

Inserm

La science pour la santé
From science to health



SANTÉ
ENVIRONNEMENT
TRAVAIL

DÉCEMBRE 2023

MÉTHODE

DÉFINITION D'INDICATEURS GÉOGRAPHIQUES D'EXPOSITION LIÉE À L'UTILISATION DES PESTICIDES À PARTIR DES MATRICES CULTURE-EXPOSITION MATPHYTO ET DU RECENSEMENT AGRICOLE

Projet Pestneuro



Résumé

Définition d'indicateurs géographiques d'exposition liée à l'utilisation des pesticides à partir des matrices culture-exposition Matphyto et du recensement agricole

Projet Pestneuro

Les effets de l'exposition aux pesticides sur la santé humaine ont été mis en évidence par de nombreuses études épidémiologiques. Ces études sont cependant confrontées à des difficultés pour déterminer les pesticides associés aux pathologies en raison de la multitude de produits disponibles et de difficulté de rappel des personnes interrogées. Afin d'identifier les pesticides auxquels sont exposées les populations, une méthode reposant sur le croisement de matrices culture-exposition (MCE) et du recensement agricole (RA) est présentée dans ce rapport.

Deux approches ont permis de définir des indicateurs d'exposition aux pesticides, liée à leur utilisation agricole, au niveau cantonal pour décrire : (i) d'une part l'exposition environnementale qui concerne la population générale, et (ii) d'autre part l'exposition des travailleurs. Les MCE disponibles décrivent de façon historisée et géographique l'exposition aux sous-groupes de pesticides (fongicides, herbicides, insecticides), familles chimiques et substances actives de quatre cultures (céréales à paille, maïs, pommes de terre, vigne) couvrant 75 % des surfaces agricoles (hors prairies et jachères). Elles ont été combinées avec les données du RA qui décrit les exploitations agricoles de France métropolitaine. L'exposition environnementale a été déterminée à partir des surfaces agricoles des cantons et l'exposition professionnelle à partir des cultures cultivées et de leur combinaison dans les exploitations du canton. Les indicateurs définis pour chacune des expositions sont : la probabilité d'exposition, le nombre moyen de traitements annuels et la quantité diffusée. Ils sont calculés pour les 3 sous-groupes de pesticides, 109 familles chimiques et 197 substances actives pour chaque année de 1979 à 2010, et pour chaque canton de France métropolitaine (N = 3 689). Les résultats pour la famille chimique des aryloxy-acides (herbicide) et pour la substance active 2,4-D sont présentés pour illustration. Ils montrent une évolution au cours du temps et une répartition hétérogène dans le territoire.

Cette méthode, utilisant des données de référence, déterminée par des experts, a été appliquée à l'ensemble de la France métropolitaine sur une période de trente-deux ans. Elle peut être utilisée dans les études épidémiologiques en mettant en évidence des zones géographiques plus ou moins exposées à certains pesticides, et en étudiant l'association écologique des indicateurs avec l'incidence de maladies.

MOTS-CLÉS : PESTICIDES, EXPOSITION, CULTURES, MATRICES

Citation suggérée : 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. Projet Pestneuro. Saint-Maurice : Santé publique France, 2023. 83 p. Disponible à partir de l'URL : <https://www.santepubliquefrance.fr>

ISSN : 2647-4816 - ISBN-NET : 979-10-289-0885-0 - RÉALISÉ PAR LA DIRECTION DE LA COMMUNICATION, SANTÉ PUBLIQUE FRANCE - DÉPÔT LÉGAL : DÉCEMBRE 2023

Abstract

Definition of geographical indicators of exposure linked to the use of pesticides based on Matphyto crop-exposure matrices and the agricultural census

Pestneuro Project

The effects of pesticides exposure on human health have been demonstrated in numerous epidemiological studies. However, these studies face difficulties in determining the pesticides associated with health outcomes due to the multitude of products available and difficulties in recall of respondents. In order to identify the pesticides to which populations are exposed, a method based on the linkage of crop-exposure matrices (CEM) and agricultural census (AC) is presented in this report.

Two approaches were used to define pesticide exposure indicators, linked to their agricultural use, at the canton level in order to describe both environmental exposure, which concerns the general population, and occupational exposure of workers. The available CEMs describe at the historical and geographical levels the exposure to pesticide subgroups (fungicides, herbicides, insecticides), chemical families, and active substances for four crops (straw cereals, corn, potatoes, vineyards) covering 75 % of agricultural areas (excluding grassland and fallow land). They were combined with data from the AC which describes agricultural farms in metropolitan France. Environmental exposure was determined on the basis of the agricultural areas of the cantons and occupational exposure on the basis of the crops grown and their combination in the farms of the canton. The indicators defined for each of the exposures are the probability of exposure, the average number of annual treatments and the quantity released. This methodology allowed to calculate the indicators for the three subgroups of pesticides, 109 chemical families and 197 active substances for each year from 1979 to 2010, and for each canton in metropolitan France (n = 3,689). The results for the chemical family of aryloxy acids (herbicide) and for the active substance 2,4-D are presented for illustration. They show an evolution over time and a heterogeneous distribution in the territory.

This method, using reference data determined by experts, was applied to the whole of metropolitan France over a period of 32 years. It can be used in epidemiological studies by highlighting geographical areas that are more or less exposed to certain pesticides, and by examining ecological associations of the indicators with disease incidence.

KEY WORDS: PESTICIDES, EXPOSURE, CROPS, MATRICES

Auteurs

Laëtitia Perrin

Centre de Recherche en Épidémiologie et Santé des Populations, Inserm U1018, Villejuif, France

Frédéric Moisan

Santé publique France, Direction Santé Environnement Travail, Saint-Maurice, France

Johan Spinosi

Santé publique France, Direction Santé Environnement Travail, Saint-Maurice, France

Laura Chaperon

Santé publique France, Direction Santé Environnement Travail, Saint-Maurice, France

Delphine Jezewski-Serra

Santé publique France, Direction Appui, Traitements et Analyses des données, Saint-Maurice, France

Alexis Elbaz

Centre de Recherche en Épidémiologie et Santé des Populations, Inserm U1018, Villejuif, France

Remerciements

Nous remercions Mounia El Yamani pour sa contribution dans la constitution de ce projet.

Nous remercions également Éléonore Breuillard et Béatrice Geoffrey-Perez pour leur réflexion sur le croisement des matrices et la population agricole qui a servi de base de réflexion pour notre méthodologie.

Contribution

L'accès à certaines données utilisées dans le cadre de ce travail a été réalisé au sein d'environnements sécurisés du Centre d'accès sécurisé aux données – CASD (Réf. 10.34724/CASD).

Financement

Ce projet a été financé par l'Office français de la biodiversité (OFB) dans le cadre du plan Écophyto II, action pilotée par le ministère chargé de l'Agriculture.



Abréviations

| | |
|--------------|--|
| CASD | Centre d'accès sécurisé aux données |
| DROM | Départements et régions d'outre-mer |
| GEE | Équation d'estimation généralisée (Generalized estimating equations) |
| g/ha | Grammes par hectare |
| Insee | Institut national de la statistique et des études économiques |
| MCE | Matrice culture-exposition |
| Otex | Orientation technico-économique |
| PBS | Production brute standard |
| RA | Recensement agricole |
| SAU | Superficie agricole utilisée |
| UTA | Unité de travail annuel |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCTION | 6 |
| 2. OBJECTIF | 7 |
| 3. DONNÉES | 8 |
| 3.1. Sources de données..... | 8 |
| 3.1.1. Matrices culture-exposition : le programme Matphyto | 8 |
| 3.1.2. Recensement agricole | 8 |
| 3.2. Définition des exploitations professionnelles..... | 9 |
| 3.2.1. Viticulture..... | 9 |
| 3.2.2. Pommes de terre | 10 |
| 3.3. Harmonisation du découpage communal entre les recensements | 12 |
| 3.4. Interpolation des années entre les recensements..... | 12 |
| 4. MÉTHODES | 13 |
| 4.1. Choix du niveau géographique pour la définition des indicateurs..... | 13 |
| 4.2. Indicateurs géographiques d'exposition environnementale liée à l'utilisation de pesticides..... | 13 |
| 4.3. Indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides | 14 |
| 4.3.1. Types d'exploitation | 15 |
| 4.3.2. Calcul des indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides pour les exploitations | 18 |
| 4.3.3. Calcul des indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides pour les travailleurs agricoles..... | 21 |
| 4.4. Cartographie..... | 21 |
| 5. RÉSULTATS | 22 |
| 5.1. Surface des cultures avec matrice | 22 |
| 5.2. Description de l'exposition environnementale aux pesticides..... | 26 |
| 5.2.1. Grands groupes de pesticides | 26 |
| 5.2.2. Famille chimique des aryloxy-acides et sa substance active 2,4-D..... | 33 |
| 5.3. Description de l'exposition professionnelle aux pesticides | 42 |
| 5.3.1. Grands groupes de pesticides | 42 |
| 5.3.2. Famille chimique des aryloxy-acides et sa substance active 2,4-D..... | 51 |
| 6. DISCUSSION | 61 |
| 7. CONCLUSION | 65 |
| Références bibliographiques | 66 |
| ANNEXES | 68 |
| Annexe 1. Données complémentaires | 68 |
| Annexe 2. Méthodologie complémentaire - Indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides | 69 |
| Annexe 3. Résultats complémentaires | 75 |

1. INTRODUCTION

Les produits phytopharmaceutiques sont largement utilisés dans la production agricole pour protéger les cultures. Dans la suite du document, le terme « pesticides », bien qu'il ait une définition générale plus large, sera utilisé à la place de « produits phytosanitaires » pour simplifier la lecture. Il se rapportera donc ici uniquement aux produits phytosanitaires. En 2018, 85 876 tonnes de substances actives ont été utilisées [1]. Des études suggèrent que l'exposition aux pesticides, aussi bien professionnelle qu'environnementale, pourrait représenter un facteur de risque de pathologies telles que les cancers ou les maladies neurodégénératives [2-6]. L'exposition aux pesticides est un enjeu important de santé publique en France car elle est le premier pays agricole de l'Union européenne en termes de surface agricole (29 millions d'hectares) et de production végétale (43 milliards d'euros) [7], et le huitième pays utilisateur de pesticides en 2018 [8]. Il est cependant difficile de déterminer le lien entre un pesticide particulier, ou une famille de pesticides, et la survenue des pathologies en raison de la grande diversité des produits. En effet, environ 13 500 produits commerciaux ont été disponibles depuis les années 1950 ; aujourd'hui, environ 3 000 produits commerciaux sont encore autorisés, ce qui représente environ 300 substances actives appartenant à plus de 100 familles chimiques [9]. Cette difficulté est accentuée par le fait qu'un produit commercial peut contenir plusieurs substances actives et que ces produits commerciaux peuvent être utilisés en association. Une autre difficulté pour étudier la relation entre les pesticides et les pathologies est liée aux méthodes d'évaluation de l'exposition. Les questionnaires sont majoritaires dans les études épidémiologiques. Or, les difficultés de rappel sont une source d'erreur non négligeable. Il est en effet difficile pour les personnes interrogées de se rappeler du nom des produits commerciaux utilisés, en raison de leur diversité au cours d'une carrière professionnelle et de la longue durée d'exposition ; de plus, pour les maladies neurodégénératives, un déclin cognitif peut être présent ce qui rend plus difficile encore le rappel. De ces limites est née la nécessité d'utiliser d'autres méthodes d'évaluation de l'exposition aux pesticides pour tenter de déterminer quels produits ou familles de produits pourraient être associés au développement de pathologies chroniques. Les matrices culture-exposition ont été développées pour répondre à ces limites. Leur avantage principal est la prise en compte de l'ensemble des produits utilisés au cours du temps, détaillés par familles chimiques et substances actives. Pour chaque type de culture, est décrite historiquement et géographiquement l'utilisation des pesticides. Elles permettent donc de répondre à ces deux limites que sont le biais de rappel et la prise en compte des nombreux produits.

2. OBJECTIF

L'objectif de ce document est de proposer une méthode permettant de définir des indicateurs géographiques d'exposition environnementale et professionnelle aux différents pesticides utilisés en agriculture en France métropolitaine à partir du croisement des matrices culture-exposition du programme Matphyto de Santé publique France et des données du recensement agricole du ministère chargé de l'Agriculture.

Le terme d'indicateur d'exposition est entendu dans ce document comme une métrique permettant de caractériser et classer le plus correctement possible des unités géographiques selon leurs utilisations de pesticides sur les cultures agricoles une année donnée. La démarche présentée ne repose pas sur des données individuelles issues de mesures biologiques ou environnementales, elle ne tient pas non plus compte de la rémanence des produits dans le sol, mais elle cherche à décrire, sur l'ensemble de la France métropolitaine, l'exposition des individus (habitants, travailleurs) à partir de leur territoire de vie en utilisant les données actuellement disponibles.

Les expositions environnementale et professionnelle sont différentes et nécessitent des approches distinctes. Dans ce rapport, comme dans de nombreuses études épidémiologiques, on considère l'exposition environnementale liée à la proximité résidentielle [10]. Les personnes habitant près de surfaces cultivées seront exposées aux substances utilisées sur ces cultures, par exemple par voie aérienne. La prise en compte de ces expositions passe donc par la caractérisation des différentes cultures agricoles sur le territoire à un niveau géographique fin permis par le recensement, ici le canton. Quant à l'exposition professionnelle, il s'agira de déterminer les différentes combinaisons de cultures agricoles présentes sur les exploitations pour déterminer l'exposition.

Les indicateurs calculés sont la probabilité d'exposition et le nombre moyen de traitements annuels pour chaque groupe de pesticides, famille chimique et substance active ramenés au canton pour l'exposition environnementale et à une exploitation moyenne dans le canton pour l'exposition professionnelle.

Ces indicateurs d'exposition aux pesticides peuvent être utilisés, par exemple, pour décrire les caractéristiques spatio-temporelles de l'exposition en France ou dans des études écologiques s'ils sont mis en relation avec la fréquence d'une maladie dans la même unité géographique.

3. DONNÉES

3.1. Sources de données

3.1.1 Matrices culture-exposition : le programme Matphyto

Le programme Matphyto développe des matrices concernant l'usage professionnel des pesticides pour les cultures agricoles. Huit matrices sont actuellement disponibles. Elles concernent les céréales à paille, le maïs grain, le maïs fourrage, les vignes et les pommes de terre selon 4 types : pommes de terre de féculerie, plants de pommes de terre, pommes de terre de conservation et pommes de terre nouvelles. Ces cultures représentent à elles seules plus de 70 % de la quantité de pesticides utilisés en France [11].

Chaque matrice décrit l'utilisation des 3 grands groupes de pesticides (fongicides, herbicides et insecticides) déclinés par famille chimique, puis par substance active. Chaque matrice fournit la probabilité (proportion annuelle des exploitations utilisatrices) et la fréquence d'utilisation (nombre annuel de passages) des grands groupes de pesticides et des familles chimiques. Les substances ou familles chimiques dont la probabilité d'utilisation est inférieure à 5 % ne sont pas indiquées. À l'exception des matrices pommes de terre, les matrices fournissent également la probabilité et la fréquence d'utilisation des substances actives et, pour certaines substances, leur intensité d'utilisation (dosage en grammes par hectare). Ces indicateurs sont décrits par période et par zone géographique pour prendre en compte l'évolution des pesticides au cours du temps et les différentes pratiques agricoles liées aux caractéristiques pédoclimatiques régionales et aux différentes structures d'exploitation. La matrice céréales à paille comprend deux zones géographiques, les matrices maïs et pommes de terre quatre zones chacune et la matrice vigne neuf zones. Les matrices permettent de caractériser les expositions à partir des années 60. On recense dans ces matrices 118 familles chimiques et 210 substances actives.

3.1.2 Recensement agricole

Le ministère chargé de l'Agriculture réalise un recensement de l'ensemble des exploitations agricoles françaises environ tous les dix ans. Nous avons utilisé les données de quatre recensements agricoles : 1979, 1988, 2000 et 2010, accessibles via une plateforme sécurisée (CASD : Centre d'accès sécurisé aux données). Pour chaque exploitation, les données disponibles comprennent, entre autres, la surface de chaque type de culture (9 grands groupes de cultures déclinés en 72 cultures), le nombre de travailleurs agricoles et leurs caractéristiques. À ces informations s'ajoute la localisation de l'exploitation renseignée au niveau de la commune.

Parmi les travailleurs agricoles, nous disposons du nombre d'exploitants, d'aides familiaux, de salariés permanents par sexe [12]. Nous disposons également des unités de travail annuel (UTA) qui correspondent à la quantité de travail humain fourni sur chaque exploitation agricole sur l'année. Les UTA totaux se déclinent en UTA pour les exploitants, pour la main-d'œuvre familiale (exploitants compris) et pour les salariés permanents ou saisonniers. Cette dernière catégorie n'a pas été sélectionnée pour nos analyses car une même personne peut être comptabilisée plusieurs fois si elle travaille dans plusieurs exploitations et, l'information étant disponible au niveau des exploitations et non au niveau des individus, il est impossible de connaître les différentes exploitations dans lesquelles une personne a travaillé.

3.2 Définition des exploitations professionnelles

Les matrices culture-exposition Matphyto s'intéressent aux usages des pesticides dans les exploitations cultivant professionnellement leurs cultures. En effet, les pratiques phytosanitaires divergent fortement entre, d'une part, les exploitations tirant un revenu de leur travail d'une culture et d'autre part les exploitations cultivant cette culture à des fins personnelles. Les exploitations qui dégagent un revenu d'une culture utilisent, du fait de leur objectif de production, plus intensément les pesticides pour traiter leur culture. Pour croiser les données des matrices avec les données du recensement agricole, il est donc essentiel de distinguer les exploitations cultivant professionnellement ces cultures parmi l'ensemble des exploitations agricoles recensées et déclarant une surface de ces cultures non nulle.

Le recensement agricole renseigne quant à lui toutes les surfaces agricoles de chaque exploitation quelle que soit l'utilisation finale de la culture, personnelle ou professionnelle. Concernant les cultures de céréales et de maïs, l'ensemble des exploitations les cultivant sont considérées comme « professionnelles », et donc toutes les surfaces de ces cultures sont conservées pour le calcul des indicateurs. C'est différent pour la vigne et les pommes de terre, pour lesquelles il existe une dichotomie entre production destinée à la vente et production destinée à la consommation personnelle [12]. La culture de la vigne, par exemple, est présente au sein de nombreuses exploitations agricoles : d'une part dans les exploitations ayant un objectif de vente de produits issus de la vigne (vins, raisins frais, vignes porte-greffes, etc.) spécialisées ou non dans la viticulture, mais également dans des exploitations ayant une production destinée à la consommation personnelle. En effet, et en particulier dans les années anciennes (1960-1970-1980), de nombreux exploitants agricoles cultivaient quelques pieds de vigne pour une production de vin qui n'était pas destinée à la vente.

3.2.1 Viticulture

Pour la vigne, la distinction entre surfaces professionnelles et personnelles s'est faite en deux étapes :

1. Prise en compte de l'Orientation technico-économique (Otex) des exploitations. L'Otex est déterminée en fonction de la part des productions brutes standards (PBS) de chaque production végétale et animale d'une exploitation par rapport à sa PBS totale. Une exploitation dont la PBS de l'une de ses productions dépasse les deux tiers de la PBS totale est considérée comme spécialisée dans ladite production et classée dans l'Otex correspondante. Parmi les Otex, on distingue la « viticulture d'appellation » des « autres viticultures ». Si une exploitation était classée dans l'une de ces deux Otex, elle était considérée comme professionnelle ;
2. Cependant, toutes les surfaces de vignes professionnelles ne sont pas identifiées par ces Otex. En effet, des exploitations avec une autre production dominante peuvent aussi cultiver professionnellement de la vigne. Les quatre recensements disposant d'un questionnaire complémentaire spécifique à la viticulture, nous avons pris en compte les exploitations qui déclaraient commercialiser des produits issus de la vigne.

Toutes les autres exploitations déclarant une surface de vigne ont été considérées comme non professionnelles et leur surface viticole n'a pas été considérée dans le calcul des indicateurs d'exposition.

Une autre distinction concernant les exploitations viticoles a été faite en lien avec la définition de la matrice vigne. Seules les exploitations appartenant aux grands bassins viticoles ont été conservées. Les exploitations viticoles ne faisant pas partie de ces bassins ont été retirées du calcul des indicateurs d'exposition car leur utilisation de pesticides est inconnue.

Cette exclusion correspond à 5,7 % des exploitations et 2,8 % des surfaces en 1979 et à 3,5 % des exploitations et 2,2 % des surfaces en 2010.

Le Tableau 1 décrit les exploitations retenues pour le calcul des indicateurs d'exposition et celles qui ont été exclues ; ces dernières incluent à la fois des exploitations considérées comme non professionnelles et celles situées hors des bassins viticoles qui n'étaient pas documentées par la matrice. Nous observons que les exploitations exclues diminuent considérablement au cours du temps. La production viticole non professionnelle tend donc à diminuer. Concernant les exploitations prises en compte, leur nombre diminue fortement au cours du temps tandis que la surface cultivée correspondante diminue dans une moindre mesure. La diminution de ces surfaces, à partir de 2000, s'explique par l'apparition de friches viticoles, en conséquence de la crise économique subie par les vignobles français. La baisse du nombre d'exploitations, quant à elle, est un phénomène commun à l'ensemble des cultures.

3.2.2 Pommes de terre

Parmi les quatre types de pommes de terre, certaines sont cultivées uniquement de façon professionnelle. Il s'agit des pommes de terre de féculerie (destinées à l'industrie) et des plants de pommes de terre (production très encadrée et spécifique). Les exploitations déclarant cultiver ces deux types de pommes de terre dans le recensement ont toutes été conservées pour le calcul des indicateurs.

Quant aux pommes de terre de conservation et aux pommes de terre nouvelles, qui sont destinées à la consommation, il convient de distinguer les exploitations cultivant ces pommes de terre pour un usage professionnel et les autres. Contrairement à la viticulture, il n'existe pas d'Otex spécifique à la pomme de terre et une méthode spécifique a été développée pour faire la distinction entre les exploitations professionnelles et à usage personnel.

1. Les recensements de 1979 et 1988, mais pas ceux de 2000 et 2010, incluent une question sur la présence d'une récolteuse à pommes de terre dans l'exploitation. Nous avons observé que les exploitations déclarant une récolteuse avaient des surfaces dédiées à la pomme de terre beaucoup plus grandes (par exemple, pour les exploitations cultivant des pommes de terre de conservation en 1988, celles avec une récolteuse ont une surface moyenne de 492 ares contre 21 ares pour celles sans récolteuse). Cette observation nous conduit à faire l'hypothèse que les exploitations possédant une récolteuse cultivaient professionnellement la pomme de terre. Cependant, ce critère ne prend pas en compte toutes les exploitations professionnelles. Des exploitations cultivant professionnellement des pommes de terre peuvent ne pas disposer de ce matériel, qui peut d'ailleurs être emprunté à une autre exploitation. De plus, comme ce critère de récolteuse était absent dans les recensements suivants, une méthode a été développée pour permettre de déterminer les exploitations professionnelles sur ces recensements.
2. Nous avons considéré, comme exploitations professionnelles, toutes celles dont la surface de pommes de terre était supérieure ou égale à 250 ares. Cette valeur a été sélectionnée parce que moins de 4 % des exploitations sans récolteuse ont une surface supérieure ou égale à 250 ares ; de plus, elle correspond au maximum de la médiane des surfaces de pommes de terre dans les exploitations ayant une récolteuse de pommes de terre. Ce seuil permet de s'assurer que toutes les exploitations avec une surface supérieure cultivent professionnellement de la pomme de terre.
3. Pour les exploitations avec une surface de cultures de pommes de terre inférieure à 250 ares, un modèle logistique de type équations d'estimation généralisées (GEE,

Generalized estimating equations) a été utilisé pour déterminer le seuil de surface de pommes de terre permettant de classer une exploitation comme professionnelle. Dans ce modèle, les exploitations du même canton ont été considérées comme appartenant au même groupe. La variable dépendante était la présence d'une récolteuse et les variables explicatives étaient la surface de pommes de terre, la proportion de cette surface par rapport à l'ensemble de la surface agricole utilisée (SAU ; c'est-à-dire les surfaces allouées à l'activité agricole) de l'exploitation et le temps (recensement de 1979 et 1988). Ce calcul a été réalisé sur les deux types de pommes de terre pour chacune des quatre zones de la matrice. L'index de Youden, défini par le modèle logistique, a été utilisé pour déterminer le seuil optimum pour maximiser la sensibilité et la spécificité du modèle (Tableau S1 de l'annexe 1). Les coefficients du modèle de régression ont été ensuite attribués aux recensements suivants. Ils ont permis de calculer la probabilité d'avoir une récolteuse. Les exploitations considérées comme professionnelles étaient celles dont la probabilité était égale ou supérieure au seuil déterminé préalablement par le modèle logistique (Tableau 1).

Pour les pommes de terre de conservation, bien que le nombre d'exploitations professionnelles diminue fortement au cours du temps, les surfaces de pommes de terre des exploitations professionnelles restent stables, en raison de la professionnalisation et de l'augmentation de la taille des exploitations. Pour les pommes de terre nouvelles, le nombre d'exploitations professionnelles et leur surface diminuent fortement tous les deux.

