos-des-recensements>
12. EUROSTAT E. *The use of plant protection products in the European Union. Data 1992-2003*. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2007.
13. Perrin L, Moisan F, Spinosi J, Chaperon L, Jezewski-Serra D, Elbaz A. *Définition d'indicateurs géographiques d'exposition liée à l'utilisation des pesticides à partir des matrices culture-exposition Matphyto et du recensement agricole*. In press.
14. Perrin L, Moisan F, Spinosi J, Chaperon L, Jezewski-Serra D, Elbaz A. Combining crop-exposure matrices and land use data to estimate indices of environmental and occupational exposure to pesticides. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2023. Doi : 10.1038/s41370-023-00562-w
15. Eau France, BNVD traçabilité. *Données sur les ventes de produits phytopharmaceutiques*. <https://ventes-produits-phytopharmaceutiques.eaufrance.fr>
16. Schober P, Boer C, Schwarte LA. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesth Anal* 2018 ; 126 : 1763-8.
17. Moran PA. A test for the serial independence of residuals. *Biometrika* 1950 ; 37 : 178-81.
18. Upton JG, Fingleton B. *Spatial data analysis by example*. New York : John Wiley & Sons, 1985.
19. Teyssie R, Manangama G, Baldi I, et al. Assessment of residential exposures to agricultural pesticides: a scoping review. *PLoS One* 2020 ; 15 : e0232258.
20. Agreste. *Enquête Pratiques culturales 2011 - Les traitements phytosanitaires sur les grandes cultures : indicateurs de fréquence de traitement*. Agreste, 2013. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos18/Dos18.pdf>