Tableau 1. Répartition par année de recensement du nombre d'exploitations, professionnelles ou non, et des surfaces correspondantes pour les vignes et pommes de terre

| Cultures /année | Exploitations professionnelles | | Exploitations non professionnelles | |
|--|--------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| | N (%) | Surfaces (ha, %) | N (%) | Surfaces (ha, %) |
| Vignes | | | | |
| 1979 | 218 637 (50,9) | 996 064 (91,2) | 211 051 (49,1) | 96 646 (8,8) |
| 1988 | 160 656 (59,0) | 900 317 (94,6) | 111 733 (41,0) | 51 240 (5,4) |
| 2000 | 108 024 (75,0) | 857 524 (96,7) | 35 939 (25,0) | 29 685 (3,3) |
| 2010 | 75 300 (86,2) | 763 881 (96,9) | 12 036 (13,8) | 24 752 (3,1) |
| Pommes de terre de conservation | | | | |
| 1979 | 119 721 (27,5) | 118 003 (79,2) | 315 108 (72,5) | 31 083 (20,8) |
| 1988 | 33 174 (37,5) | 80 224 (92,8) | 55 241 (62,5) | 6 194 (7,2) |
| 2000 | 15 675 (64,2) | 99 010 (98,6) | 8 759 (35,8) | 1 425 (1,4) |
| 2010 | 11 393 (69,1) | 108 418 (99,0) | 5 102 (30,9) | 1 085 (1,0) |
| Pommes de terre nouvelles | | | | |
| 1979 | 6 627 (50,2) | 17 339 (92,2) | 6 571 (49,8) | 1 464 (7,8) |
| 1988 | 5 527 (61,4) | 14 485 (95,7) | 3 480 (38,6) | 646 (4,3) |
| 2000 | 5 817 (85,4) | 13 470 (98,5) | 994 (14,6) | 211 (1,5) |
| 2010 | 3 829 (83,3) | 7 054 (98,2) | 766 (16,7) | 133 (1,8) |

ha, hectare

La sélection des exploitations de vigne et de pommes de terre en fonction de la destination finale des productions agricoles permet d'appliquer les données issues des matrices culture-exposition sur des effectifs et surfaces appropriés. Le calcul des indicateurs définis par la suite sera donc réalisé sur ces surfaces et ces exploitations considérées comme « professionnelles » pour les expositions environnementale et professionnelle.

Ainsi, cette sélection permet de ne pas surestimer le nombre d'exploitations utilisatrices de pesticides. Par exemple, pour la vigne en 1979, seules 50,9 % des exploitations déclarant une surface de vigne non nulle dans le recensement agricole sont retenues. En revanche, concernant les surfaces cultivées correspondantes, notre sélection permet de retenir plus de 90 % des surfaces quels que soient le type de culture et les années (exception faite des pommes de terre de conservation en 1979 avec 79,2 % des surfaces).

3.3 Harmonisation du découpage communal entre les recensements

Dans les quatre recensements agricoles, les exploitations sont anonymisées et enregistrées sous un numéro qui est différent d'un recensement à l'autre. Il n'est donc pas possible de suivre une même exploitation au cours du temps. En revanche, il est possible d'identifier les communes (médiane de superficie = 15 km²) où est recensé l'ensemble des exploitations y déclarant leur siège. Dans les différents recensements, la commune de l'exploitation correspond à la commune sur laquelle est situé le bâtiment principal d'exploitation ou, s'il n'y a pas de bâtiment, la commune où est située la parcelle de culture la plus importante. La commune du siège ne correspond donc pas forcément à la localisation des parcelles de cultures de l'exploitation.

Afin de pouvoir comparer les recensements et de déterminer l'évolution de l'utilisation des pesticides au cours du temps dans les communes, nous avons regroupé les exploitations localisées dans la même commune. Le découpage administratif des communes évoluant au cours du temps, un travail d'harmonisation du découpage des communes a été nécessaire. Ainsi, les données des quatre recensements ont été décrites au niveau communal en utilisant le référentiel géographique utilisé dans le dernier recensement, soit l'année 2010 (référentiel géographique de 2011). Ce reclassement concerne 0,8 % des communes en 1979, 0,4 % en 1988 et 0,2 % en 2000.

3.4 Interpolation des années entre les recensements

Le travail d'harmonisation du découpage communal nous a permis d'obtenir pour les quatre recensements les informations pour chaque commune : la surface des cultures, le nombre d'exploitations par culture et le nombre de travailleurs. Pour disposer de ces données dans chaque commune pour toutes les années entre 1979 et 2010, nous avons réalisé des régressions linéaires permettant d'interpoler chacune de ces informations correspondantes pour les années entre les quatre recensements. Ces régressions ont été réalisées par commune et par segment de temps : 1979-1988, 1988-2000 et 2000-2010.

4. MÉTHODES

La méthodologie décrite dans ce rapport a fait l'objet d'une publication [13].

4.1 Choix du niveau géographique pour la définition des indicateurs

Le niveau géographique le plus fin disponible dans les données du recensement agricole est la commune du siège de l'exploitation. Cette dernière est définie comme la commune où se trouve le bâtiment principal ou la parcelle agricole la plus importante. Les autres parcelles de l'exploitation situées dans d'autres communes sont rattachées à la commune du siège de l'exploitation. De ce fait, il est possible que la SAU d'une commune soit supérieure à la superficie de la commune elle-même ; nous avons évalué qu'en 2010, 10 % des communes étaient dans cette situation (n=3 820). Pour limiter cette erreur de classement des superficies agricoles entre les communes, les indicateurs ont été calculés au niveau cantonal (taille moyenne de 150 km² versus 15 km² pour les communes). Nous avons vérifié qu'à ce niveau géographique, en 2010, seuls 0,2 % des cantons (n=9) avaient des valeurs de SAU supérieures à leur superficie.

4.2 Indicateurs géographiques d'exposition environnementale liée à l'utilisation de pesticides

La population générale peut être exposée aux pesticides par leur utilisation sur les parcelles agricoles présentes dans son environnement proche. Afin d'approcher cette exposition environnementale, nous avons défini des indicateurs d'exposition en prenant en compte l'importance de l'utilisation de pesticides dans chaque canton. Ces indicateurs dépendent des surfaces des différentes cultures pour lesquelles nous disposons de matrices et du nombre de traitements annuels. Pour cela, nous avons croisé les matrices et les données issues des recensements au niveau du canton. Quatre indicateurs cantonaux d'exposition sont proposés dans le Tableau 2 ; ils correspondent à la prise en compte des différentes informations disponibles dans les matrices (probabilité, fréquence et intensité d'utilisation) :

- Proportion traitée (par groupe, famille chimique, substance active) de la surface dédiée aux cultures avec matrice dans le canton.
- Nombre moyen (par groupe, famille chimique, substance active) de traitements annuels pour les surfaces dédiées aux cultures avec matrice dans le canton.
- Quantité totale de substance active diffusée chaque année sur les surfaces des cultures avec matrice dans le canton.
- Quantité moyenne par hectare de substance active diffusée chaque année sur les surfaces des cultures avec matrice dans le canton.

Tableau 2. Indicateurs d'exposition environnementale aux pesticides

| Notation | |
|---|---|
| Canton | i |
| Culture | c |
| Surface de la culture c dans le canton i | S_{c_i} |
| Surface totale des cultures avec matrice dans le canton i | $S_i = \sum_c S_{c_i}$ |
| Pesticides : | |
| ▪ groupe, famille chimique ou substance active | X |
| ▪ famille chimique ou substance active | FA |
| Probabilité, fréquence et intensité d'utilisation de X pour la culture c dans le canton i d'après la matrice | $P_{c_i}^X, F_{c_i}^X, I_{c_i}^X$ |
| Indicateurs d'exposition environnementale aux pesticides | |
| Proportion traitée par X de la surface dédiée aux cultures avec matrice dans le canton i | $Pe_i^X = \frac{\sum_c (P_{c_i}^X \times S_{c_i})}{S_i}$ |
| Nombre moyen de traitements annuels de X pour les surfaces dédiées aux cultures avec matrice dans le canton i | $Ne_i^X = \frac{\sum_c (P_{c_i}^X \times F_{c_i}^X \times S_{c_i})}{S_i}$ |
| Quantité totale de substance active FA diffusée chaque année sur les surfaces des cultures avec matrice dans le canton i | $Qe_i^{FA} = \sum_c (P_{c_i}^{FA} \times F_{c_i}^{FA} \times I_{c_i}^{FA} \times S_{c_i})$ |
| Quantité moyenne par hectare de substance active FA diffusée chaque année sur les surfaces des cultures avec matrice dans le canton i | $Qe_i^{FA}/ha = \frac{\sum_c (P_{c_i}^{FA} \times F_{c_i}^{FA} \times I_{c_i}^{FA} \times S_{c_i})}{S_i}$ |

4.3 Indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides

L'exposition professionnelle aux pesticides correspond à l'exposition des travailleurs agricoles. Pour définir des indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides, nous avons croisé les matrices et les données issues des recensements en prenant en compte différents types d'exploitation, définies selon la présence des différentes cultures concernées par les matrices, au niveau de chaque canton. Le calcul nécessite de tenir compte des combinaisons de cultures présentes dans les exploitations (définissant des types d'exploitation) pour prendre en compte la dépendance ou l'indépendance de l'utilisation des pesticides sur les différentes cultures ; en effet, dans certains cas, le fait de traiter une culture peut modifier la probabilité de traitement d'une autre culture (dépendance), alors que pour d'autres cultures cela ne sera pas le cas (indépendance ; Annexe 2, Tableau S2). Les indicateurs d'exposition vont donc varier pour chaque type d'exploitation déterminé.

L'exposition professionnelle peut être déterminée de deux façons :

- Exposition moyenne d'une exploitation : les indicateurs sont calculés à partir du type d'exploitation et de leur nombre dans le canton. Ils correspondent à des exploitations exposées, voire à des exploitants exposés s'ils sont seuls dans l'exploitation.
- Exposition moyenne des travailleurs agricoles : les indicateurs sont calculés à partir du type d'exploitation et du nombre de travailleurs présents dans chaque type. Cette exposition peut être déterminée pour l'ensemble des travailleurs agricoles, ou déclinée par type de main-d'œuvre (familiale, salariés permanents) et en fonction du sexe.

4.3.1 Types d'exploitation

Pour calculer les indicateurs d'exposition professionnelle, il est nécessaire de définir une typologie des exploitations, selon les combinaisons de cultures avec matrice qu'elles cultivent. Le croisement des 8 types de culture avec matrice (céréales à paille, maïs grain, maïs fourrage, pommes de terre nouvelles/plant/conservation/féculerie et vigne) conduit à 144 combinaisons dans les différents recensements. Si on ne fait pas la distinction entre les deux types de maïs et les quatre types de pommes de terre, on retrouve 16 combinaisons (Tableau 3).

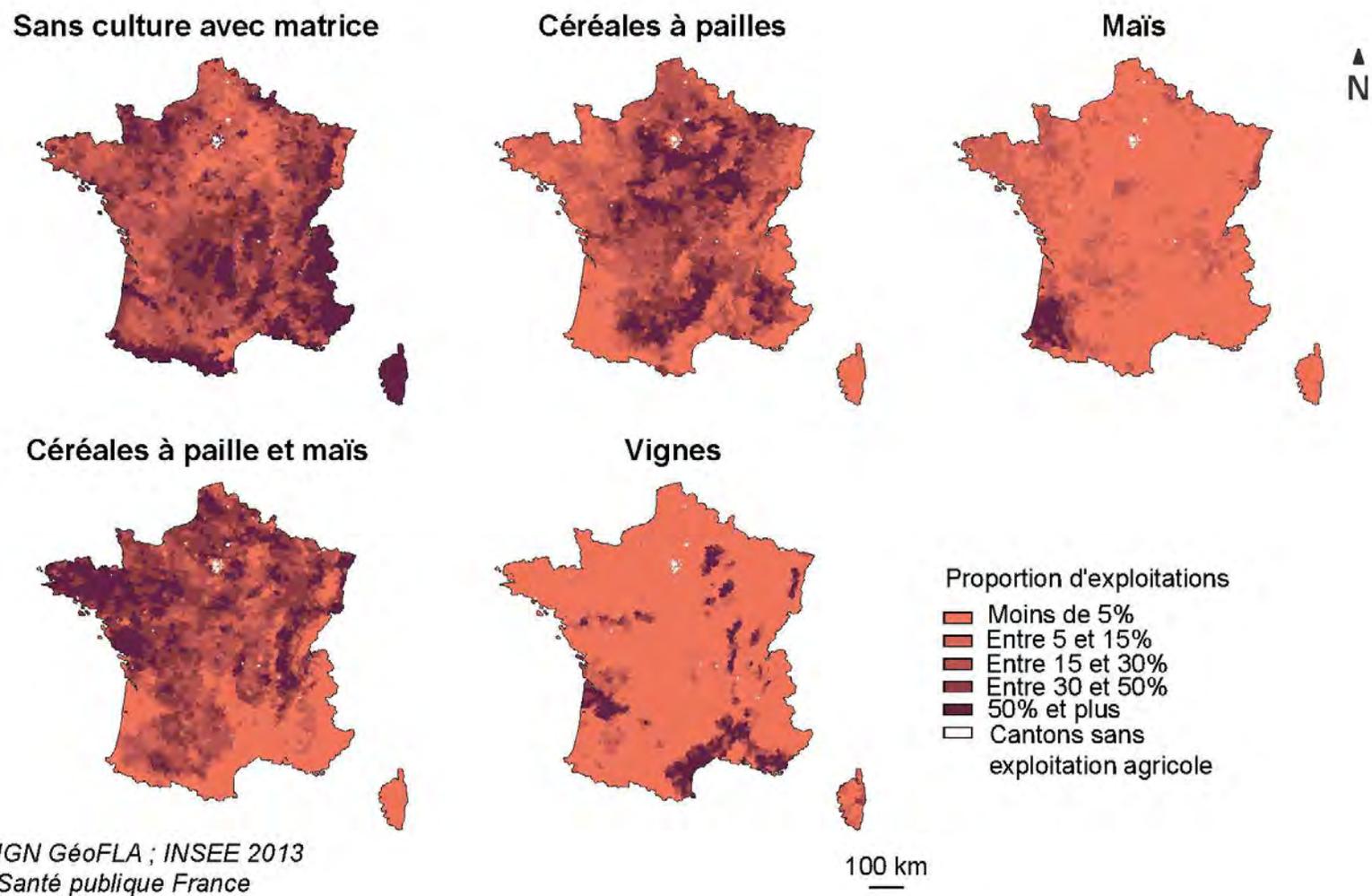
On observe une diminution du nombre d'exploitations au cours du temps (que ce soit de manière générale, ou selon la typologie établie selon les cultures produites), ainsi qu'une plus grande spécialisation car les exploitations composées de différents types de culture diminuent de manière plus marquée que les exploitations ne produisant qu'un ou deux types de culture avec matrice.

La répartition spatiale des 5 types d'exploitation les plus fréquentes (aucune des 4 cultures (29 %), céréales seules (19 %), maïs seules (6 %), vignes seules (13 %), et céréales et maïs (27 %)) pour le recensement de 2010 est représentée sur la Figure 1. Les exploitations sans culture avec matrice sont réparties principalement dans les zones de montagne et d'élevage. Les exploitations composées de céréales à paille, sans autre culture avec matrice, sont présentes principalement sur une large bande centrale du territoire, du Nord au Sud. Les exploitations composées de maïs (quel que soit le type de maïs considéré) sont concentrées principalement en Aquitaine. Les exploitations comprenant à la fois des céréales à paille et du maïs sont réparties sur une très large moitié Nord du pays, et majoritairement dans le Nord-Ouest. Les exploitations comprenant de la vigne, sans aucune autre culture avec matrice, se situent logiquement au sein des différents vignobles et notamment, le Bordelais et la côte Méditerranéenne. La répartition spatiale des quatre recensements est présentée en Annexe 2, Figure S1, ainsi que la répartition des cantons par classe dans le Tableau S3.

Tableau 3. Répartition par année du nombre d'exploitations pour les différents types d'exploitation (16 combinaisons)

| Type d'exploitation | Recensement (nombre d'exploitations, N (%)) | | | |
|-------------------------------------|---|------------------------|----------------------|----------------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Aucune des 4 cultures | 286 521 (23) | 256 150 (25) | 191 622 (29) | 140 706 (29) |
| Une seule culture | | | | |
| Céréales seules | 198 487 (16) | 162 354 (16) | 111 739 (17) | 91 280 (19) |
| Maïs seuls | 79 193 (6) | 75 144 (7) | 43 421 (7) | 26 589 (6) |
| Pommes de terre seules | 9 259 (1) | 4 134 (<1) | 3 688 (1) | 3 249 (1) |
| Vignes seules | 138 630 (11) | 111 046 (11) | 83 299 (13) | 60 856 (13) |
| Deux cultures | | | | |
| Céréales et maïs | 353 060 (28) | 313 776 (31) | 177 200 (27) | 132 558 (27) |
| Céréales et pommes de terre | 47 150 (4) | 14 325 (1) | 7 514 (1) | 5 066 (1) |
| Céréales et vignes | 26 731 (2) | 18 291 (2) | 11 065 (2) | 7 481 (2) |
| Maïs et pommes de terre | 5 330 (<1) | 1 964 (<1) | 873 (<1) | 435 (<1) |
| Maïs et vignes | 10 367 (1) | 8 458 (1) | 3 907 (1) | 1 421 (<1) |
| Pommes de terre et vignes | 889 (<1) | 365 (<1) | 327 (<1) | 114 (<1) |
| Trois cultures | | | | |
| Céréales, maïs et pommes de terre | 59 531 (5) | 17 617 (2) | 9 009 (1) | 7 062 (1) |
| Céréales, maïs et vignes | 35 009 (3) | 21 444 (2) | 8 996 (1) | 5 185 (1) |
| Céréales, pommes de terre et vignes | 2 108 (<1) | 467 (<1) | 233 (<1) | 128 (<1) |
| Maïs, pommes de terre et vignes | 420 (<1) | 97 (<1) | 34 (<1) | 12 (<1) |
| Les 4 cultures | 4 483 (<1) | 488 (<1) | 163 (<1) | 103 (<1) |
| Total | 1 257 168 (100) | 1 006 120 (100) | 653 090 (100) | 482 245 (100) |

Figure 1. Distribution spatiale de la proportion d'exploitations en fonction de leur type en 2010



4.3.2 Calcul des indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides pour les exploitations

Quatre indicateurs sont proposés dont le calcul est détaillé en Annexe 2 ; ils correspondent à la prise en compte des différents indices fournis par les matrices (probabilité, fréquence et intensité d'utilisation) :

- Proportion des exploitations utilisant un pesticide (groupe, famille chimique, substance active) pour les cultures avec matrice dans le canton.
- Nombre moyen de traitements annuels (groupe, famille chimique, substance active) pour les exploitations ayant des cultures avec matrice dans le canton.
- Nombre moyen de traitements annuels (groupe, famille chimique, substance active) pondéré par la surface des cultures pour les exploitations ayant des cultures avec matrice dans le canton.

Pour les substances actives pour lesquelles l'intensité est renseignée, un indicateur supplémentaire peut être calculé :

- Quantité moyenne épandue par hectare (substance active) dans le canton pour les exploitations ayant des cultures avec matrice.

Le deuxième indicateur, nombre moyen de traitements annuels correspond à la somme des traitements réalisés sur les cultures qui sont indépendantes les unes par rapport aux autres au niveau du traitement. Le troisième indicateur, nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface, se rapproche quant à lui de l'indicateur de l'exposition environnementale en prenant en compte les surfaces, à la différence qu'il est calculé par type d'exploitation et ensuite rapporté à une exploitation moyenne parmi les exploitations composées de cultures avec matrice au sein du canton. Deux indicateurs sont proposés car l'impact de la surface sur l'exposition des travailleurs agricoles est inconnu et va dépendre d'autres critères qui sont indisponibles dans ces données.

Le Tableau 4 présente les formules pour les indicateurs professionnels. Le calcul de ces indicateurs se fait en deux étapes : une première étape consiste à calculer les indicateurs pour chaque type d'exploitation (par canton) et, dans un deuxième temps, le calcul des indicateurs est ramené au canton, ce dernier calcul découlant de la première étape. Le Tableau 4 décrit les deux types de calculs.

Tableau 4. Indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides pour les exploitations

| Notation | |
|--|---|
| Canton | i |
| Type d'exploitation | t |
| Nombre d'exploitations | n_{t_i} |
| Culture | c : cp , céréales ; mg , maïs grain ; mf , maïs fourrage ; pdt , pommes de terre (4 types) ; v , vigne |
| Surface de la culture c dans le canton i | S_{c_i} |
| Surface totale des cultures avec matrice dans le canton i | $S_i = \sum_c S_{c_i}$ |
| Pesticides : | |
| ▪ groupe, famille chimique ou substance active | X |
| ▪ groupe | G |
| ▪ famille chimique ou substance active | FA |
| Probabilité, fréquence et intensité d'utilisation de X pour la culture c dans le canton i d'après la matrice | $P_{c_i}^X, F_{c_i}^X, I_{c_i}^X$ |
| Probabilité d'utilisation de FA si traitement par G pour la culture c dans le canton i d'après la matrice | $P_{c_i}^{FA/G}$ |
| Probabilité et fréquence d'utilisation de X dans une exploitation avec deux cultures c_1 et c_2 dépendantes dans le canton i | $P_{\max(c_1, c_2)}^X = \max(P_{c_1}^X, P_{c_2}^X)$ $F_{\max(c_1, c_2)}^X = \max(F_{c_1}^X, F_{c_2}^X)$ |
| Probabilité d'utilisation de FA du groupe G pour les céréales à paille et le maïs grain dans le canton i | $P_{cp \text{ et } mg_i}^{FA} =$ $P_{\min(cp_i, mg_i)}^G \times [1 - (1 - P_{cp_i}^{FA/G}) \times (1 - P_{mg_i}^{FA/G})] + P_{\text{diff}(cp_i, mg_i)}^G \times P_{mg_i}^{FA/G}$ avec $P_{\min(cp_i, mg_i)}^G = \min(P_{cp_i}^G, P_{mg_i}^G)$ et $P_{\text{diff}(cp_i, mg_i)}^G = P_{\max(cp_i, mg_i)}^G - P_{\min(cp_i, mg_i)}^G$ |

Indicateurs d'exposition aux pesticides par type d'exploitation

| | |
|---|--|
| Probabilité d'exposition au groupe G de l'exploitation t du canton i ayant des cultures avec matrice | $Pp_{t_i}^G = 1 - (1 - P_{\max(cp_i, mg_i, mf_i)}^G)(1 - P_{\max(pdt_i)}^G)(1 - P_{v_i}^G)$ |
| Probabilité d'exposition à FA dans l'exploitation t du canton i ayant des cultures avec matrice | $Pp_{t_i}^{FA} = 1 - (1 - P_{cp \text{ et } mg_i}^{FA})(1 - P_{\max(pdt_i)}^{FA})(1 - P_{v_i}^{FA})$ |
| Nombre moyen de traitements annuels de X dans l'exploitation t du canton i ayant des cultures avec matrice | $Np_{t_i}^X = (P_{cp_i}^X F_{cp_i}^X) + (P_{\max(mg_i, mf_i)}^X F_{\max(mg_i, mf_i)}^X) + (P_{\max(pdt_i)}^X F_{\max(pdt_i)}^X) + (P_{v_i}^X F_{v_i}^X)$ |
| Nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface de X dans l'exploitation t du canton i ayant des cultures avec matrice | $Np_{t_i}^X/ha = \frac{\sum_c (P_{c_i}^X \times F_{c_i}^X \times S_{c_i})}{S_i}$ |
| Quantité moyenne épanchée par hectare de FA dans l'exploitation t du canton i ayant des cultures avec matrice | $Qp_{t_i}^{FA}/ha = \frac{\sum_c (P_{c_i}^{FA} \times F_{c_i}^{FA} \times I_{c_i}^{FA} \times S_{c_i})}{S_i}$ |

Indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides pour le canton

| | |
|---|---|
| Proportion d'exploitations utilisant X pour les cultures d'intérêt dans le canton i | $Pp_i^X = \frac{\sum_t n_{t_i} Pp_{t_i}^X}{\sum_t n_{t_i}}$ |
| Nombre moyen de traitements annuels de X dans le canton i pour les exploitations ayant des cultures avec matrice | $Np_i^X = \frac{\sum_t n_{t_i} Np_{t_i}^X}{\sum_t n_{t_i}}$ |
| Nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface de X dans le canton i pour les exploitations ayant des cultures avec matrice | $Np_i^X/ha = \frac{\sum_t n_{t_i} Np_{t_i}^X/ha}{\sum_t n_{t_i}}$ |
| Quantité moyenne épanchée par hectare de FA dans le canton i pour les exploitations ayant des cultures avec matrice | $Qp_i^{FA}/ha = \frac{\sum_t n_{t_i} Qp_{t_i}^{FA}/ha}{\sum_t n_{t_i}}$ |

4.3.3 Calcul des indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides pour les travailleurs agricoles

Deux indicateurs sont proposés qui sont similaires à ceux définis pour les exploitations dans le paragraphe précédent :

- Proportion des travailleurs agricoles dans les exploitations utilisant un pesticide (groupe, famille chimique, substance active) pour les cultures avec matrice dans le canton.
- Nombre moyen de traitements annuels (groupe, famille chimique, substance active) pour les travailleurs agricoles des exploitations ayant des cultures avec matrice dans le canton.

Les données disponibles dans le recensement agricole ne nous permettent pas de déterminer la proportion de travailleurs réellement impliqués dans la préparation et/ou l'épandage de pesticides dans chaque type d'exploitation car tous les travailleurs ne traitent pas les cultures. Par exemple, certains travailleurs peuvent se limiter à des tâches administratives. En l'absence de données supplémentaires, nous allons considérer que tous les travailleurs sont exposés en attribuant un coefficient de 1 pour chaque type d'exploitation (correspondant à la proportion de travailleurs impliqués dans la préparation et/ou l'épandage de pesticides ; Tableau 5) ; si des données complémentaires sont disponibles, permettant d'approcher cette proportion, elle peut être prise en compte dans le calcul.

Les calculs des indicateurs d'exposition pour les travailleurs agricoles sont similaires à ceux décrits dans le Tableau 4 pour les exploitations, mais ils sont en plus pondérés sur le nombre de travailleurs par type d'exploitation (Tableau 5). L'effectif des travailleurs agricoles pour le calcul des indicateurs peut porter sur l'ensemble des travailleurs, ou bien se limiter à la main-d'œuvre familiale ou, les salariés permanents, et se décliner par sexe.

Tableau 5. Indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides pour les travailleurs agricoles

| Notation | |
|---|--|
| Nombre de travailleurs agricoles | $trav_{t_i}$ |
| Proportion a priori des travailleurs exposés aux pesticides | $coef_{t_i}$ |
| Indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides pour les travailleurs agricoles du canton | |
| Proportion de travailleurs utilisant X dans les exploitations ayant des cultures avec matrice dans le canton i | $P_{pop}p_i^X = \frac{\sum_t trav_{t_i} \times coef_{t_i} \times Pp_{t_i}^X}{\sum_t trav_{t_i}}$ |
| Nombre moyen de traitements annuels de X dans le canton i pour les travailleurs des exploitations ayant des cultures avec matrice | $N_{pop}p_i^X = \frac{\sum_t trav_{t_i} \times coef_{t_i} \times Np_{t_i}^X}{\sum_t trav_{t_i}}$ |

4.4 Cartographie

Les résultats sont présentés sous forme de cartes réalisées avec le *package cartography* de R. Le fonds de carte se base sur le recensement des cantons de 2013 de l'Insee et provient de la base de données Geofla de l'Institut géographique national. La catégorisation des indicateurs environnementaux, ainsi que celle des indicateurs professionnels, pour la représentation spatiale par canton s'appuie sur la description des indicateurs.

5. RÉSULTATS

Pour chaque type d'exposition, nous présentons l'évolution temporelle et la répartition géographique des indicateurs d'expositions environnementale et professionnelle pour :

- les grands groupes de pesticides (fongicides, herbicides, insecticides) ;
- une famille chimique d'herbicides : les aryloxy-acides ;
- une substance active des aryloxy-acides : le 2,4-D.

L'indicateur concernant la quantité diffusée n'est disponible qu'au niveau de certaines substances actives. Les grands groupes et les familles chimiques ne disposent donc pas de cet indicateur.

Cette famille chimique et sa substance active ont été sélectionnées car elles sont présentes dans plusieurs matrices.

Les aryloxy-acides sont utilisés sur les céréales à paille, le maïs et les pommes de terre. Cette famille chimique est utilisée depuis les années 1940. Elle est présente dans la matrice pommes de terre entre 1982 et 1988, et entre 1960 et 2010 pour les matrices céréales à paille et maïs. Quatre substances actives appartenant aux aryloxy-acides apparaissent dans une ou plusieurs matrices : 2,4-D / 2,4-MCPA / Fenoprop et Mecoprop.

Le 2,4-D est utilisé sur 2 des cultures avec matrice Il est présent dans la matrice des céréales à paille depuis 1960 et il était toujours utilisé en 2010, et dans les matrices maïs grain et maïs fourrage, où il est utilisé jusqu'en 1995. Son utilisation dans les céréales à paille diminue dès 1986.

5.1 Surface des cultures avec matrice

Les céréales à paille sont les cultures dont la surface est la plus importante sur le territoire ; elles représentent environ 25 % de la SAU (Tableau 6). Le maïs, grain et fourrage compris, représente environ 10 % de la SAU. L'ensemble des cultures avec matrice représentent environ 40 % de la SAU sur les quatre recensements. Les prairies et jachères qui représentent près de 45 % de la SAU sont très peu traitées par les pesticides [11]. Si elles sont déduites de la SAU (car considérées comme des cultures non exposantes aux pesticides), les cultures avec matrice représentent alors 81 % de la SAU (sans prairies et jachères) en 1979 et 75 % dans les recensements suivants. Elles couvrent ainsi une très grande part des cultures exposantes aux pesticides.

Dans la suite du document et dans le but de simplifier la lecture, les termes cultures avec matrice, ou surfaces des cultures avec matrice, seront remplacées respectivement par cultures d'intérêt et surfaces d'intérêt.

Tableau 6. Répartition des surfaces agricoles par culture d'intérêt* en fonction des différents recensements

| Cultures | Année de recensement (surface en hectares (% SAU)) | | | |
|-----------------------------|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Céréales à paille | 7 577 558 (25,69) | 6 960 158 (24,34) | 7 130 064 (25,60) | 7 471 590 (26,96) |
| Maïs grain | 1 896 725 (6,43) | 1 996 429 (6,98) | 1 753 866 (6,30) | 1 616 020 (5,83) |
| Maïs fourrage | 1 093 777 (3,71) | 1 468 308 (5,13) | 1 384 929 (4,97) | 1 387 289 (5,01) |
| Pommes de terre | | | | |
| féculerie | 19 265 (0,07) | 27 889 (0,10) | 28 775 (0,10) | 20 101 (0,07) |
| conservation | 118 003 (0,40) | 80 224 (0,28) | 99 010 (0,36) | 108 418 (0,39) |
| nouvelles | 17 339 (0,06) | 14 485 (0,05) | 13 470 (0,05) | 7 054 (0,03) |
| plants | 17 117 (0,06) | 13 365 (0,05) | 14 928 (0,05) | 17 656 (0,06) |
| Vignes | 1 027 112 (3,48) | 923 277 (3,23) | 878 107 (3,15) | 781 516 (2,82) |
| Total des 8 cultures | 11 766 896 (39,89) | 11 484 135 (40,16) | 11 303 149 (40,58) | 11 409 644 (41,17) |
| Prairies et jachères | 15 053 037 (51,03) | 13 243 270 (46,31) | 12 795 686 (45,93) | 12 479 656 (45,03) |
| SAU totale | 29 496 572 (100) | 28 595 799 (100) | 27 856 313 (100) | 27 712 724 (100) |

* ici, et dans la suite du document, les cultures d'intérêt correspondent à celles disposant de matrice

Figure 2. Distribution spatiale de la proportion de surfaces d'intérêt en 1979, 1988, 2000 et 2010

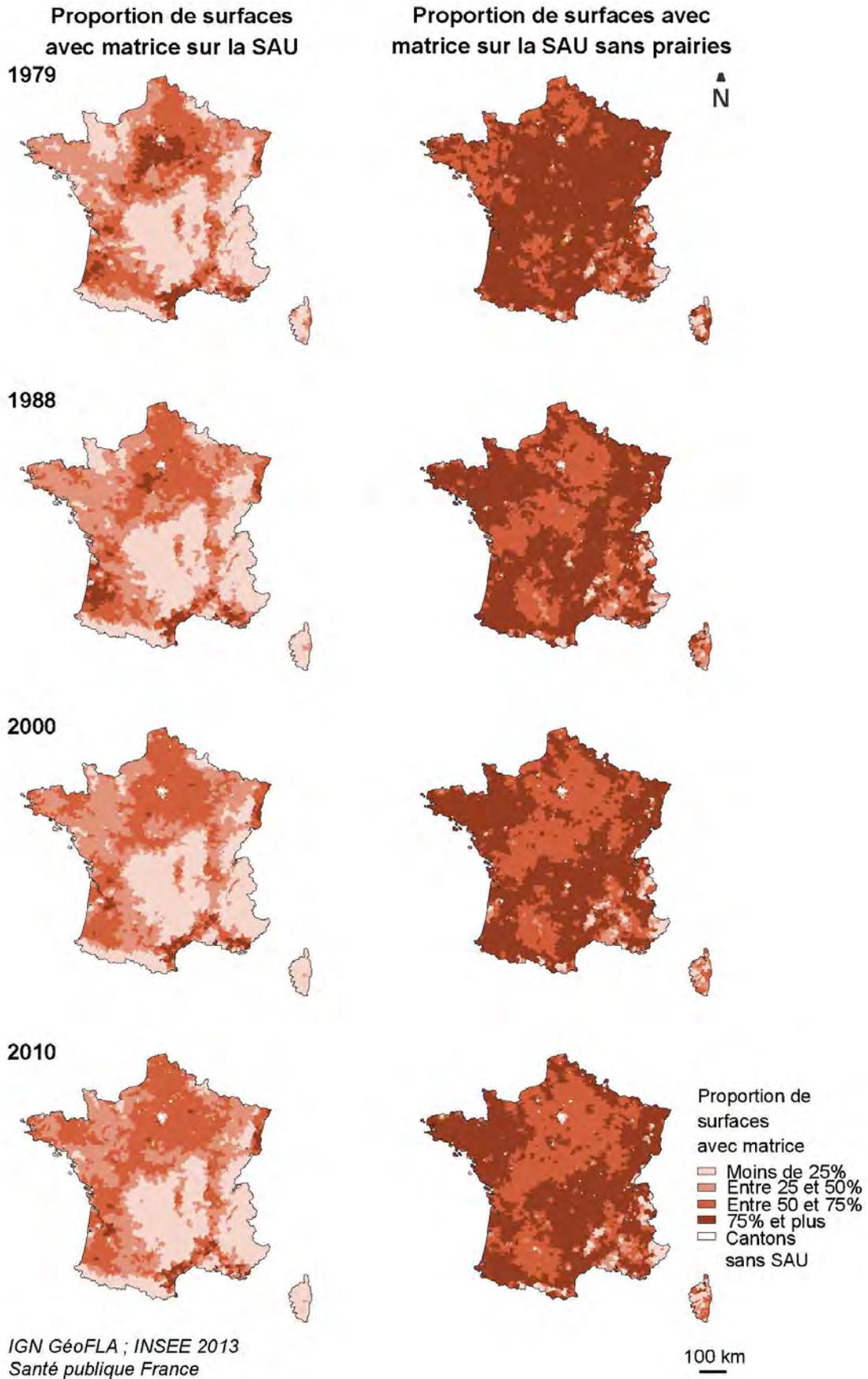
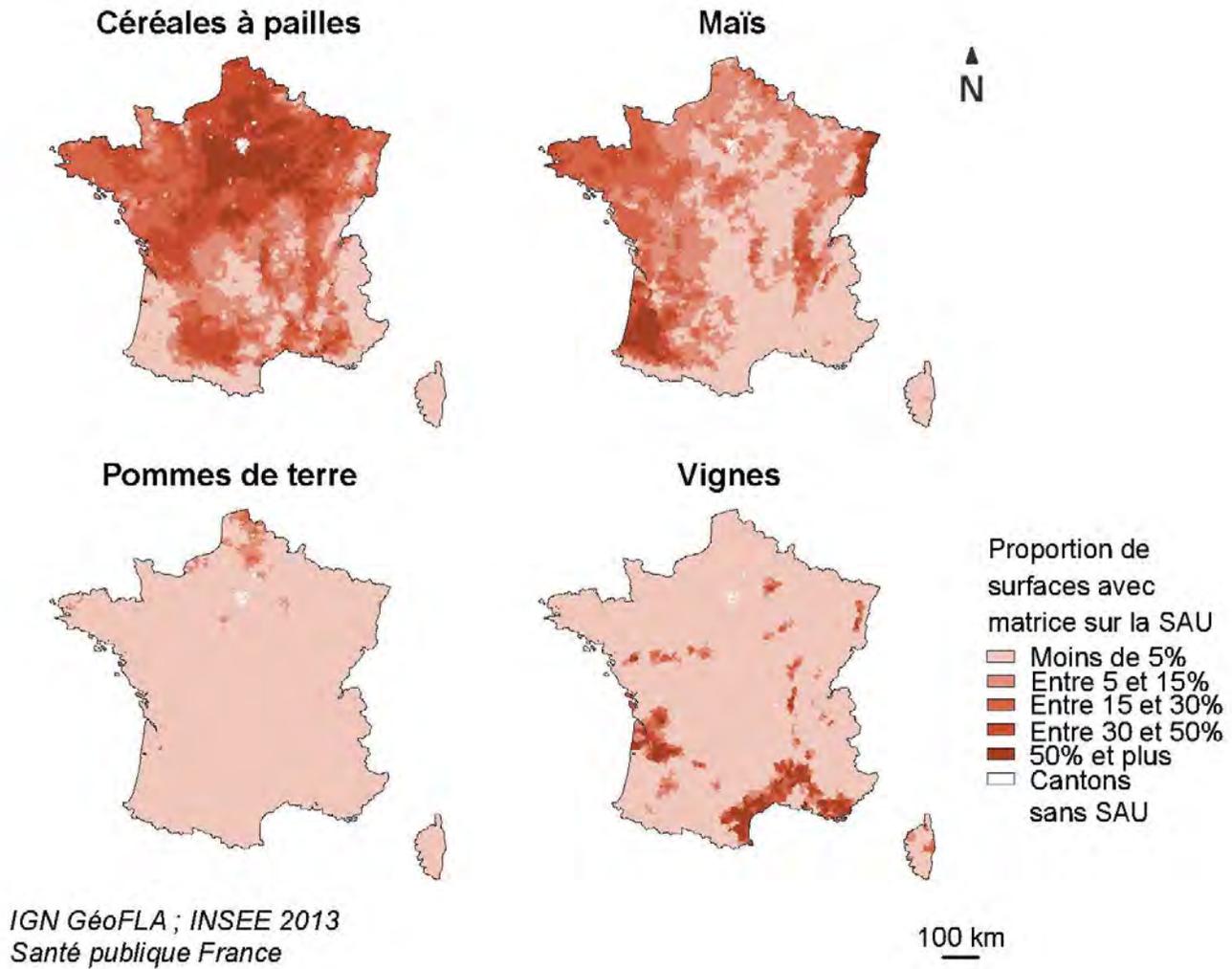


Figure 3. Distribution spatiale de la proportion de surfaces d'intérêt en 2010



Une hétérogénéité spatiale est observée pour la proportion de surfaces d'intérêt parmi la SAU sans prairies (Figure 2). Ce sont les Alpes et la région parisienne qui ont les proportions les plus faibles.

La répartition spatiale pour chacune des cultures (céréales à paille, maïs, pommes de terre et vignes) pour le recensement de 2010 montre une régionalisation des cultures (Figure 3).

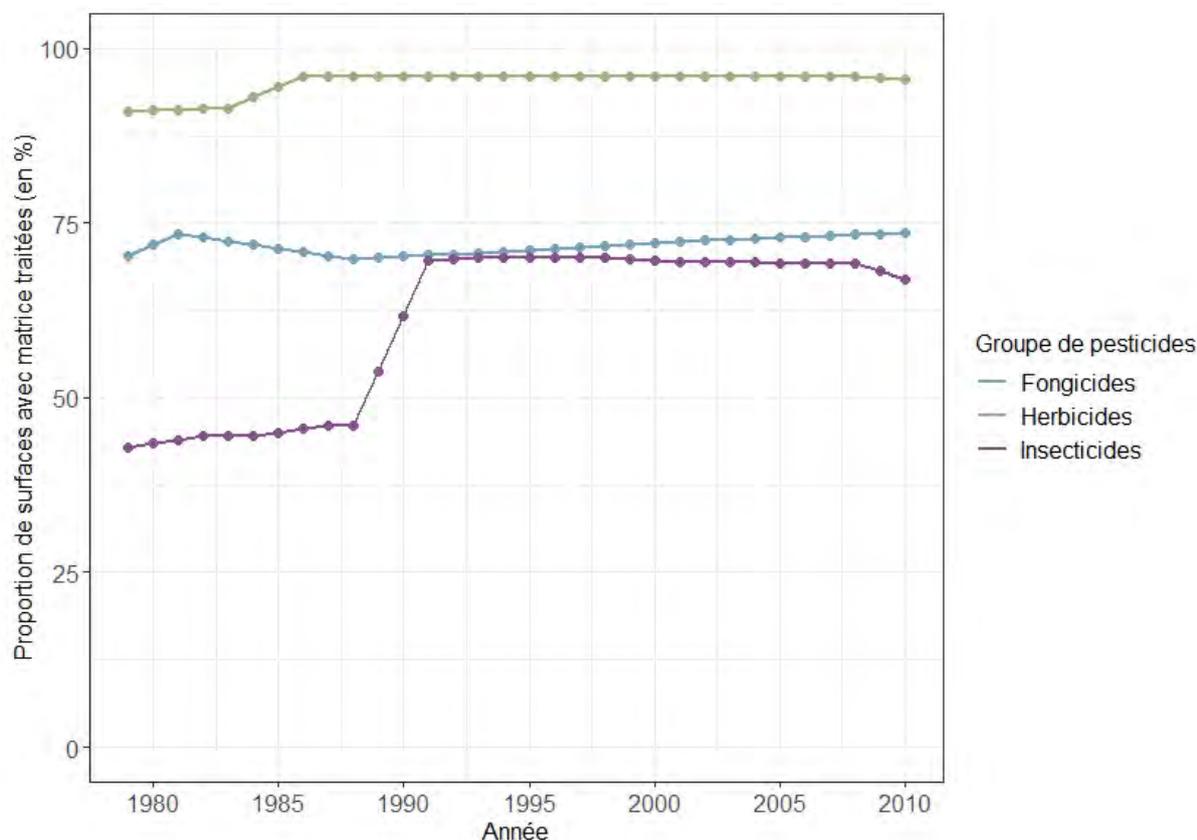
Les céréales à paille sont présentes sur l'ensemble du territoire, et particulièrement au Nord (Bassin parisien). Les surfaces de maïs occupent une grande partie du territoire et une forte concentration se distingue dans l'Ouest, et sur le Nord-Est. Les pommes de terre représentent des surfaces relativement faibles qui se situent davantage au Nord. Les surfaces viticoles sont réparties sur les différents vignobles français dont les plus grands sont situés dans le Sud-Ouest, la côte Méditerranéenne et la Champagne. La répartition de ces cultures sur les trois autres recensements est relativement proche de celle de 2010 (Annexe 3, Figure S3 ; le Tableau S4 décrit le nombre de cantons par catégories de proportion de la SAU). La culture du maïs présente cependant un déplacement au cours du temps : elle est importante dans le bassin parisien en 1979, puis diminue, alors qu'elle augmente dans le Nord-Ouest

5.2 Description de l'exposition environnementale aux pesticides

5.2.1 Grands groupes de pesticides

5.2.1.1 Évolution temporelle

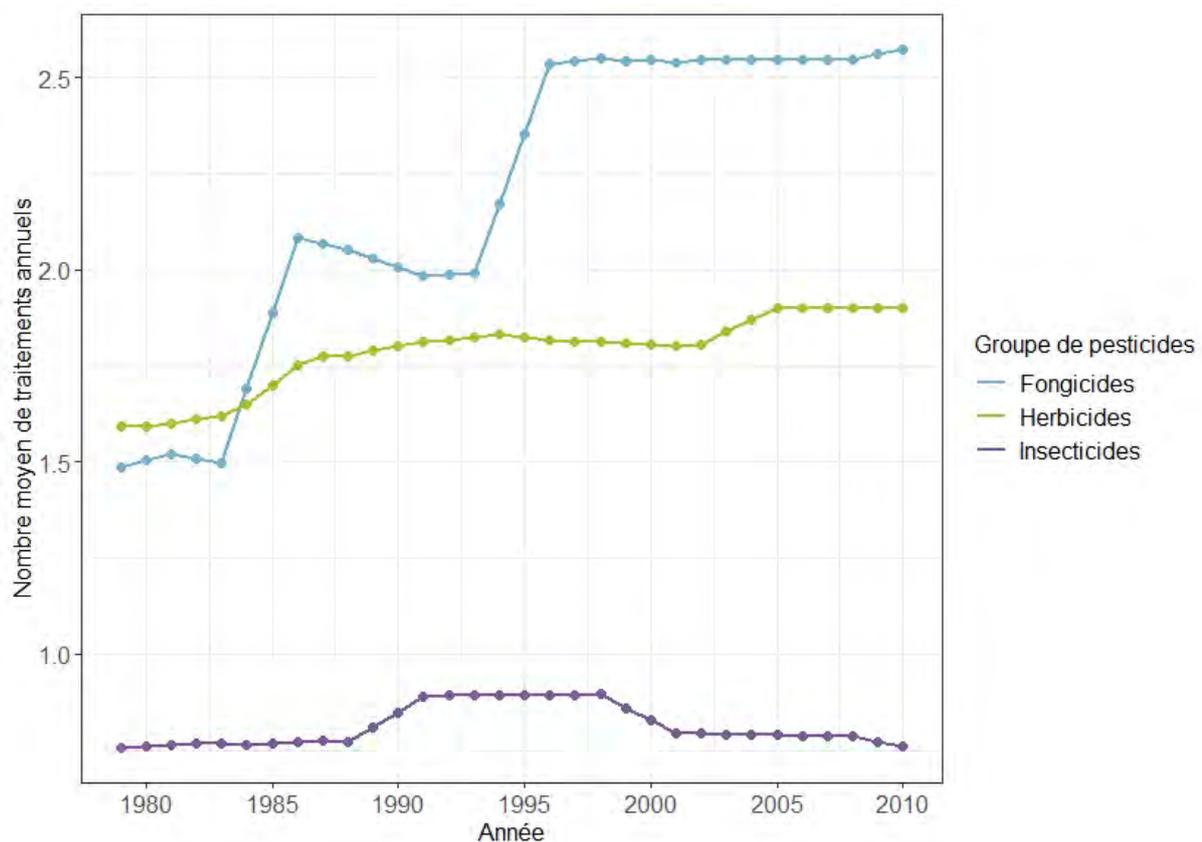
Figure 4. Évolution de la proportion de surfaces d'intérêt traitées par fongicides, herbicides et insecticides en France entre 1979 et 2010



L'évolution entre 1979 et 2010 de la proportion de surfaces des cultures d'intérêt traitées par fongicides est stable, autour de 75 % (Figure 4). La proportion de surfaces traitées par herbicides est élevée dès 1979. Elle atteint 96 % au milieu des années 1980, puis se maintient jusqu'en 2010. La proportion de surfaces traitées par insecticides est plus faible, de l'ordre de 45 % jusqu'à la fin des années 1980, puis augmente fortement pour atteindre 69 %, tandis qu'une légère diminution est observée à la fin des années 2000.

L'évolution entre 1979 et 2010 du nombre moyen de traitements annuels par fongicides présente deux augmentations importantes au milieu des années 1980 et 1990 (Figure 5). Elle plafonne avec une moyenne de 2,5 traitements annuels à partir de 1996. Les herbicides présentent une légère augmentation du nombre de traitements annuels entre 1980 et 1990 qui se stabilise entre 1990 et 2000. Le nombre moyen de traitements annuels augmente de nouveau jusqu'en 2005 et approche les 2 traitements. Le nombre de traitements annuels par insecticides est assez stable avec une légère augmentation en 1990 qui disparaît en 2000. Il est inférieur à 1 car les surfaces prennent en compte toutes les cultures avec matrice, même celles non traitées, mais aussi parce que le nombre de traitements annuels par insecticides est généralement de 1. Il est donc relativement proche des valeurs de la proportion.

Figure 5. Évolution du nombre moyen de traitements annuels par fongicides, herbicides et insecticides sur les surfaces d'intérêt en France entre 1979 et 2010



5.2.1.2 Répartition spatiale

Les valeurs par région pour le recensement de 2010 sont présentées dans le Tableau 7. Comme la répartition géographique est présentée dans les figures pour les quatre recensements, seules ces dernières seront décrites.

Pour les insecticides, le nombre moyen de traitements annuels est proche de la proportion, excepté pour les régions du Sud (Tableau 7), car un seul traitement annuel est réalisé par ce groupe de pesticides et le calcul prend en compte la proportion des cultures d'intérêt traitées. Ainsi, si 20 % de surfaces sont traitées, ce chiffre est multiplié par un traitement, ce qui correspond en moyenne à 0,20 traitement annuel sur l'ensemble des surfaces.

Pour les fongicides, il existe une hétérogénéité spatiale forte, aussi bien pour la proportion des surfaces d'intérêt traitées que pour le nombre moyen de traitements annuels (Figure 6). La proportion de surfaces d'intérêt traitées est plus faible dans la partie ouest de la France sur les quatre recensements. Le Nord de la France, et en particulier le bassin parisien, présente une augmentation de cette proportion en 1988, tandis que les départements de la Savoie ont une proportion de surfaces d'intérêt traitées qui diminue au cours du temps. Le nombre moyen de traitements annuels est très élevé dans les zones viticoles sur les quatre recensements. En 1979, le reste du territoire a un nombre moyen de traitements plus faible (moins de 1 traitement), mais ce nombre augmente en 1988, et à partir de 2000, le Nord-Ouest se distingue avec une nouvelle augmentation.

Pour les herbicides, la proportion de surfaces d'intérêt traitées est plus faible en 1979 dans le Sud-Est mais, dès 1988, les herbicides sont utilisés sur l'ensemble du territoire, excepté les métropoles et les départements du Var et du Vaucluse (Figure 7). En 2010, la proportion est plus faible dans l'ensemble de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et en Gironde. Pour le nombre moyen de traitements annuels, une augmentation est observée entre 2000 et 2010, avec plus de 2 traitements dans le Sud et le département du Nord.

Pour les insecticides, la proportion de surfaces d'intérêt traitées est élevée en 1979 et 1988 uniquement dans les zones viticoles et dans une moindre mesure les bassins maïssicoles ; à partir de 2000, la diffusion des insecticides s'étend à l'ensemble du territoire avec une augmentation plus importante dans le Nord (Figure 8). En 2010, une diminution de la proportion est observée dans le Sud. Pour le nombre moyen de traitements annuels, ce sont les régions viticoles qui ont les chiffres les plus élevés avec une diminution à partir de 2000, passant de plus de 3 traitements à moins de 2.

Le Tableau S5 de l'Annexe 3 présente le nombre et le pourcentage de cantons par catégorie de la proportion de surfaces d'intérêt traitées et du nombre de traitements annuels.

Tableau 7. Proportion de surfaces d'intérêt traitées et nombre moyen de traitements annuels en fonction des groupes de pesticides et des régions en 2010

| Régions | Surfaces d'intérêt en hectare (% sur la SAU*) | Proportion de surfaces d'intérêt traitées (%) | | | Nombre moyen de traitements annuels | | |
|----------------------------|---|---|------------|--------------|-------------------------------------|------------|--------------|
| | | Fongicides | Herbicides | Insecticides | Fongicides | Herbicides | Insecticides |
| Île-de-France | 351 819 (68) | 89 | 96 | 77 | 2,76 | 1,91 | 0,78 |
| Centre-Val de Loire | 1 250 042 (70) | 88 | 96 | 77 | 2,78 | 1,89 | 0,79 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 807 347 (73) | 85 | 95 | 74 | 2,79 | 1,87 | 0,76 |
| Normandie | 854 640 (76) | 69 | 97 | 66 | 2,26 | 1,96 | 0,70 |
| Hauts-de-France | 1 257 689 (71) | 85 | 96 | 72 | 3,32 | 2,00 | 0,77 |
| Grand-Est | 1 510 220 (74) | 79 | 96 | 72 | 2,66 | 1,88 | 0,76 |
| Pays de la Loire | 945 294 (84) | 58 | 97 | 62 | 1,96 | 1,91 | 0,64 |
| Bretagne | 871 694 (88) | 50 | 98 | 59 | 1,62 | 1,97 | 0,65 |
| Nouvelle Aquitaine | 1 624 828 (76) | 60 | 96 | 66 | 2,51 | 1,98 | 0,87 |
| Occitanie | 1 073 123 (71) | 80 | 94 | 58 | 3,02 | 1,70 | 0,91 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 667 043 (80) | 64 | 96 | 52 | 1,71 | 1,97 | 0,59 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 170 330 (63) | 97 | 80 | 43 | 4,35 | 1,09 | 0,63 |
| Corse | 7 939 (47) | 90 | 72 | 40 | 5,56 | 0,64 | 0,72 |

*SAU hors prairies et jachères.

En gras, les valeurs correspondent aux régions où la proportion de surfaces traitées est supérieure ou égale à 90 % et où le nombre moyen de traitements annuels est supérieur à 3.

Figure 6. Distribution spatiale de la proportion de surfaces d'intérêt traitées par fongicides et du nombre moyen de traitements annuels en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)

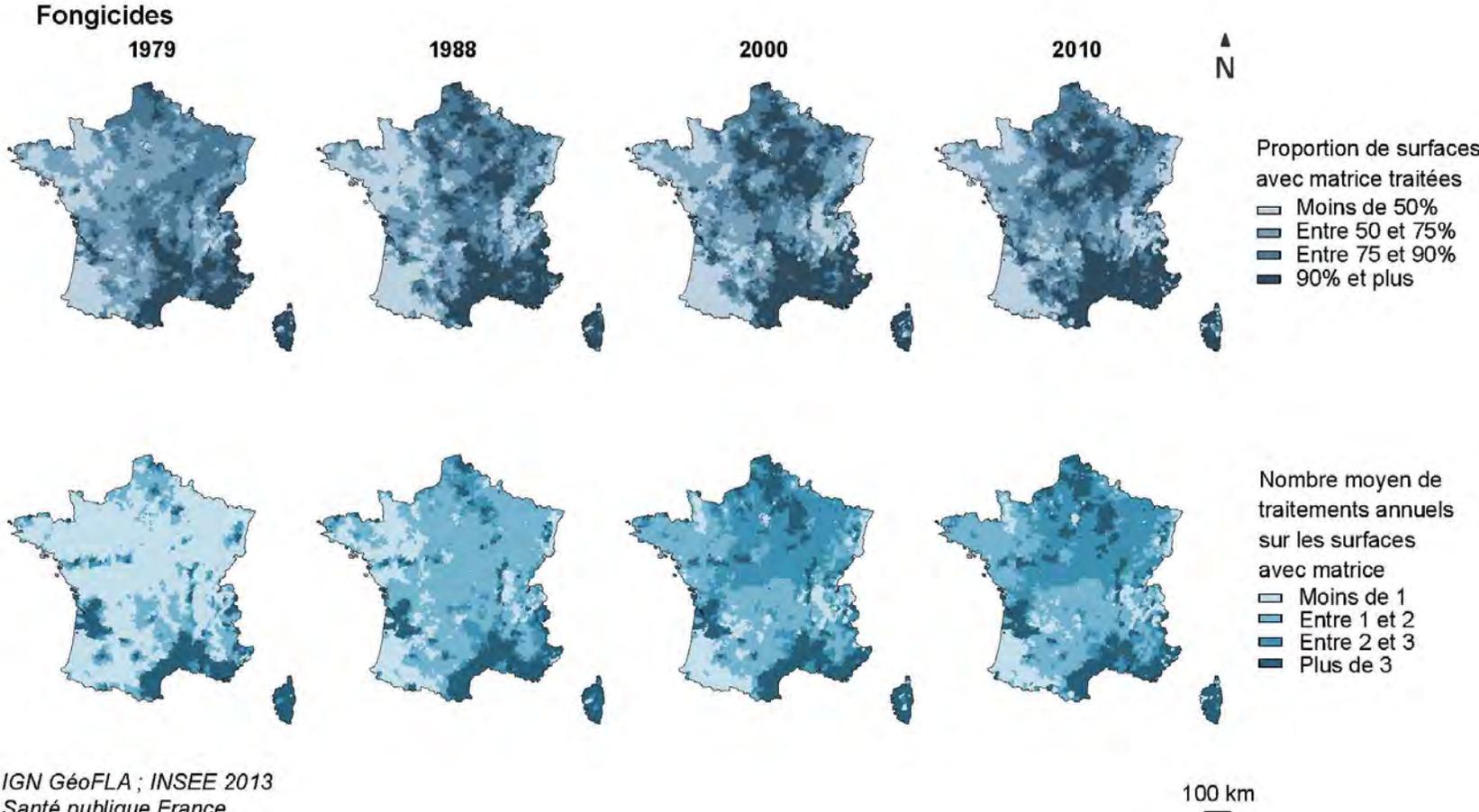


Figure 7. Distribution spatiale de la proportion de surfaces d'intérêt traitées par herbicides et du nombre moyen de traitements annuels en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)

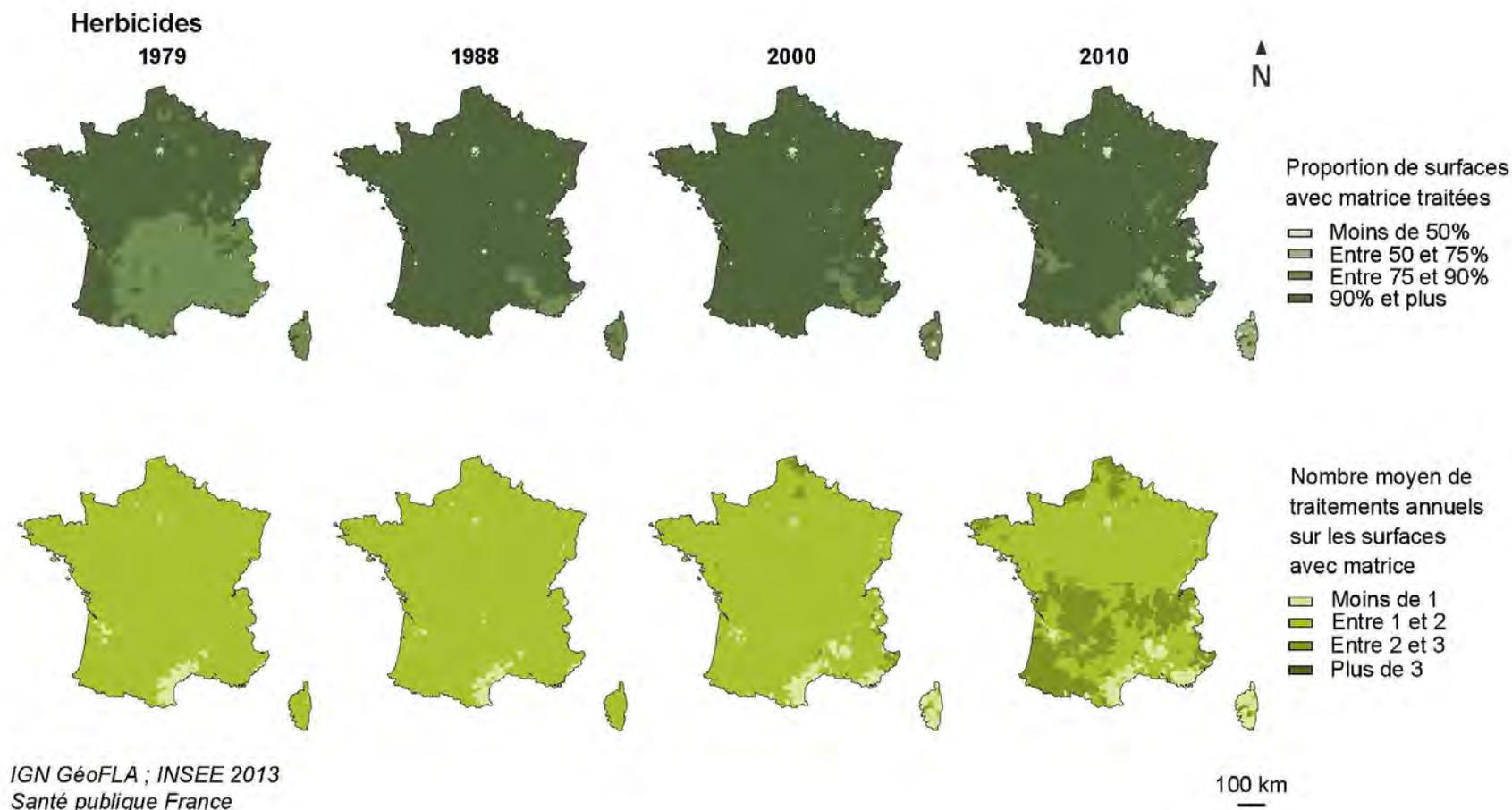
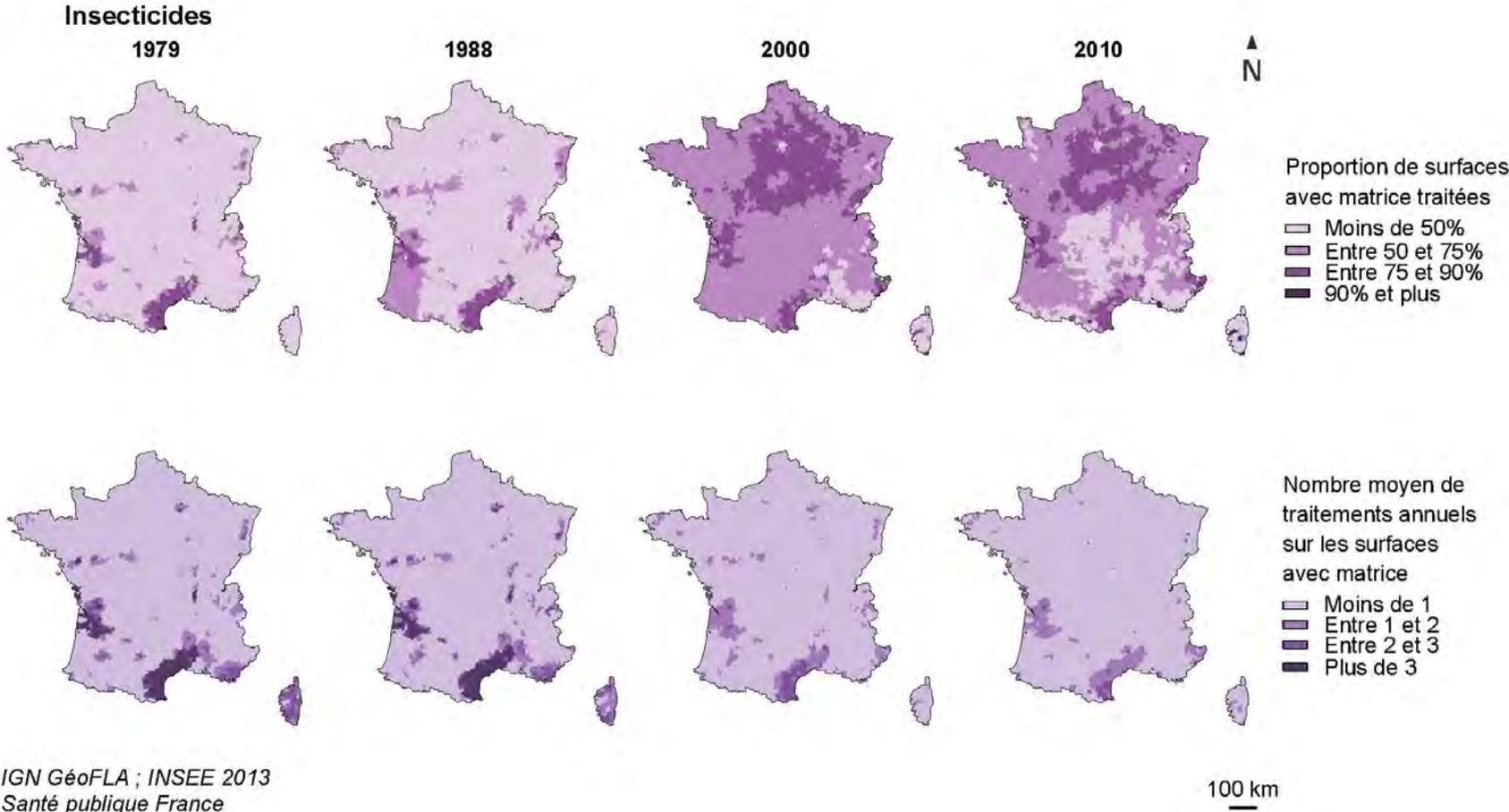


Figure 8. Distribution spatiale de la proportion de surfaces d'intérêt traitées par insecticides et du nombre moyen de traitements annuels en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)



5.2.2 Famille chimique des aryloxy-acides et sa substance active 2,4-D

5.2.2.1 Évolution temporelle

L'évolution temporelle montre que la proportion de surfaces d'intérêt traitées par les aryloxy-acides est de l'ordre de 51 % de 1979 à 1983, puis diminue. Elle reste stable à 30 % de 1993 à 2009, puis chute en 2010 à 20 % (Figure 9). L'évolution de la proportion de surfaces traitées par 2,4-D présente des tendances similaires avec des valeurs plus faibles passant de 23 % en 1979 à 4 % en 2010. La diminution observée du 2,4-D au cours du temps s'explique par le remplacement progressif de cette substance active par d'autres herbicides plus spécifiques et mieux adaptés aux différentes cultures. Cependant, cet herbicide est toujours homologué et donc utilisé, contrairement à certains de ces remplaçants qui ont été retirés. La diminution observée dans la famille chimique des aryloxy-acides est liée à la diminution de l'utilisation de la substance active 2,4-D qui est son principal représentant.

Le nombre moyen de traitements annuels présente une évolution temporelle semblable à celle de la proportion pour les aryloxy-acides et 2,4-D respectivement, car un seul traitement annuel sur les cultures traitées est réalisé (Figure 10).

L'évolution temporelle de la quantité de 2,4-D diffusée suit une courbe similaire à celle de la proportion et du nombre moyen de traitements annuels avec une diminution beaucoup plus marquée cependant entre 1983 et 1986. Dans les premières années, 800 kg en moyenne sont diffusés sur les surfaces d'intérêt au sein des cantons (Figure 11). La quantité totale diminue à 185 kg dans les années 1990 et 2000, puis à moins de 84 kg en 2010. Si la quantité diffusée est rapportée à l'hectare, les mêmes tendances sont observées (Figure 11). On passe de 108 g/ha toutes cultures concernées par les matrices au sein du canton en 1979, à 12 g/ha en 2010.

Figure 9. Évolution de la proportion de surfaces d'intérêt traitées par la famille chimique des aryloxy-acides et la substance active 2,4-D en France entre 1979 et 2010

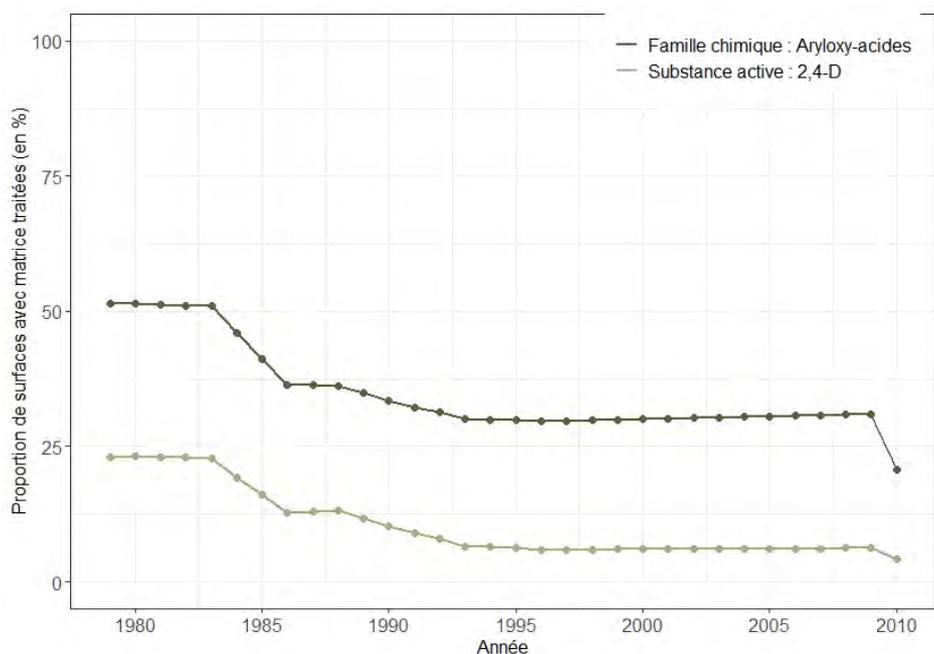


Figure 10. Évolution du nombre moyen de traitements annuels par aryloxy-acides et 2,4-D sur les surfaces d'intérêt en France entre 1979 et 2010

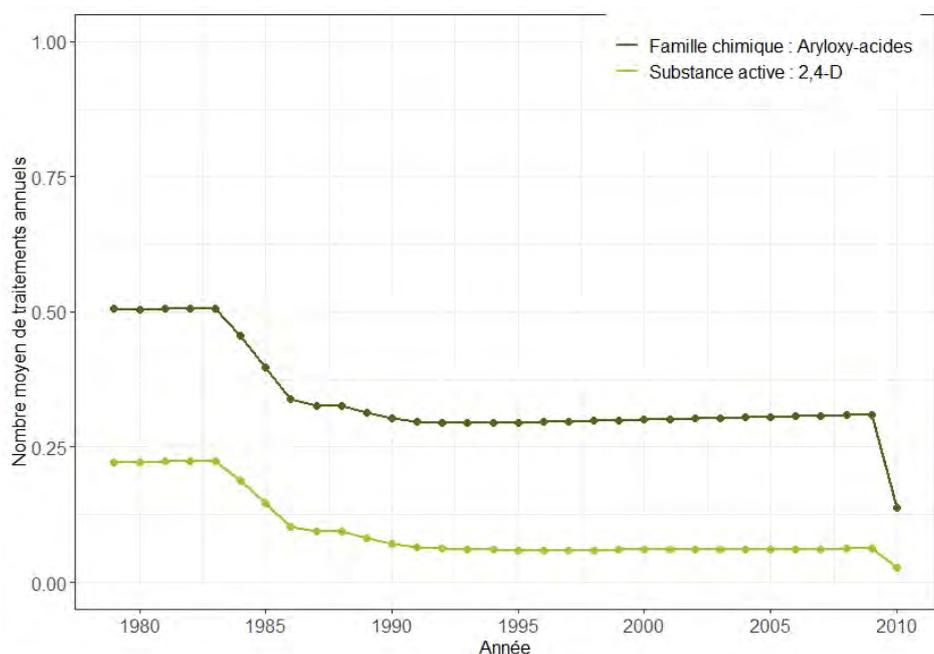
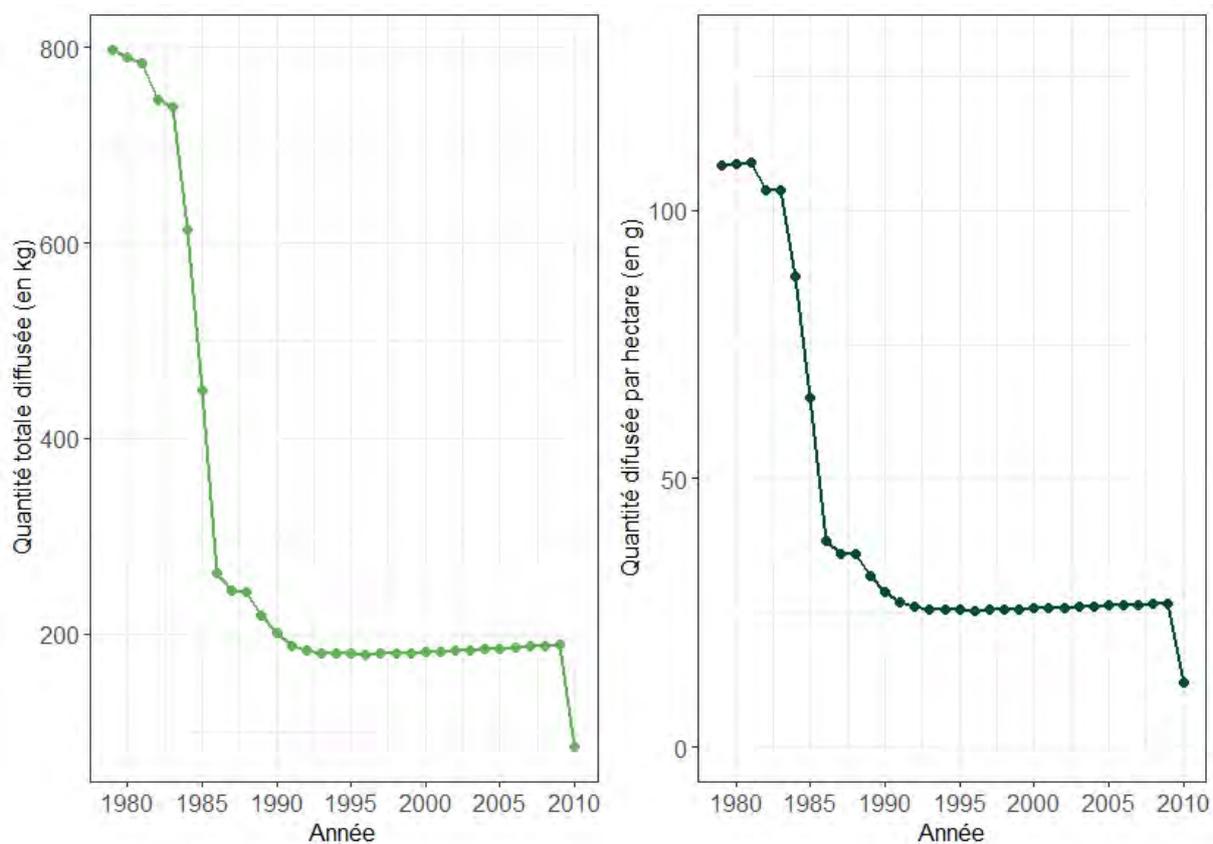


Figure 11. Évolution de la quantité annuelle moyenne totale (à gauche) et par hectare (à droite) de 2,4-D diffusée sur les surfaces d'intérêt en France entre 1979 et 2010



5.2.2.2 Répartition spatiale de la famille chimique des aryloxy-acides

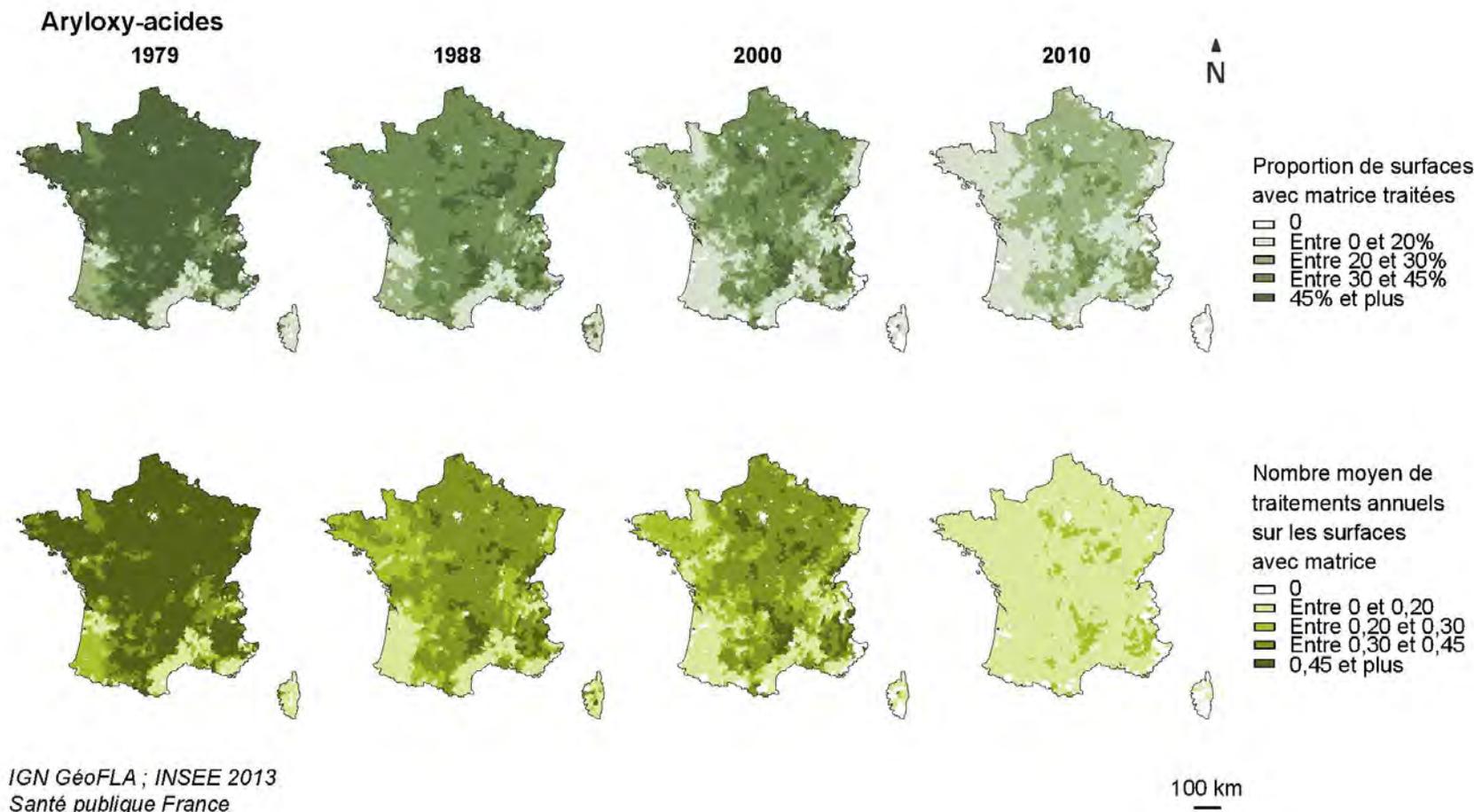
Les valeurs régionales sont présentées dans le Tableau 8 et la distribution spatiale sur la Figure 12. La proportion de surfaces traitées et le nombre moyen de traitements annuels présentent la même distribution spatiale. En 1979, la proportion de surfaces traitées par aryloxy-acides est supérieure à 45 % sur une grande partie du territoire. Le Sud-Ouest et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur ont la proportion la plus faible. La proportion diminue au fil des quatre recensements. En 2000, l'Est et l'Ouest sont les régions les moins exposées. Ce sont les régions de la partie Centre (Bourgogne-Franche-Comté, Centre-Val de Loire, Hauts-de-France et Île-de-France), du Massif Central et une partie du Sud-Est, qui ont la proportion la plus élevée, mais elle diminue en 2010.

Dans le Tableau S5 de l'Annexe 3 sont indiqués le nombre et pourcentage de cantons par catégorie des différents indicateurs : proportion de surfaces traitées, nombre moyen de traitements annuels, quantité totale diffusée et quantité diffusée par hectare.

Tableau 8. Proportion de surfaces d'intérêt traitées par aryloxy-acides, et nombre moyen de traitements annuels selon la région et l'année de recensement

| Régions | Aryloxy-acides | | | |
|--|----------------|------|------|------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Proportion de surfaces traitées (%) | | | | |
| Île-de-France | 56 | 42 | 41 | 28 |
| Centre-Val de Loire | 59 | 42 | 40 | 27 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 61 | 42 | 38 | 26 |
| Normandie | 59 | 41 | 32 | 21 |
| Hauts-de-France | 61 | 42 | 38 | 25 |
| Grand-Est | 60 | 41 | 35 | 24 |
| Pays de la Loire | 49 | 35 | 23 | 17 |
| Bretagne | 52 | 37 | 23 | 16 |
| Nouvelle Aquitaine | 44 | 28 | 20 | 15 |
| Occitanie | 34 | 26 | 22 | 18 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 45 | 33 | 25 | 18 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 27 | 22 | 21 | 14 |
| Corse | 4 | 8 | 5 | 2 |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| Île-de-France | 0,55 | 0,40 | 0,41 | 0,19 |
| Centre-Val de Loire | 0,58 | 0,39 | 0,40 | 0,18 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 0,60 | 0,39 | 0,38 | 0,17 |
| Normandie | 0,59 | 0,37 | 0,32 | 0,14 |
| Hauts-de-France | 0,61 | 0,40 | 0,38 | 0,16 |
| Grand-Est | 0,60 | 0,38 | 0,35 | 0,16 |
| Pays de la Loire | 0,48 | 0,27 | 0,23 | 0,11 |
| Bretagne | 0,51 | 0,30 | 0,23 | 0,10 |
| Nouvelle Aquitaine | 0,42 | 0,23 | 0,20 | 0,10 |
| Occitanie | 0,33 | 0,24 | 0,22 | 0,12 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 0,44 | 0,31 | 0,25 | 0,12 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 0,27 | 0,21 | 0,21 | 0,09 |
| Corse | 0,04 | 0,08 | 0,05 | 0,01 |

Figure 12. Distribution spatiale de la proportion de surfaces d'intérêt traitées par la famille chimique des aryloxy-acides et du nombre moyen de traitements annuels en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)



5.2.2.3 Répartition spatiale de la substance active 2,4-D

Le Tableau 9 présente les valeurs par région et la Figure 13 présente l'évolution de la distribution spatiale de la proportion de surfaces traitées par 2,4-D. En 1979, plus de 20 % des surfaces sont traitées sur l'ensemble de la France. Seules la côte méditerranéenne et la Gironde ont une proportion plus faible (et, moins visibles, les autres vignobles). En 1988, les zones qui étaient les plus traitées diminuent, excepté la Bretagne, la Manche et les Pays de la Loire. En 2000, ces régions ont une proportion qui diminue fortement. La partie Centre-Nord, ainsi que les départements de l'Ardèche, de l'Aveyron et de la Lozère ont la proportion la plus élevée (entre 5 et 10 %). En 2010, la partie Centre-Nord devient plus hétérogène.

Le nombre moyen de traitements annuels par 2,4-D suit une tendance similaire à celle de la proportion pour les recensements de 1979 et 2000, mais la tendance est différente en 1988 et 2010 (Figure 13). En 1988, le nombre moyen de traitements est plus élevé dans toute la partie du Nord-Ouest, ainsi que dans certains départements plus à l'Est comme le Rhin par exemple. En 2010, le nombre de traitements est homogène sur le territoire et particulièrement faible.

La quantité totale de 2,4-D diffusée sur les surfaces d'intérêt est, en 1979, supérieure à 100 kg en moyenne par canton sur la plus grande partie de la France (Figure 14). Les zones qui ont la quantité la plus faible sont les zones montagneuses, la côte méditerranéenne et la Gironde. Le recensement de 1988 présente une légère diminution mais la distribution spatiale est similaire à celle de 1979. En 2000 et 2010, la représentation spatiale est proche et montre une quantité diffusée plus élevée dans le Nord (Nord-Ouest et Centre-Nord), et au Centre-Sud.

La distribution spatiale de la quantité annuelle moyenne diffusée par hectare de 2,4-D est relativement homogène sur le territoire en 1979 et 1988, exception faite des zones viticoles et certaines zones montagneuses (Figure 14). Les recensements de 2000 et 2010 présentent une distribution plus hétérogène avec des quantités moyennes à l'hectare pour les cultures concernées par les matrices plus faibles dans l'Ouest et très variables à l'Est. Le phénomène de diminution est cependant constant au cours du temps.

Dans le Tableau S5 de l'Annexe 3 est indiqué le nombre de cantons, ainsi que leur pourcentage, par catégorie pour chaque indicateur.

Tableau 9. Proportion de surfaces d'intérêt traitées par 2,4-D, nombre moyen de traitements annuels, quantité totale annuelle diffusée et quantité annuelle moyenne par hectare diffusée selon la région et l'année de recensement

| Régions | 2,4-D | | | |
|---|-------|------|------|------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Proportion de surfaces traitées (%) | | | | |
| Île-de-France | 25 | 13 | 8 | 6 |
| Centre-Val de Loire | 25 | 13 | 8 | 5 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 25 | 12 | 8 | 5 |
| Normandie | 27 | 16 | 6 | 4 |
| Hauts-de-France | 24 | 11 | 8 | 5 |
| Grand-Est | 25 | 12 | 7 | 5 |
| Pays de la Loire | 27 | 21 | 5 | 3 |
| Bretagne | 27 | 20 | 5 | 3 |
| Nouvelle Aquitaine | 22 | 13 | 4 | 3 |
| Occitanie | 16 | 9 | 4 | 4 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 19 | 10 | 5 | 4 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 11 | 5 | 4 | 3 |
| Corse | 2 | 2 | 1 | 0 |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| Île-de-France | 0,24 | 0,10 | 0,08 | 0,04 |
| Centre-Val de Loire | 0,24 | 0,10 | 0,08 | 0,04 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 0,25 | 0,10 | 0,08 | 0,03 |
| Normandie | 0,27 | 0,11 | 0,06 | 0,03 |
| Hauts-de-France | 0,24 | 0,09 | 0,08 | 0,03 |
| Grand-Est | 0,24 | 0,10 | 0,07 | 0,03 |
| Pays de la Loire | 0,26 | 0,12 | 0,05 | 0,02 |
| Bretagne | 0,26 | 0,12 | 0,05 | 0,02 |
| Nouvelle Aquitaine | 0,20 | 0,08 | 0,04 | 0,02 |
| Occitanie | 0,15 | 0,07 | 0,04 | 0,02 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 0,19 | 0,08 | 0,05 | 0,02 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 0,11 | 0,05 | 0,04 | 0,02 |
| Corse | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,00 |
| Quantité totale annuelle diffusée (kg) | | | | |
| Île-de-France | 1 131 | 323 | 281 | 122 |
| Centre-Val de Loire | 1 540 | 456 | 375 | 166 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 734 | 214 | 186 | 84 |
| Normandie | 563 | 197 | 145 | 67 |
| Hauts-de-France | 836 | 275 | 239 | 105 |
| Grand-Est | 962 | 281 | 244 | 111 |
| Pays de la Loire | 693 | 276 | 128 | 69 |
| Bretagne | 557 | 228 | 121 | 57 |
| Nouvelle Aquitaine | 670 | 183 | 108 | 57 |
| Occitanie | 456 | 138 | 93 | 48 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 352 | 103 | 70 | 36 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 195 | 59 | 50 | 20 |
| Corse | 16 | 11 | 5 | 2 |

Suite du tableau 9

| Régions | 2,4-D | | | |
|--|-------|------|------|------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Quantité annuelle moyenne diffusée par hectare (g/ha) | | | | |
| Île-de-France | 115 | 40 | 36 | 16 |
| Centre-Val de Loire | 116 | 40 | 35 | 16 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 116 | 39 | 33 | 15 |
| Normandie | 125 | 42 | 28 | 12 |
| Hauts-de-France | 113 | 38 | 33 | 14 |
| Grand-Est | 115 | 39 | 30 | 14 |
| Pays de la Loire | 123 | 42 | 20 | 10 |
| Bretagne | 123 | 42 | 20 | 9 |
| Nouvelle Aquitaine | 109 | 30 | 17 | 8 |
| Occitanie | 80 | 26 | 19 | 10 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 92 | 31 | 22 | 10 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 51 | 19 | 18 | 8 |
| Corse | 8 | 8 | 4 | 1 |

Figure 13. Distribution spatiale de la proportion de surfaces d'intérêt traitées par 2,4-D et du nombre moyen de traitements annuels en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)

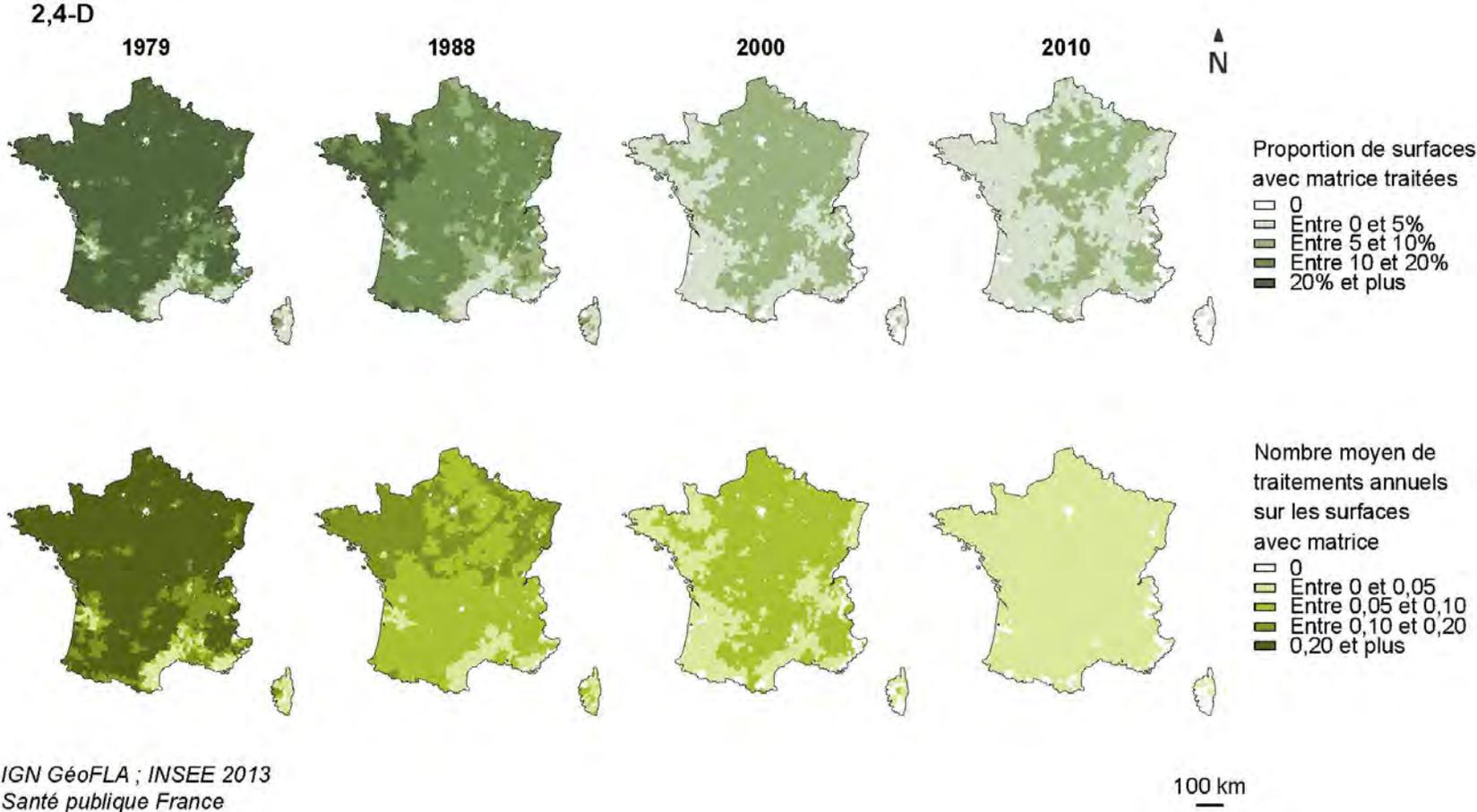
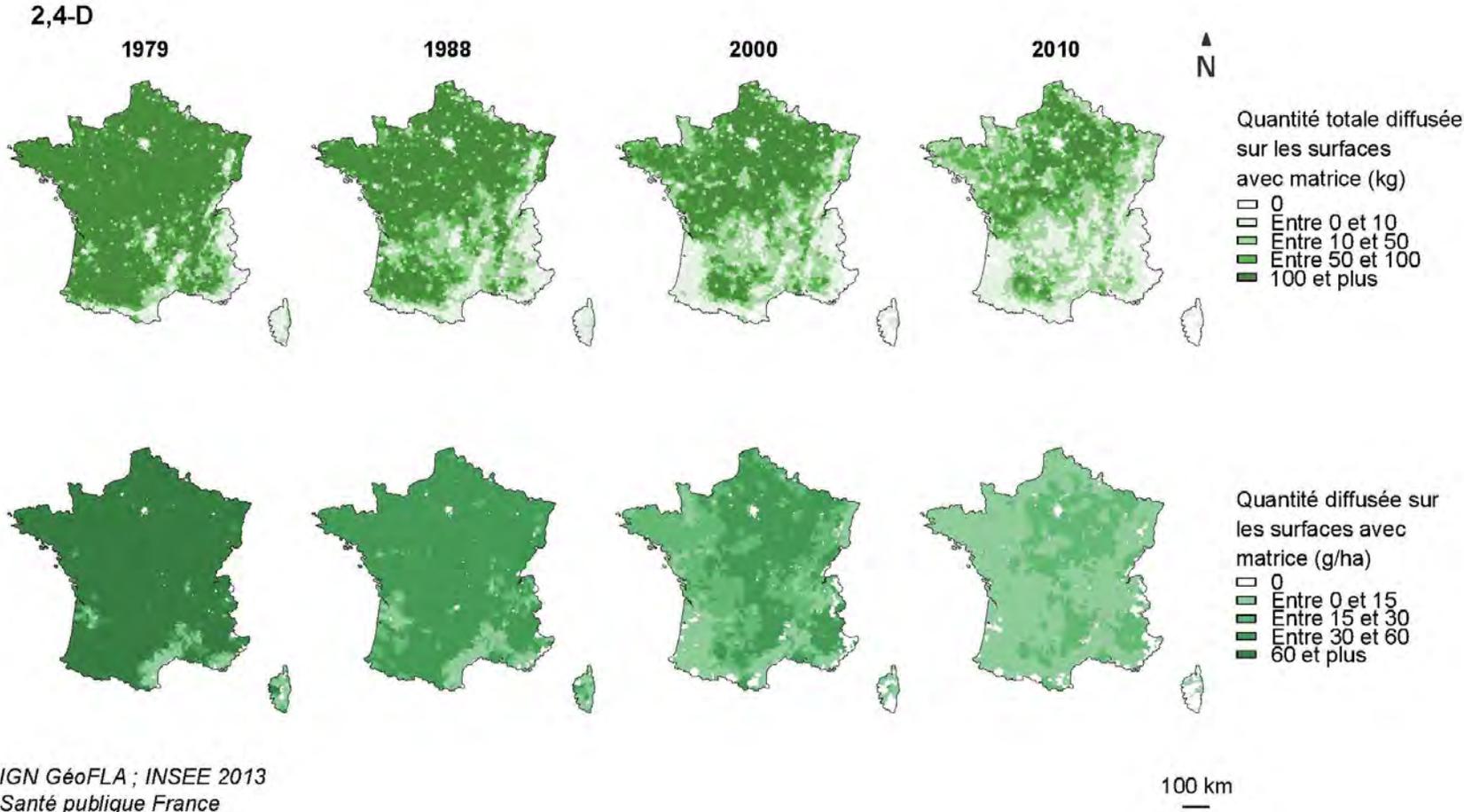


Figure 14. Distribution spatiale de la quantité totale annuelle de 2,4-D diffusée sur les surfaces d'intérêt et de la quantité annuelle moyenne diffusée par hectare en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)



5.3 Description de l'exposition professionnelle aux pesticides

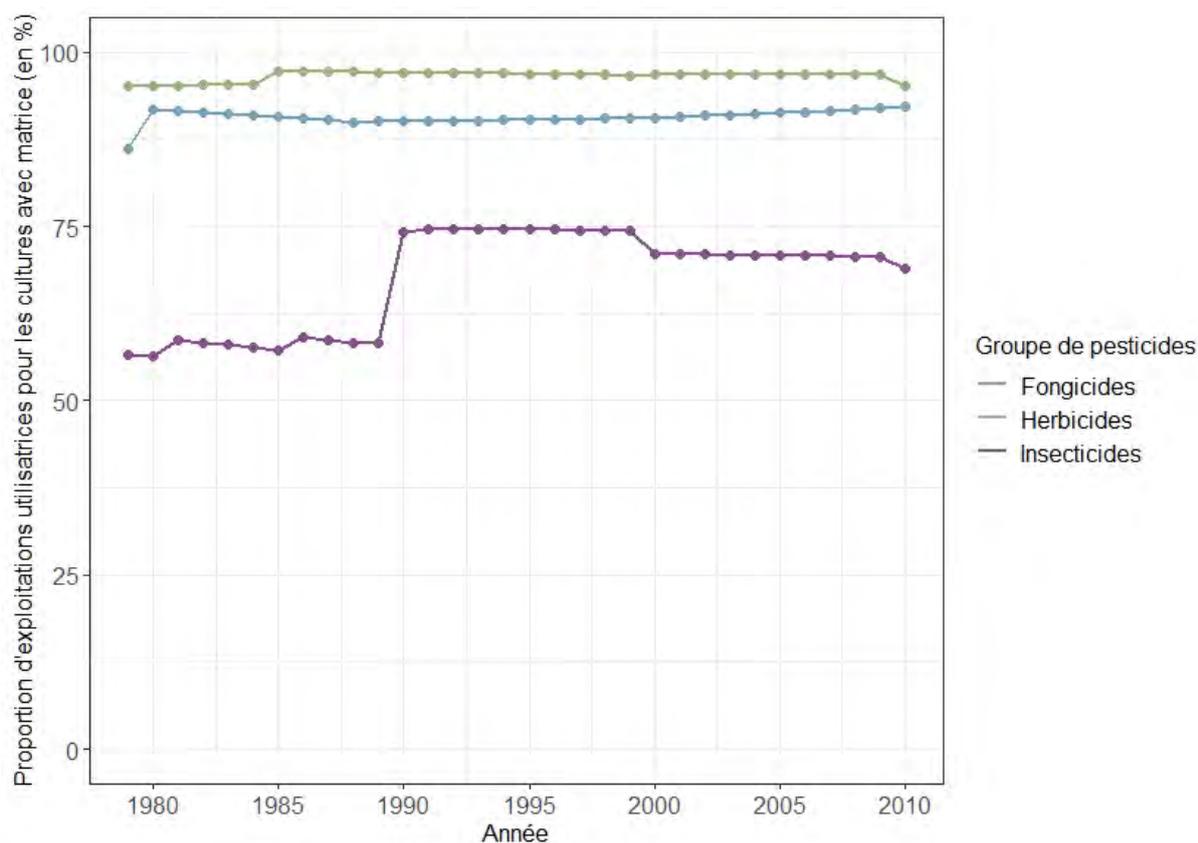
Les résultats de l'exposition professionnelle sont illustrés par les indicateurs calculés sur les exploitations uniquement.

5.3.1 Grands groupes de pesticides

5.3.1.1 Évolution temporelle

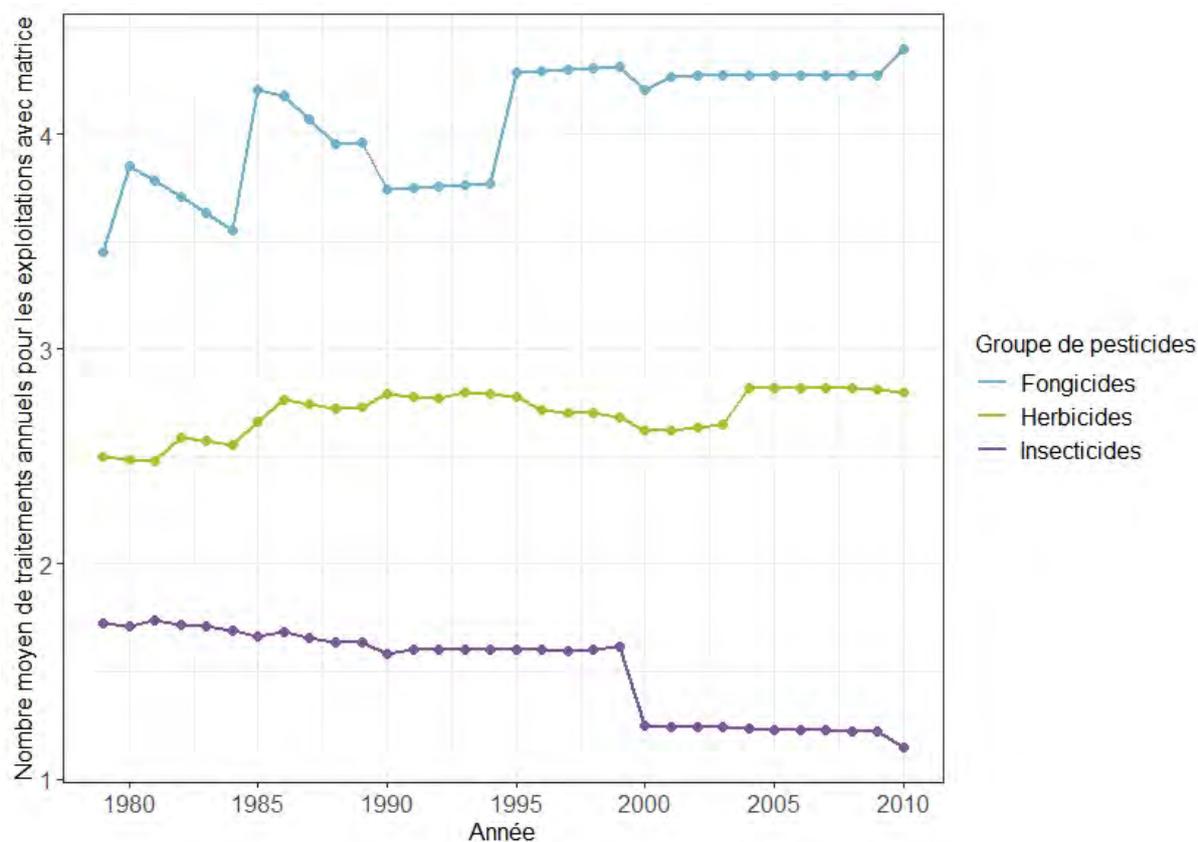
L'évolution temporelle montre que la proportion d'exploitations utilisant des herbicides pour les cultures d'intérêt présente un plafond proche de 100% entre 1979 et 2010 (Figure 15). La proportion d'exploitations utilisant des fongicides dépasse 90 % dès 1980. La proportion d'exploitations utilisant des insecticides pour les cultures d'intérêt est d'environ 57 % jusqu'à la fin des années 1980, puis augmente avec un plafond à 74 % qui diminue légèrement à 70 % à partir de 2000.

Figure 15. Évolution de la proportion d'exploitations utilisant des fongicides, herbicides et insecticides pour les cultures d'intérêt entre 1979 et 2010.



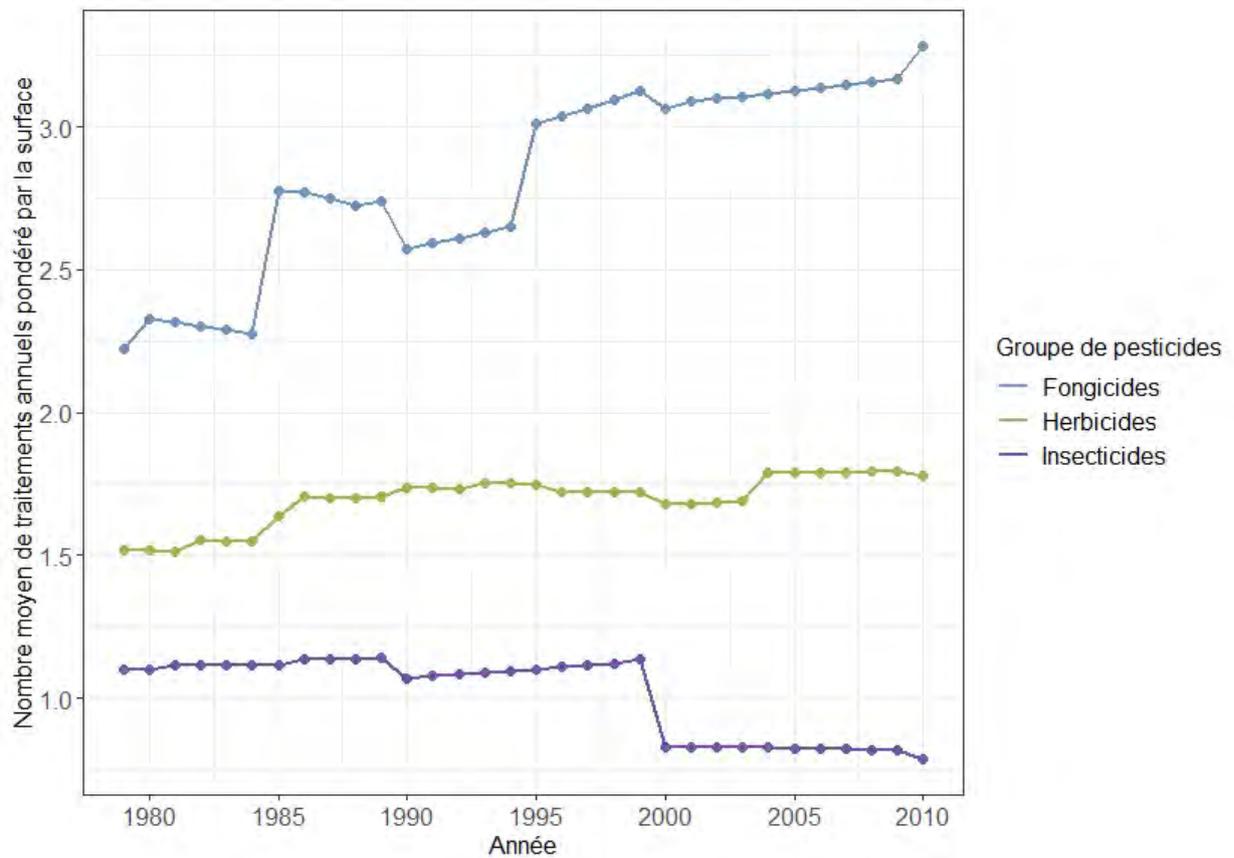
Pour le nombre moyen de traitements annuels, l'indicateur pour les fongicides a plusieurs augmentations et diminutions entre 1979 et 1995, puis il se stabilise à 4,3 traitements annuels en moyenne (Figure 16). Les herbicides présentent une légère augmentation du nombre moyen de traitements annuels entre 1979 et 1995, qui diminue légèrement ensuite pour remonter en 2004 et attendre 2,8 traitements annuels en moyenne. Les insecticides ont un nombre moyen de traitements annuels stable jusqu'en 1999 qui diminue en 2000 pour se stabiliser à plus d'un traitement.

Figure 16. Évolution du nombre moyen de traitements annuels par fongicides, herbicides et insecticides pour les exploitations avec matrice entre 1979 et 2010



Le nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface des cultures avec matrice est plus faible pour les trois groupes de pesticides par comparaison à l'indicateur non pondéré (Figure 17). Les courbes suivent les mêmes évolutions que celle du nombre moyen de traitements annuels pour les trois groupes.

Figure 17. Évolution du nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface par fongicides, herbicides et insecticides pour les exploitations avec matrice entre 1979 et 2010



5.3.1.2 Répartition spatiale

Les valeurs des régions pour le recensement de 2010 sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10. Proportion d'exploitations utilisatrices pour les cultures avec matrice et nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface, en fonction des groupes de pesticides et des régions en 2010

| Régions | Nombre d'exploitations composées de cultures avec matrice (% sur l'ensemble des exploitations) | Proportion d'exploitations utilisatrices (%) | | |
|----------------------------|--|--|------------|--------------|
| | | Fongicides | Herbicides | Insecticides |
| Île-de-France | 4 188 (86) | 99 | 98 | 80 |
| Centre-Val de Loire | 20 194 (82) | 98 | 97 | 80 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 19 800 (67) | 97 | 92 | 75 |
| Normandie | 19 732 (56) | 89 | 99 | 75 |
| Hauts-de-France | 22 348 (84) | 97 | 99 | 81 |
| Grand-Est | 40 588 (83) | 97 | 93 | 66 |
| Pays de la Loire | 24 141 (73) | 93 | 99 | 77 |
| Bretagne | 26 276 (81) | 91 | 100 | 76 |
| Nouvelle Aquitaine | 59 294 (72) | 80 | 96 | 68 |
| Occitanie | 56 064 (72) | 95 | 93 | 64 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 37 207 (60) | 94 | 96 | 56 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 11 366 (52) | 100 | 76 | 48 |
| Corse | 341 (12) | 94 | 70 | 48 |

Suite du tableau 10

| Régions | Nombre moyen de traitements annuels | | | Nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface | | |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------|--------------|--|------------|--------------|
| | Fongicides | Herbicides | Insecticides | Fongicides | Herbicides | Insecticides |
| Île-de-France | 4,29 | 3,11 | 1,16 | 2,98 | 1,94 | 0,78 |
| Centre-Val de Loire | 4,03 | 2,75 | 1,21 | 3,10 | 1,84 | 0,81 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 4,57 | 2,46 | 1,03 | 4,00 | 1,74 | 0,78 |
| Normandie | 3,46 | 3,35 | 1,04 | 2,13 | 1,97 | 0,64 |
| Hauts-de-France | 6,37 | 3,87 | 1,36 | 3,17 | 1,99 | 0,74 |
| Grand-Est | 6,28 | 2,40 | 1,00 | 5,17 | 1,61 | 0,68 |
| Pays de la Loire | 3,54 | 3,35 | 1,07 | 2,30 | 1,89 | 0,63 |
| Bretagne | 3,45 | 3,66 | 1,17 | 1,75 | 1,98 | 0,60 |
| Nouvelle Aquitaine | 3,95 | 2,89 | 1,31 | 2,88 | 1,91 | 0,90 |
| Occitanie | 4,43 | 2,12 | 1,30 | 3,90 | 1,54 | 1,09 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 3,29 | 2,90 | 0,92 | 2,52 | 1,90 | 0,60 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 5,59 | 1,19 | 0,81 | 5,05 | 0,96 | 0,72 |
| Corse | 6,14 | 0,84 | 0,89 | 6,00 | 0,78 | 0,84 |

En gras, les valeurs correspondent aux régions où la proportion d'exploitations utilisatrices est supérieure ou égale à 90 % et où le nombre moyen de traitements annuels est supérieur à 3.

La distribution de la proportion d'exploitations utilisant des fongicides pour les cultures d'intérêt est similaire pour les 4 recensements (Figure 18). La proportion est supérieure à 90 % sur l'ensemble de la France, excepté dans le Sud-Ouest, les métropoles et les zones montagneuses. Le nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface présente la même distribution. Une disparité Nord/Sud est observée. Le Nord présente une augmentation du nombre de traitements annuels de 1979 à 2000, alors que le Sud, et en particulier le Centre, montre une diminution.

La proportion d'exploitations utilisant des herbicides pour les cultures d'intérêt est très élevée sur l'ensemble de la France (Figure 19). Le Sud-Est a une proportion plus faible en 1979, qui augmente dès 1988. À partir de 2000, l'Est est plus hétérogène avec des zones moins exposées. En 2010, la Gironde et le Sud-Est sont les régions où la proportion est la plus faible. Pour le nombre moyen de traitements annuels par herbicides, une augmentation est observée entre 1979 et 1988, en particulier en Bretagne. Ce nombre est plus élevé dans l'Ouest, la Normandie et les Hauts de France. Lorsque le nombre moyen de traitements annuels des herbicides est pondéré par la surface, la distribution spatiale apparaît différente de celle du nombre de traitements non pondéré, avec moins de disparités sur le territoire et une valeur moyenne plus faible. Une augmentation du nombre de traitements pondéré est observée dans le Sud en 2010.

La distribution spatiale montre que la proportion d'exploitations utilisant des insecticides pour les cultures d'intérêt est importante sur la côte ouest méditerranéenne, en Gironde, dans la Marne, dans la vallée de la Loire en 1979 et 1988 (Figure 20), et plus globalement sur les cantons viticoles. Une différence est observée sur ces deux années dans le Sud : en 1979, la proportion est plus élevée dans le Centre-Sud que dans le Sud-Ouest, et cela s'inverse en 1988. On observe à partir de 2000, une forte augmentation de la proportion d'exploitations utilisant des insecticides avec une distinction Nord/Sud importante et des proportions beaucoup plus élevées dans le Nord. Le nombre moyen de traitements annuels présente la même distribution que la proportion. Quelle que soit l'année de recensement, les zones qui ont la proportion d'exploitations utilisant des insecticides la plus élevée sont celles qui ont un nombre de traitements plus élevé. Par rapport aux fongicides et aux herbicides, le nombre moyen de traitements par insecticides est plus faible (environ 1 traitement contre 3 pour les fongicides et les herbicides pour l'indicateur non pondéré). Si le nombre moyen de traitements annuels est pondéré par la surface, une homogénéité est observée avec en moyenne moins d'un traitement annuel dans l'ensemble de la France sur les quatre années de recensement. Les cantons viticoles (côte méditerranéenne, la Gironde, la vallée de la Loire, la Marne, etc.) ont un nombre de traitements pondéré qui reste élevé, mais diminue au cours du temps.

Le Tableau S6 de l'Annexe 3 présente le nombre et pourcentage de cantons par catégorie des indicateurs.

Figure 18. Distribution spatiale de la proportion d'exploitations utilisant des fongicides pour les cultures d'intérêt, du nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)

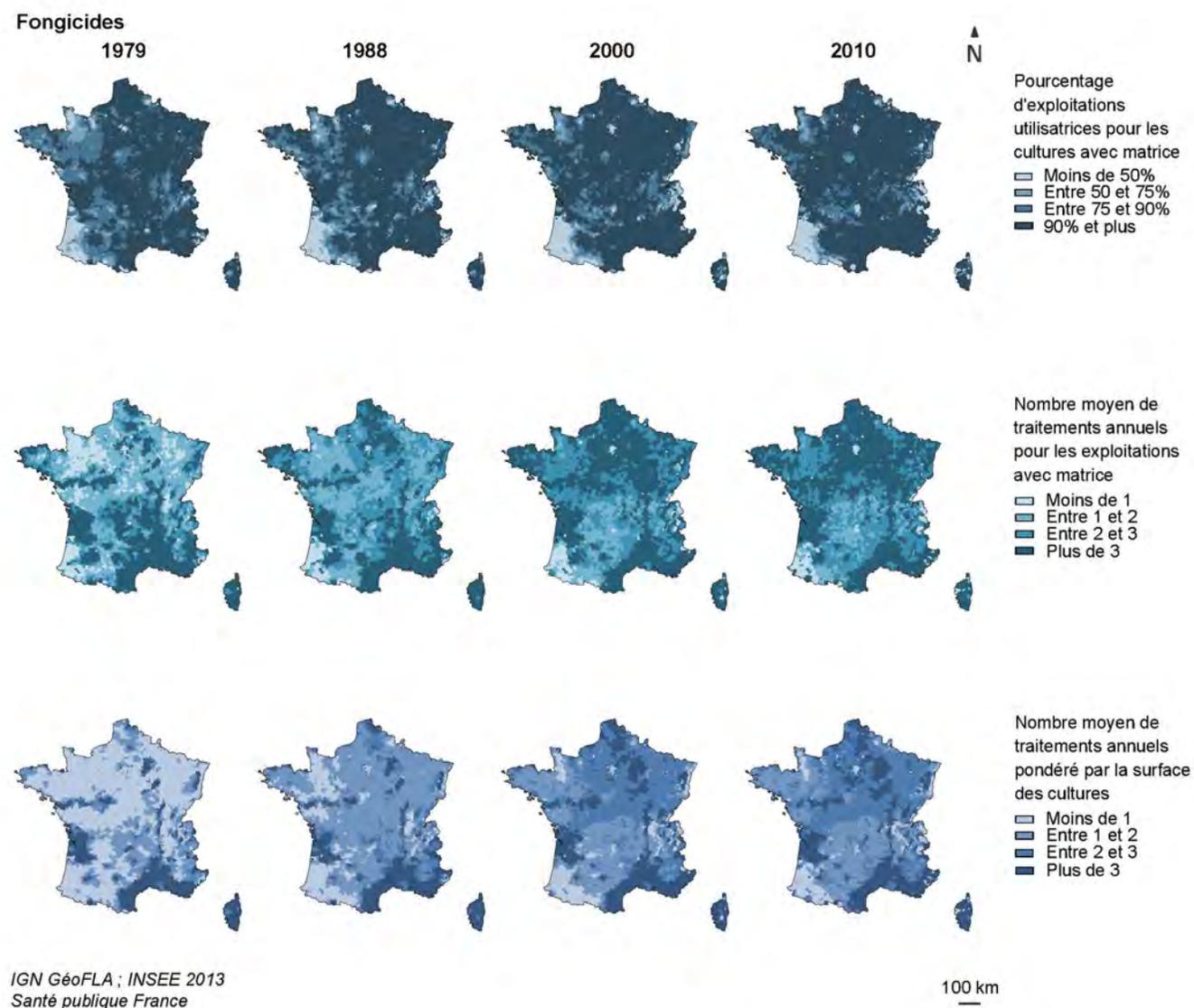


Figure 19. Distribution spatiale de la proportion d'exploitations utilisant des herbicides pour les cultures d'intérêt, du nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)

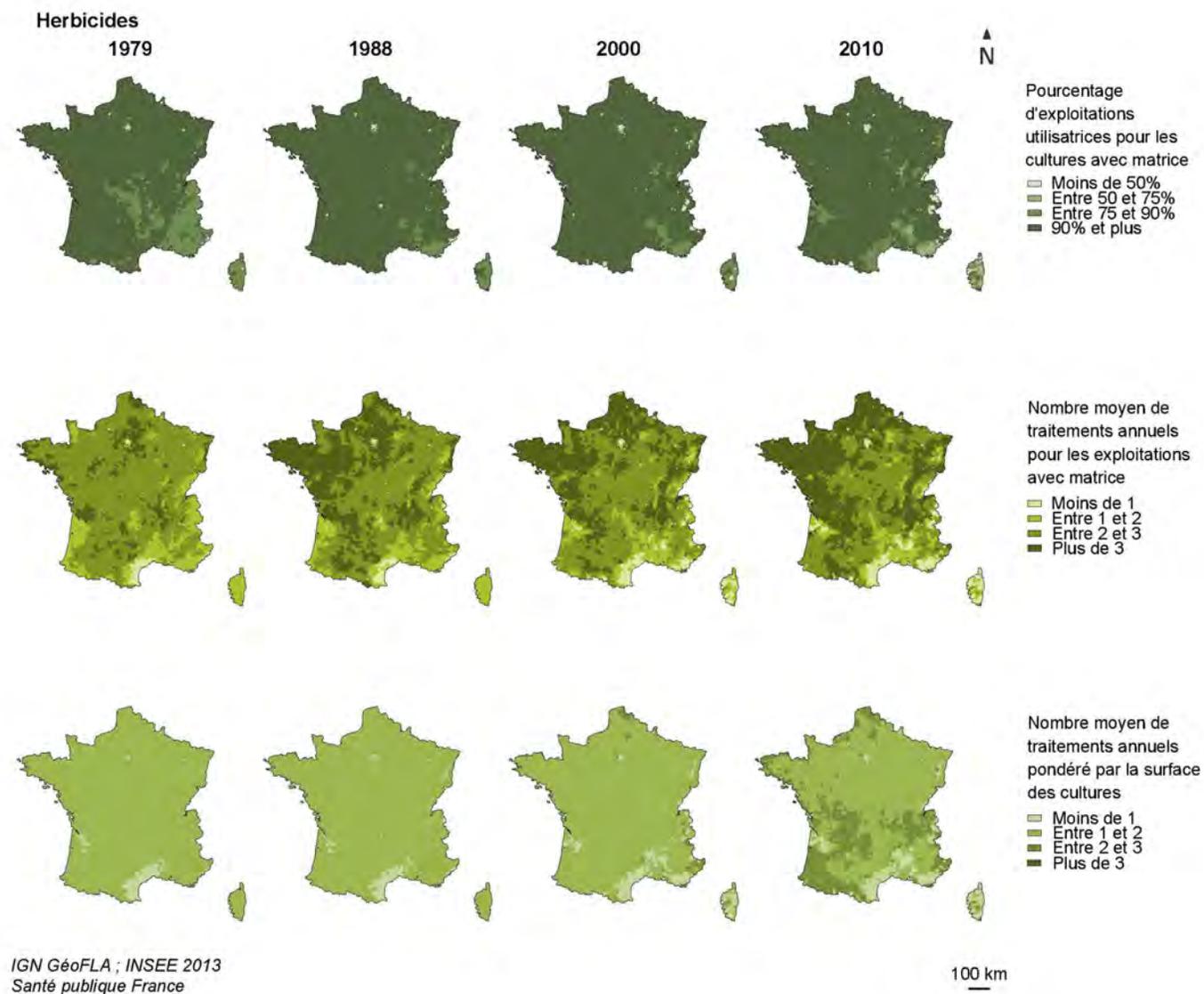
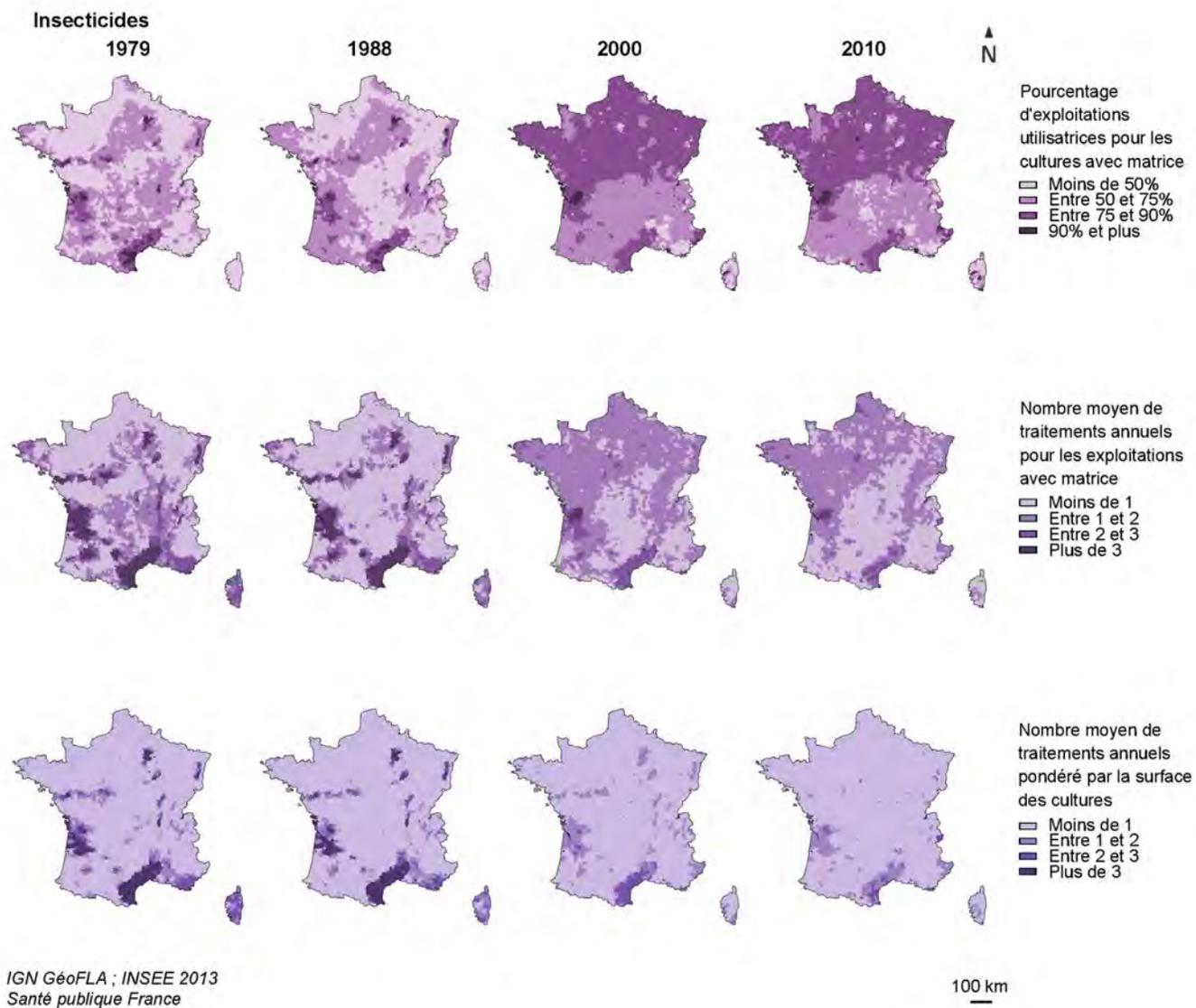


Figure 20. Distribution spatiale de la proportion d'exploitations utilisant des insecticides pour les cultures d'intérêt, du nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)



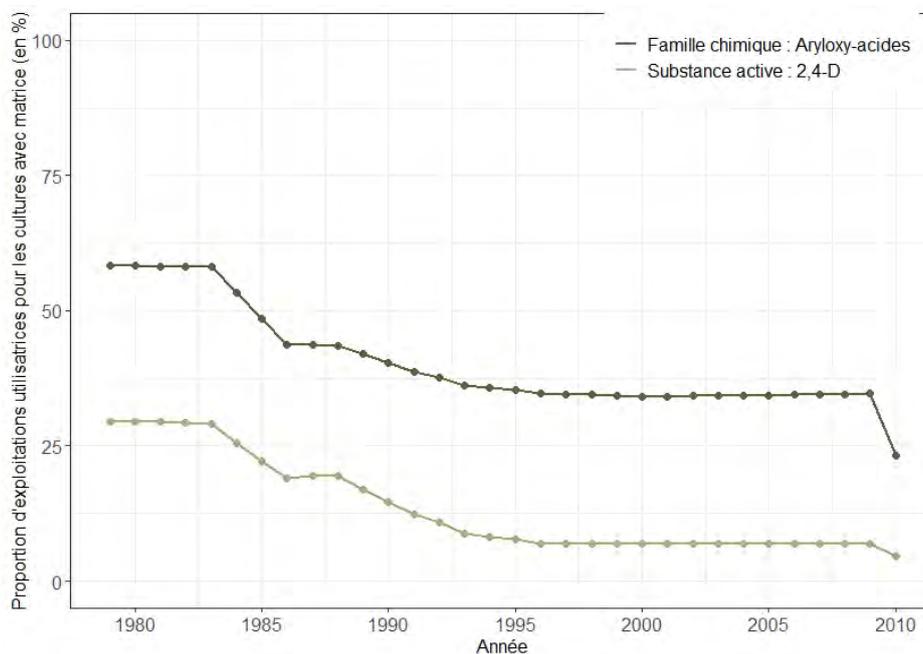
5.3.2 Famille chimique des aryloxy-acides et sa substance active 2,4-D

5.3.2.1 Évolution temporelle

L'évolution temporelle montre que la proportion d'exploitations utilisant des aryloxy-acides pour les cultures d'intérêt est élevée entre 1979 et 1983, de l'ordre de 58 % (Figure 21). Elle diminue fortement jusqu'en 1986. À partir de cette date, la diminution est plus lente et se stabilise à 34 % de 1996 à 2009. En 2010, la proportion chute à 23 %.

La proportion d'exploitations utilisant la substance active 2,4-D pour les cultures d'intérêt est stable sur les cinq premières années, de l'ordre de 29 %, puis diminue jusqu'en 1996, où elle stagne à 7 %, pour diminuer de nouveau en 2010.

Figure 21. Évolution de la proportion d'exploitations utilisant des aryloxy-acides, et sa substance active 2,4-D pour les cultures d'intérêt entre 1979 et 2010



L'évolution du nombre moyen de traitements annuels présente les mêmes valeurs que la proportion car un seul traitement annuel en moyenne est réalisé avec ces herbicides pour les exploitations qui les utilisent (Figure 22). Les courbes concernant les aryloxy-acides et le 2,4-D sont donc similaires à celles de la proportion d'exploitations utilisatrices.

Figure 22. Évolution du nombre moyen de traitements annuels par aryloxy-acides et 2,4-D pour les exploitations ayant des cultures d'intérêt entre 1979 et 2010

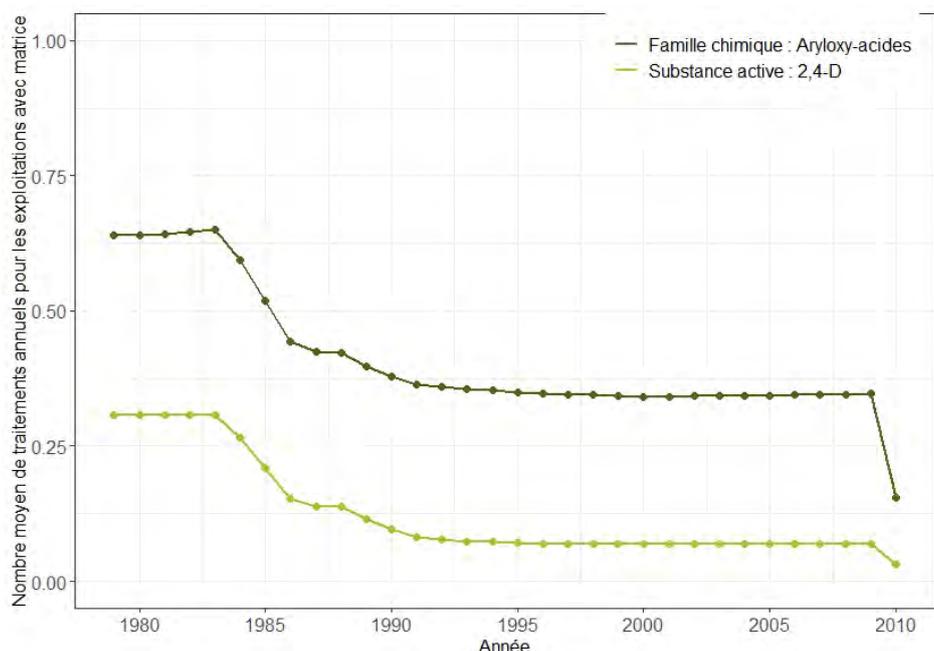
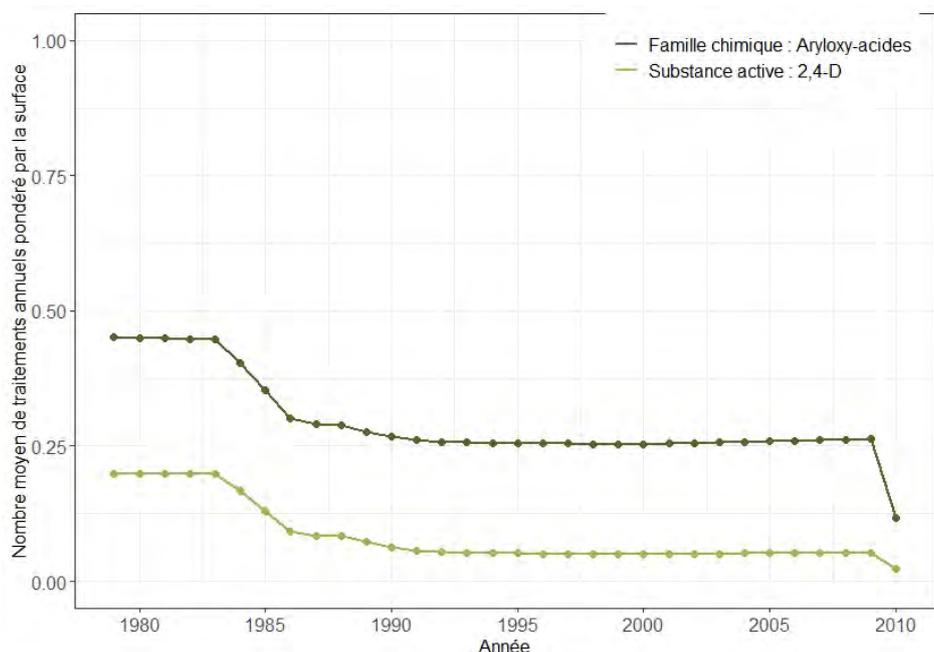


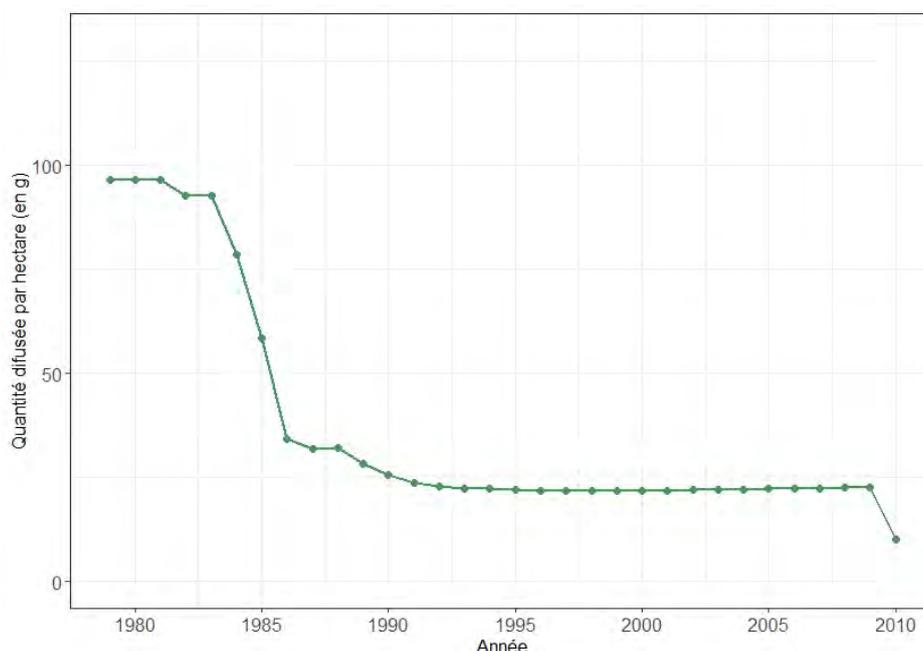
Figure 23. Évolution du nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface par aryloxy-acides et 2,4-D des exploitations ayant des cultures d'intérêt entre 1979 et 2010



La pondération par la surface donne des valeurs plus faibles du nombre moyen de traitements annuels (Figure 23). Mais la forme des courbes est proche de celle portant sur le nombre moyen de traitements annuels non pondéré.

L'évolution temporelle montre que la quantité annuelle moyenne de 2,4-D diffusée par hectare pour toutes les cultures d'intérêt au sein d'un canton est supérieure à 90 g/ha les cinq premières années, puis elle diminue considérablement pour être en dessous de 25 g/ha dès 1991 (Figure 24). Elle est stable jusqu'en 2009, puis diminue de moitié en 2010.

Figure 24. Évolution de la quantité annuelle moyenne de 2,4-D diffusée par hectare dans les exploitations ayant des cultures d'intérêt entre 1979 et 2010



5.3.2.2 Répartition spatiale de la famille chimique des aryloxy-acides

Les valeurs régionales sont présentées dans le Tableau 11 et la distribution spatiale dans la Figure 25.

En 1979, la distribution spatiale montre que la proportion d'exploitations utilisant des aryloxy-acides pour les cultures d'intérêt est élevée dans toute la partie Nord de la France, et le Centre-Sud (Figure 25). Les zones avec la proportion la plus faible sont la Provence-Alpes-Côte d'Azur, les Pyrénées, La Gironde et les Landes. En 1988, la distribution est proche de celle de 1979, avec des zones plus hétérogènes dans les territoires les plus exposés. En 2000 et 2010, la proportion d'exploitations exposées diminue et devient inférieure à 40 % sur l'ensemble du territoire. En 2010, la diminution est plus importante sur toute la partie Ouest.

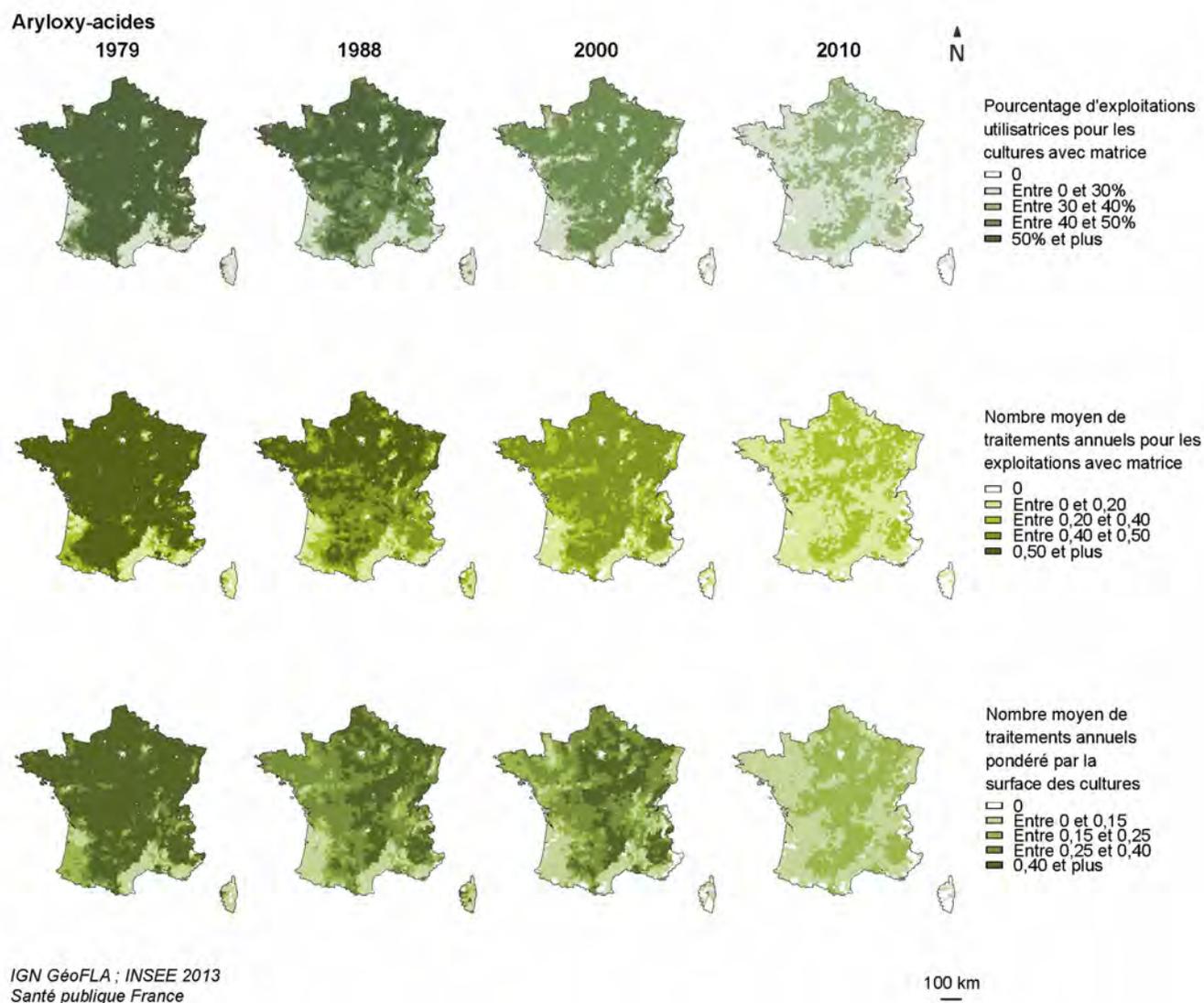
La distribution spatiale du nombre moyen de traitements annuels est similaire à celle de la proportion. Lorsque le nombre moyen de traitements annuels est pondéré par la surface, on observe quelques différences : la partie Nord-Ouest de la France a un nombre moyen de traitements annuels qui est plus faible par comparaison à l'indicateur non pondéré sur les trois derniers recensements.

Le Tableau S6 de l'Annexe 3 présente le nombre et pourcentage de cantons par catégorie des indicateurs.

Tableau 11. Proportion d'exploitations utilisant des aryloxy-acides pour les cultures d'intérêt et nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface en fonction des régions et de l'année de recensement

| Régions | Aryloxy-acides | | | |
|---|----------------|------|------|------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Proportion d'exploitations utilisatrices (%) | | | | |
| Île-de-France | 74 | 56 | 46 | 31 |
| Centre-Val de Loire | 69 | 51 | 43 | 29 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 66 | 47 | 37 | 24 |
| Normandie | 63 | 52 | 39 | 27 |
| Hauts-de-France | 74 | 53 | 46 | 30 |
| Grand-Est | 60 | 41 | 30 | 19 |
| Pays de la Loire | 66 | 52 | 38 | 27 |
| Bretagne | 70 | 55 | 42 | 28 |
| Nouvelle Aquitaine | 57 | 42 | 29 | 20 |
| Occitanie | 38 | 29 | 25 | 18 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 56 | 44 | 36 | 25 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 28 | 22 | 17 | 12 |
| Corse | 7 | 11 | 5 | 3 |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| Île-de-France | 0,83 | 0,55 | 0,46 | 0,20 |
| Centre-Val de Loire | 0,76 | 0,50 | 0,43 | 0,19 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 0,71 | 0,46 | 0,37 | 0,16 |
| Normandie | 0,71 | 0,48 | 0,39 | 0,18 |
| Hauts-de-France | 0,79 | 0,53 | 0,46 | 0,20 |
| Grand-Est | 0,64 | 0,40 | 0,30 | 0,13 |
| Pays de la Loire | 0,78 | 0,49 | 0,38 | 0,18 |
| Bretagne | 0,80 | 0,52 | 0,42 | 0,19 |
| Nouvelle Aquitaine | 0,61 | 0,39 | 0,29 | 0,13 |
| Occitanie | 0,41 | 0,28 | 0,25 | 0,12 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 0,59 | 0,43 | 0,36 | 0,17 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 0,28 | 0,21 | 0,17 | 0,08 |
| Corse | 0,07 | 0,11 | 0,05 | 0,02 |
| Nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface | | | | |
| Île-de-France | 0,55 | 0,39 | 0,41 | 0,18 |
| Centre-Val de Loire | 0,55 | 0,37 | 0,38 | 0,17 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 0,57 | 0,36 | 0,32 | 0,14 |
| Normandie | 0,50 | 0,31 | 0,25 | 0,12 |
| Hauts-de-France | 0,63 | 0,40 | 0,37 | 0,16 |
| Grand-Est | 0,51 | 0,29 | 0,23 | 0,09 |
| Pays de la Loire | 0,45 | 0,25 | 0,22 | 0,11 |
| Bretagne | 0,52 | 0,30 | 0,24 | 0,10 |
| Nouvelle Aquitaine | 0,40 | 0,25 | 0,20 | 0,09 |
| Occitanie | 0,26 | 0,18 | 0,18 | 0,10 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 0,43 | 0,31 | 0,26 | 0,12 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 0,20 | 0,16 | 0,14 | 0,07 |
| Corse | 0,05 | 0,09 | 0,04 | 0,02 |

Figure 25. Distribution spatiale de la proportion d'exploitations utilisant des aryloxy-acides pour les cultures d'intérêt, du nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)



5.3.2.3 Répartition spatiale de la substance active 2,4-D

Le Tableau 12 présente les valeurs par région et la Figure 26 la distribution spatiale.

La proportion d'exploitations utilisant du 2,4-D pour les cultures d'intérêt est supérieure à 20 % dans l'ensemble de la France en 1979, excepté la Gironde et la côte méditerranéenne (Figure 26). En 1988, une diminution sur la moitié Est de la France est observée. En 2000, le Sud-Ouest et le Sud-Est ont la proportion la plus faible. Les zones les plus exposées ont une proportion inférieure à 10 %. La distribution spatiale de 2010 est proche de celle de 2000, avec des zones plus hétérogènes dans les régions les plus exposées.

La quantité annuelle moyenne de 2,4-D diffusée par hectare montre une distribution similaire à celle de la proportion d'exploitations utilisatrices pour le recensement de 1979 (Figure 26). En 1988, on observe une distinction Nord/Sud, avec le Nord qui présente une quantité moyenne diffusée par hectare plus élevée. En 2000, le Centre-Nord et le Centre-Sud ont les valeurs les plus élevées. En 2010, la répartition est homogène avec moins de 20 g/ha diffusée sur l'ensemble du territoire.

Le nombre moyen de traitements annuels présente la même distribution sur les recensements de 1979 et 2000 que celle de la proportion d'exploitations utilisatrices pour les cultures d'intérêt, avec une diminution au fur et à mesure (Figure 27). Les régions ayant un nombre de traitements plus faible sont la Gironde et la Provence-Alpes-Côte d'Azur. En 1988, le Nord-Ouest de la France est la région la plus traitée. On observe une diminution dans les autres régions, excepté la Gironde et la Provence-Alpes-Côte d'Azur qui avait déjà des valeurs faibles en 1979. En 2010, comme pour la quantité annuelle moyenne, le nombre moyen de traitements annuels présente la même distribution sur l'ensemble du territoire.

Lorsque le nombre moyen de traitements annuels est pondéré par la surface, les valeurs sont plus faibles (Figure 27). La distribution spatiale est similaire à celle du nombre moyen de traitements non pondéré pour les recensements de 1979 et 2010. En 1988, les régions qui ont les valeurs les plus élevées sont le Nord-Ouest et certains départements d'île de France ou l'Alsace. En 2000, ce sont les régions centrales qui ont un nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface le plus élevé.

Le Tableau S6 de l'Annexe 3 présente le nombre et pourcentage de cantons par catégorie des indicateurs.

Tableau 12. Proportion d'exploitations utilisant du 2,4-D pour les cultures d'intérêt, du nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface et de la quantité annuelle moyenne diffusée par hectare en fonction des régions et de l'année de recensement

| Régions | 2,4-D | | | |
|---|-------|------|------|-------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Proportion d'exploitations utilisatrices (%) | | | | |
| Île-de-France | 38 | 26 | 9 | 6 |
| Centre-Val de Loire | 34 | 22 | 9 | 6 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 31 | 19 | 7 | 5 |
| Normandie | 38 | 29 | 8 | 5 |
| Hauts-de-France | 34 | 21 | 9 | 6 |
| Grand-Est | 28 | 17 | 6 | 4 |
| Pays de la Loire | 39 | 30 | 8 | 5 |
| Bretagne | 39 | 30 | 8 | 6 |
| Nouvelle Aquitaine | 32 | 20 | 6 | 4 |
| Occitanie | 21 | 12 | 5 | 4 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 26 | 15 | 7 | 5 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 11 | 5 | 3 | 2 |
| Corse | 3 | 3 | 1 | 1 |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| Île-de-France | 0,40 | 0,18 | 0,09 | 0,04 |
| Centre-Val de Loire | 0,35 | 0,16 | 0,09 | 0,04 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 0,32 | 0,14 | 0,07 | 0,03 |
| Normandie | 0,39 | 0,19 | 0,08 | 0,04 |
| Hauts-de-France | 0,35 | 0,16 | 0,09 | 0,04 |
| Grand-Est | 0,29 | 0,12 | 0,06 | 0,03 |
| Pays de la Loire | 0,42 | 0,20 | 0,08 | 0,04 |
| Bretagne | 0,42 | 0,20 | 0,08 | 0,04 |
| Nouvelle Aquitaine | 0,31 | 0,13 | 0,06 | 0,03 |
| Occitanie | 0,21 | 0,09 | 0,05 | 0,02 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 0,26 | 0,12 | 0,07 | 0,03 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 0,11 | 0,05 | 0,03 | 0,02 |
| Corse | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,004 |
| Nombre moyen de traitements annuels pondéré par la surface | | | | |
| Île-de-France | 0,24 | 0,10 | 0,08 | 0,04 |
| Centre-Val de Loire | 0,23 | 0,10 | 0,08 | 0,03 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 0,23 | 0,09 | 0,06 | 0,03 |
| Normandie | 0,27 | 0,12 | 0,05 | 0,02 |
| Hauts-de-France | 0,25 | 0,09 | 0,07 | 0,03 |
| Grand-Est | 0,20 | 0,08 | 0,05 | 0,02 |
| Pays de la Loire | 0,24 | 0,12 | 0,04 | 0,02 |
| Bretagne | 0,26 | 0,12 | 0,05 | 0,02 |
| Nouvelle Aquitaine | 0,19 | 0,08 | 0,04 | 0,02 |
| Occitanie | 0,12 | 0,05 | 0,04 | 0,02 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 0,18 | 0,08 | 0,05 | 0,02 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 0,08 | 0,03 | 0,03 | 0,01 |
| Corse | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,003 |

Suite du tableau 12

| Régions | 2,4-D | | | |
|--|-------|------|------|------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Quantité annuelle moyenne diffusée par hectare (g/ha) | | | | |
| Île-de-France | 114 | 39 | 35 | 16 |
| Centre-Val de Loire | 108 | 38 | 33 | 15 |
| Bourgogne-Franche-Comté | 107 | 35 | 27 | 12 |
| Normandie | 128 | 43 | 21 | 10 |
| Hauts-de-France | 115 | 38 | 32 | 14 |
| Grand-Est | 95 | 30 | 20 | 8 |
| Pays de la Loire | 115 | 39 | 19 | 10 |
| Bretagne | 121 | 41 | 20 | 9 |
| Nouvelle Aquitaine | 105 | 31 | 17 | 8 |
| Occitanie | 63 | 20 | 16 | 8 |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 86 | 31 | 22 | 11 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 37 | 14 | 12 | 6 |
| Corse | 12 | 9 | 4 | 1 |

Figure 26. Distribution spatiale de la proportion d'exploitations utilisant du 2,4-D pour les cultures d'intérêt et de la quantité annuelle moyenne diffusée par hectare en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)

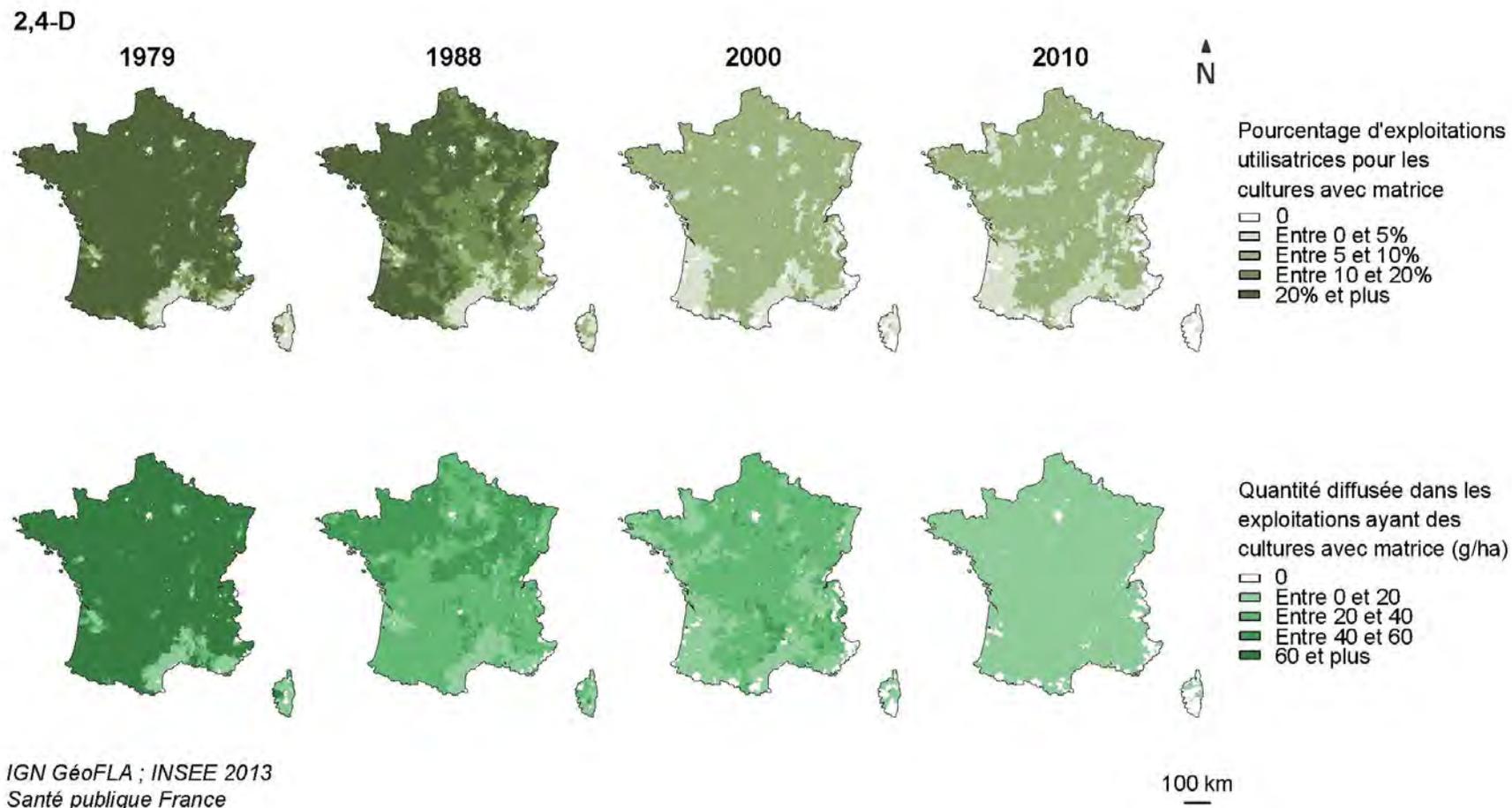
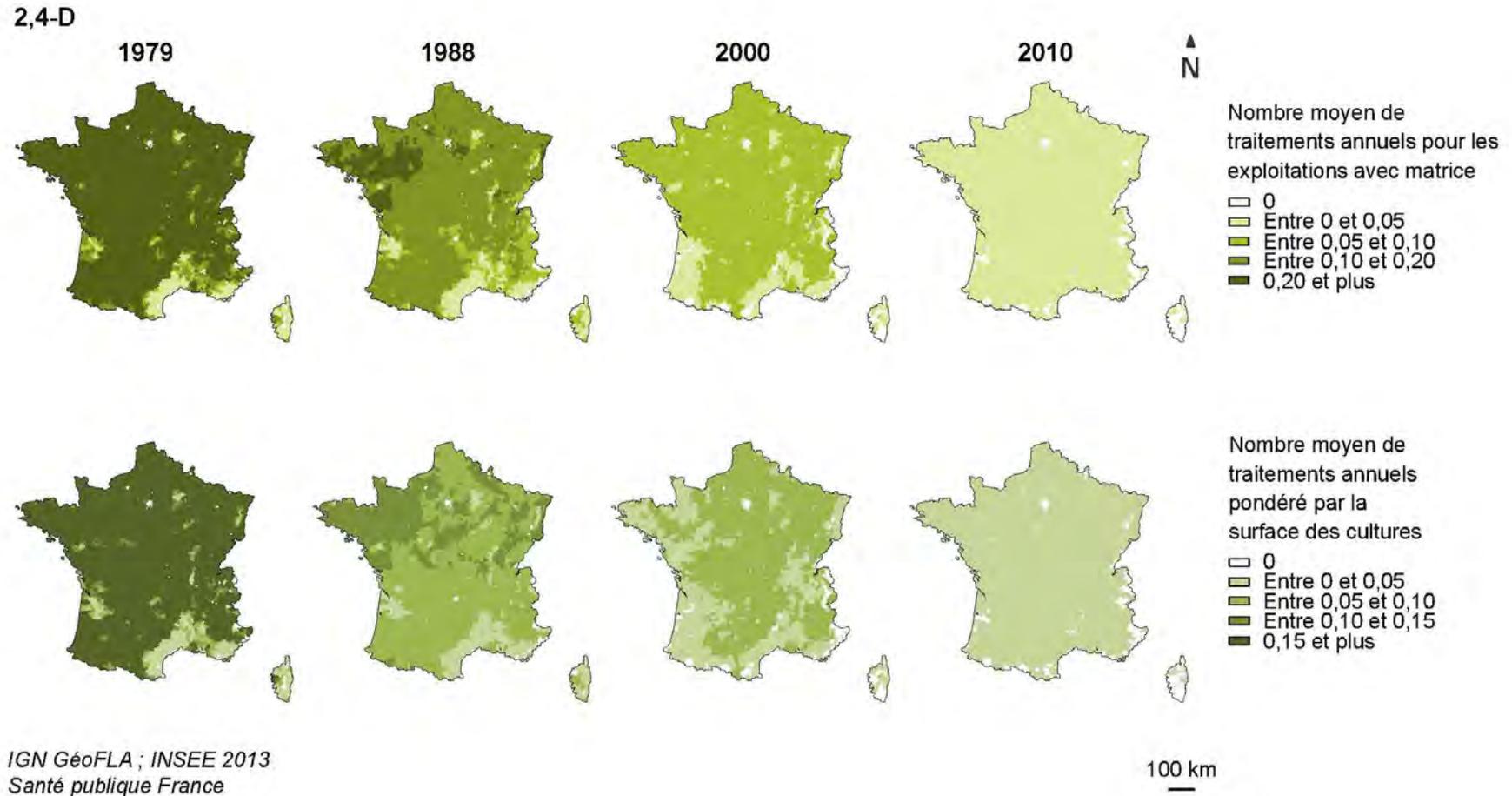


Figure 27. Distribution spatiale du nombre moyen de traitements annuels au 2,4-D pondéré ou non par la surface pour les exploitations ayant des cultures d'intérêt en France métropolitaine pour les quatre recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)



6. DISCUSSION

La France, en tant que grand pays agricole, est très utilisatrice de pesticides. Le croisement des matrices culture-exposition du programme Matphyto avec les données des recensements agricoles permet de définir des indicateurs d'expositions environnementale et professionnelle aux pesticides à différents niveaux géographiques (région, département, canton). L'évaluation de l'exposition aux pesticides, au niveau des territoires, est un enjeu majeur de santé publique en France. En effet, en 2010, l'activité agricole concernait près de 950 000 actifs (hors saisonniers), parmi lesquels plus de 480 000 exploitants, près de 320 000 ouvriers familiaux et 150 000 salariés permanents. De plus, près de 14 millions de personnes vivaient en milieu rural en 2010, soit 22,5 % de la population française [14].

L'exposition environnementale et l'exposition professionnelle aux pesticides doivent être décrites avec des indicateurs différents car les déterminants de l'exposition diffèrent.

- D'après la définition que nous avons utilisée, l'exposition environnementale de la population générale est liée aux caractéristiques agricoles du territoire dans lequel est situé le lieu de résidence des personnes. Il s'agit d'une approche par la proximité des cultures, méthode d'évaluation largement utilisée dans les études épidémiologiques portant sur l'exposition environnementale aux pesticides [10]. Elle est calculée à partir de la surface des cultures agricoles présentes dans un canton. Nous utilisons la surface des cultures présentes dans chaque canton et le traitement de chaque culture est considéré de façon indépendante les unes par rapport aux autres ; les indicateurs environnementaux correspondent ainsi à une exposition moyenne dans chaque canton. Ils ont pour finalité de décrire les expositions des résidents de la zone géographique.
- L'exposition professionnelle des travailleurs est approchée par des indicateurs d'exposition au sein de l'exploitation agricole et doit prendre en compte les traitements effectués sur l'ensemble des cultures présentes dans cette dernière. Des hypothèses de dépendance/indépendance des traitements aux pesticides entre les cultures présentes au sein d'une exploitation ont été posées. En effet, le choix de traitement des cultures dans les exploitations va dépendre de la présence ou non d'autres cultures. Si un travailleur traite une culture, il aura tendance à traiter les autres qui lui sont proches en termes de pratiques agricoles comme les quatre types de pommes de terre, notamment parce qu'il a acheté un produit compatible, que les traitements peuvent être concomitants, ou que le matériel utilisé sur une culture peut l'être sur une autre. La probabilité d'exposition ne dépend pas de la surface des cultures car la culture, qu'elle soit présente sur 20 ou 100 hectares, est traitée, et le travailleur agricole est exposé. Cet indicateur professionnel renvoie à une proportion moyenne d'exploitations utilisatrices ou de travailleurs exposés parmi les exploitations composées de cultures avec matrice au sein de la zone géographique. La finalité de cet indicateur est de décrire l'exposition des travailleurs agricoles. Quant au nombre de traitements annuels, deux indicateurs sont calculés pour l'exposition professionnelle (nombre moyen de traitements annuels pondéré ou non par la surface) car il est difficile de déterminer l'impact de la surface sur l'importance de l'exposition au sein des exploitations. La question sous-jacente au choix de ces indicateurs porte sur le lien entre exposition et surface : le niveau d'exposition d'un travailleur agricole sera-t-il le même si la surface traitée est petite ou grande ? Plusieurs critères sont à prendre en compte : pour les petites surfaces, si le travailleur épand le pesticide, il manipulera moins de produits, mais la diffusion sera sans doute différente et donc peut-être plus exposante (pulvérisateur à dos plutôt que tracteur par exemple). Une étude cherchant à identifier les paramètres à prendre en compte dans l'exposition professionnelle aux pesticides a d'ailleurs mis en évidence une corrélation négative entre l'exposition et la surface agricole [15].

Le calcul des indicateurs pour les groupes de pesticides montre que les fongicides et les herbicides sont utilisés massivement sur l'ensemble du territoire métropolitain français, alors que les insecticides ont une utilisation moins systématique et plus localisée. Des différences apparaissent quand on prend en compte le nombre moyen de traitements annuels avec des valeurs plus élevées pour les fongicides. L'exemple de la famille chimique des aryloxy-acides montre une évolution au cours du temps, mais également des différences au niveau de sa distribution spatiale. L'utilisation de cette famille chimique diminue progressivement, et ce sont les régions du Sud qui sont les moins exposées. Les indicateurs calculés pour l'une de ses substances actives, le 2,4-D, montre que cette substance active est fréquemment utilisée parmi cette famille chimique, car sa proportion correspond à peu près à la moitié de celle de sa famille chimique.

L'exposition professionnelle aux pesticides dans les études épidémiologiques est généralement évaluée grâce aux déclarations des populations interrogées ou par des matrices emploi-exposition [16, 17]. L'exposition environnementale, quant à elle, est généralement évaluée par la présence de cultures dans une aire géographique plus ou moins fine [10, 18, 19]. Les matrices culture-exposition ont été peu utilisées dans les études [20-22]. Et dans ces dernières, les matrices culture-exposition n'étaient pas utilisées seules, mais elles étaient combinées avec des données individuelles de cohortes ou d'études cas-témoin. Nous proposons une méthode originale qui combine les matrices culture-exposition et les données des recensements agricoles afin de déterminer des indicateurs d'expositions environnementaux et professionnels sur l'ensemble de la France métropolitaine et sur une période de temps longue couvrant 32 ans, soit de 1979 à 2010. Les indicateurs que nous avons décrits dans ce document peuvent être utilisés pour décrire les caractéristiques spatio-temporelles de l'exposition. Ils peuvent permettre de mettre en évidence des zones à fort niveau d'exposition dans lesquelles des études peuvent être mises en œuvre dans la population ou chez les travailleurs agricoles. Ces indicateurs d'exposition peuvent aussi être mis en relation avec des indicateurs de fréquence de pathologies dans le cadre d'études écologiques, permettant de générer des hypothèses sur le rôle potentiel de l'exposition aux pesticides.

Des limites existent dans le calcul de ces indicateurs :

- Premièrement, ils ne prennent pas en compte toutes les cultures. En effet, des matrices ne sont pas disponibles à ce jour pour l'arboriculture et le maraîchage, alors que ce sont des cultures très utilisatrices de pesticides. Cette limite implique qu'en cas de présence d'arboriculture ou de maraîchage dans un canton, l'exposition sera sous-estimée. Il est donc important de prendre en compte la part de ces surfaces dans le canton par rapport aux autres cultures. Cependant, la surface agricole de ces deux types de culture est faible dans l'ensemble de la France (de l'ordre de 2 % de la SAU). Les matrices actuellement disponibles représentent près de 75 % des surfaces agricoles hors prairies, et les cultures qui sont prises en compte représentent plus de 70 % de l'utilisation de pesticides [11].
- Deuxièmement, en lien avec les informations présentes dans les MCE, les indicateurs d'exposition professionnelle cherchent à caractériser l'exposition des travailleurs préparant ou appliquant les pesticides. Ils ne permettent pas de prendre en compte l'exposition des travailleurs exposés lors de la ré-entrée dans les cultures.
- Une troisième limite concerne la localisation des surfaces et des exploitations. La commune désignée dans le recensement agricole comme siège de l'exploitation correspond à la commune où se situe le bâtiment principal de l'exploitation, ou s'il n'y a pas de bâtiment agricole, la commune où se situe la parcelle agricole la plus importante. Les surfaces agricoles peuvent donc se situer sur des communes avoisinantes.

Néanmoins, les cultures agricoles sont relativement régionalisées sur le territoire, et pour limiter cette erreur, les indicateurs ont été calculés à un niveau moins fin : le canton.

- Une quatrième limite concerne la nature des indicateurs : l'exposition a été évaluée à un niveau géographique, elle ne repose pas sur des données individuelles. De plus, le niveau géographique du canton représente une unité administrative assez large, d'une superficie moyenne de 150 km². Il est difficile d'avoir une localisation géographique plus détaillée sans entraîner des erreurs sur les indicateurs d'exposition. Ces indicateurs considèrent donc que les habitants ou travailleurs agricoles d'un canton ont tous les mêmes déterminants d'exposition liée à l'utilisation des pesticides. Néanmoins, ces indicateurs permettent de mettre en évidence des zones géographiques plus exposées à certains pesticides qu'à d'autres.
- Cinquièmement, le calcul des indicateurs est restreint à la France métropolitaine. Les matrices qui ont permis cette méthodologie concernent en effet des cultures non présentes dans les départements et régions d'outre-mer (DROM). De plus, l'utilisation des pesticides dans ces régions est très différente de la métropole. Cependant, plusieurs matrices portant sur les cultures les plus répandues dans ces territoires ont été réalisées, comme la canne à sucre pour La Réunion, et la banane pour les Antilles [23, 24]. Cette méthodologie pourrait donc tout à fait s'étendre aux DROM en croisant ces matrices et les données du recensement agricole dans lesquelles sont incluses les exploitations des DROM.
- Enfin, les indicateurs estimés concernent l'exposition via l'utilisation de pesticides sur les cultures agricoles. Ils ne prennent pas en compte les expositions aux pesticides dans le cadre d'une utilisation non professionnelle (jardinage), via l'alimentation et l'eau, ni la rémanence de produits dans le sol après leur usage. De nombreuses études épidémiologiques reposent cependant sur l'utilisation des pesticides pour déterminer l'exposition : interview des travailleurs pour l'exposition professionnelle [25], proximité résidentielle pour l'exposition environnementale [10].

Cette méthodologie présente également des forces :

- Elle couvre de façon exhaustive l'ensemble du territoire métropolitain français. Cette méthodologie peut s'appliquer à différents niveaux géographiques. Elle est présentée au niveau du canton dans ce document, mais les indicateurs peuvent se rapporter aux régions ou aux départements. Elle peut également s'appliquer à des buffers géographiques, et à tout autre niveau où les cultures sont identifiées.
- Les matrices culture-exposition décrivent l'utilisation d'un grand nombre de pesticides sur plus de 50 ans, depuis 1960. Elles prennent en compte les substances actives les plus fréquemment utilisées (> 5%). Pour les herbicides, cela représente plus de 30 familles chimiques et plus de 70 substances actives.
- La construction des matrices repose sur une expertise agronomique, et ne se limite pas à des données de vente de produits. Les indicateurs sont donc représentatifs de l'utilisation réelle des pesticides.
- L'association de ces indicateurs peut être estimée avec la fréquence ou l'incidence de pathologies diverses. La prise en compte des temps de latence entre l'exposition et la survenue de la pathologie peut-être relativement longue car les indicateurs d'exposition sont calculés depuis 1979.

- Une autre force de cette méthode est qu'elle prend en compte différentes cultures pour estimer l'exposition, et que ces huit matrices couvrent plus de 70 % de l'utilisation des pesticides [11].
- Cette méthodologie est évolutive. Elle peut s'enrichir grâce à la construction et l'utilisation de nouvelles matrices afin de réduire la part des surfaces agricoles non prises en compte. De plus, la mise à jour des matrices et la disponibilité prochaine du recensement de 2020 permettra le calcul des indicateurs à des années postérieures à 2010.
- Enfin, elle permet de distinguer l'exposition environnementale et l'exposition professionnelle, et pour chacune de ces expositions, de définir plusieurs indicateurs différents.

7. CONCLUSION

À partir de données nationales définies de façon homogène sur le territoire, nous avons pu développer une méthode permettant de décrire, au niveau national, régional et infra-départemental, l'exposition environnementale aux pesticides de la population générale et l'exposition des travailleurs liée à l'utilisation de ces substances pour quatre cultures couvrant 75 % des surfaces agricoles (hors prairies et jachères). Cette méthode a été appliquée, entre 1979 et 2010, pour les trois groupes de pesticides, 109 familles chimiques et 197 substances actives.

Ces indicateurs pourront utilement être mis à disposition de la communauté scientifique ou autres acteurs de l'évaluation, de la gestion ou de la prévention des risques. Les suites de ce projet sont d'étudier l'association de ces indicateurs avec l'incidence de deux maladies neurodégénératives, la maladie de Parkinson et la sclérose latérale amyotrophique.

Ce travail s'intègre dans le cadre des études de Santé publique France portant sur l'évaluation de l'exposition aux pesticides dont le but est de mieux caractériser les impacts sanitaires liés à ces expositions afin de mettre en place une démarche de prévention et de réduction des risques.

Références bibliographiques

- [1] Ministère de l'agriculture. Note de suivi 2018-2019 du plan Ecophyto. 2020. 52 p. Disponible: <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/106541?token=1f20b7a16e99b1eff3309f39fe68e55147a9ac11b6bb9b46f64b38aa2a6ee652>
- [2] Gangemi S, Miozzi E, Teodoro M, Briguglio G, De Luca A, Alibrando C, 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(5):4475-88
- [3] Brouwer M, Huss A, van der Mark M, Nijssen PCG, Mulleners WM, Sas AMG, et al. Environmental exposure to pesticides and the risk of Parkinson's disease in the Netherlands. *Environ Int.* 2017;107:100-10
- [4] Parron T, Requena M, Hernandez AF, Alarcon R. Environmental exposure to pesticides and cancer risk in multiple human organ systems. *Toxicol Lett.* 2014;230(2):157-65
- [5] Baldi I, Cordier S, Coumoul X, Elbaz A, Gamet-Payraastre L, Lebailly P, et al. Pesticides : Effets sur la santé. Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm); 2013. 1014 p. Disponible: <https://www.hal.inserm.fr/inserm-02102981>
- [6] Inserm Collective Expertise Centre. Effects of pesticides on health: New data: Inserm; 2022.
- [7] Eurostat. Agriculture - Principaux tableaux [En ligne]. : 2019. [modifié le 25/04/2023; cité le 27/04/2023]. Disponible: <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/agriculture/data/main-tables>
- [8] Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. FAOSTAT - Indicateurs des pesticides [En ligne]. : 2018. [modifié le 15/04/2022; cité le 27/04/2023]. Disponible: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/EP/visualize>
- [9] Baudet A, Lejeune V. Index phytosanitaire ACTA 2014. 50ème éd. France : Acta; 2014.
- [10] Teyssiere R, Manangama G, Baldi I, Carles C, Brochard P, Bedos C, et al. Assessment of residential exposures to agricultural pesticides: A scoping review. *PLoS One.* 2020;15(4):e0232258
- [11] Butault JP, Delame N, Jacquet F, Zardet G. L'utilisation des pesticides en France : état des lieux et perspective de réduction. Centre d'études et de prospective - Service de la statistique et de la prospective; 2011. 24 p. Disponible: http://46.29.123.56/IMG/pdf_nese111035A1.pdf
- [12] Jezewski-Serra D, Chaperon L, Spinosi J. Utilisation des recensements agricoles métropolitains pour le croisement avec les matrices cultures expositions Matphyto: quelles données populationnelles disponibles ? Saint-Maurice : Santé publique France; 2018. 7 p. Disponible: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/pesticides/documents/rapport-synthese/utilisation-des-recensements-agricoles-metropolitains-pour-le-croisement-avec-les-matrices-cultures-expositions-matphyto-quelles-donnees-populatio>
- [13] 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
- [14] Clanché F, Rascol O. Le découpage en unités urbaines de 2010. L'espace urbain augmente de 19 % en une décennie. *Insee Première.* 2011(1364)
- [15] Lebailly P, Bouchart V, Baldi I, Lecluse Y, Heutte N, Gislard A, et al. Exposure to Pesticides in Open-field Farming in France. *The Annals of Occupational Hygiene.* 2009;53(1):69-81

- [16] Carles C, Bouvier G, Lebailly P, Baldi I. Use of job-exposure matrices to estimate occupational exposure to pesticides: A review. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2017;27(2):125-40
- [17] Van der Mark M, Brouwer M, Kromhout H, Nijssen P, Huss A, Vermeulen R. Is pesticide use related to Parkinson disease? Some clues to heterogeneity in study results. *Environ Health Perspect*. 2012;120(3):340-7
- [18] Brouwer M, Kromhout H, Vermeulen R, Duyzer J, Kramer H, Hazeu G, et al. Assessment of residential environmental exposure to pesticides from agricultural fields in the Netherlands. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2018;28(2):173-81
- [19] Kab S, Spinosi J, Chaperon L, Dugravot A, Singh-Manoux A, Moisan F, et al. Agricultural activities and the incidence of Parkinson's disease in the general French population. *Eur J Epidemiol*. 2017;32(3):203-16
- [20] Brouwer M, Schinasi L, Beane Freeman LE, Baldi I, Lebailly P, Ferro G, et al. Assessment of occupational exposure to pesticides in a pooled analysis of agricultural cohorts within the AGRICOH consortium. *Occup Environ Med*. 2016;73(6):359-67
- [21] Young HA, Mills PK, Riordan D, Cress R. Use of a crop and job specific exposure matrix for estimating cumulative exposure to triazine herbicides among females in a case-control study in the Central Valley of California. *Occup Environ Med*. 2004;61(11):945-51
- [22] Pouchieu C, Piel C, Carles C, Gruber A, Helmer C, Tual S, et al. Pesticide use in agriculture and Parkinson's disease in the AGRICAN cohort study. *Int J Epidemiol*. 2018;47(1):299-310
- [23] Spinosi J, Cahour L, Gouy M, Chaperon L, El Yamani M. Évaluation des expositions professionnelles aux pesticides utilisés dans la culture de la canne à sucre à l'île de La Réunion et de leurs effets sanitaires : projet Matphyto DOM. Saint-Maurice : Santé publique France; 2019. 37 p. Disponible: <https://www.santepubliquefrance.fr/docs/evaluation-des-expositions-professionnelles-aux-pesticides-utilises-dans-la-culture-de-la-canne-a-sucre-a-l-ile-de-la-reunion-et-de-leurs-effets-sa>
- [24] Gentil C, Spinosi J, Cahour L, Chaperon L, El Yamani M. Document technique pour la construction de la matrice culture exposition de la Banane dessert aux Antilles : Projet Matphyto DOM. Saint-Maurice : Santé publique France; 2018. 44 p. Disponible: <https://www.santepubliquefrance.fr/regions/antilles/documents/rapport-synthese/2018/document-technique-pour-la-construction-de-la-matrice-culture-exposition-de-la-banane-dessert-aux-antilles-projet-matphyto-dom>
- [25] Jomichen J, El-Zaemey S, Heyworth JS, Carey RN, Darcey E, Reid A, et al. Australian work exposures studies: occupational exposure to pesticides. *Occupational and Environmental Medicine*. 2017;74(1):46-51

ANNEXES

Annexe 1. Données complémentaires

Tableau S1. Sensibilité et spécificité du modèle GEE (Generalized estimating equations) en fonction du type de pommes de terre et de la région géographique

| | | Spécificité (%) | Sensibilité (%) |
|---------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Pommes de terre de conservation | Continental | 72,9 | 73,8 |
| | Côtes | 84,8 | 78,1 |
| | Nord | 81,6 | 82,8 |
| | Nord-ouest | 75,3 | 73,3 |
| Pommes de terre nouvelles | Continental | 78,7 | 69,8 |
| | Côtes | 76,6 | 80,0 |
| | Nord | 73,7 | 82,9 |
| | Nord-ouest | 72,0 | 77,1 |

Annexe 2. Méthodologie complémentaire - Indicateurs d'exposition professionnelle aux pesticides

Dépendance ou indépendance d'exposition entre les différentes cultures

- Pour les groupes de pesticides (Herbicides, Fongicides, Insecticides), une dépendance de traitement existe entre les cultures de céréales à paille, maïs grain et maïs fourrage. Par exemple, une exploitation qui désherbe chimiquement une parcelle de maïs grain traitera vraisemblablement aussi sa parcelle de maïs fourrage. Les deux traitements sont dépendants. Une dépendance existe également entre les quatre types de pommes de terre. Les autres cultures (vignes et pommes de terre, céréales et pommes de terre, ...) sont indépendantes entre elles (Tableau S2). Par exemple, une exploitation qui applique un insecticide sur une parcelle de céréales à paille ne le fera pas systématiquement sur sa parcelle de pommes de terre. Les deux traitements sont indépendants.
- Pour les familles chimiques et substances actives, une dépendance de traitement existe pour les quatre types de pommes de terre ainsi que le maïs grain et maïs fourrage. Les autres combinaisons de cultures sont indépendantes entre elles, y compris les céréales à paille et le maïs (Tableau S2).

Tableau S2. Dépendance (D) et indépendance (i) des probabilités et fréquences d'exposition entre différentes cultures

| Cultures | Céréales à paille | Maïs grain | Maïs fourrage | PDT de conservation | PDT primeurs | Plants de PDT | PDT de féculerie | Vignes |
|---|-------------------|------------|---------------|---------------------|--------------|---------------|------------------|--------|
| <u>Probabilités d'exposition aux groupes de pesticides</u> | | | | | | | | |
| Céréales à paille | | <u>D</u> | <u>D</u> | i | i | i | i | i |
| Maïs grain | | | <u>D</u> | i | i | i | i | i |
| Maïs fourrage | | | | i | i | i | i | i |
| PDT de conservation | | | | | <u>D</u> | <u>D</u> | <u>D</u> | i |
| PDT nouvelles | | | | | | <u>D</u> | <u>D</u> | i |
| Plants de PDT | | | | | | | <u>D</u> | i |
| PDT de féculerie | | | | | | | | i |
| <u>Probabilités d'exposition aux familles chimiques et substances actives</u> | | | | | | | | |
| <u>Fréquences d'exposition aux groupes de pesticides, familles chimiques et substances actives</u> | | | | | | | | |
| Céréales à paille | | i | i | i | i | i | i | i |
| Maïs grain | | | <u>D</u> | i | i | i | i | i |
| Maïs fourrage | | | | i | i | i | i | i |
| PDT de conservation | | | | | <u>D</u> | <u>D</u> | <u>D</u> | i |
| PDT nouvelles | | | | | | <u>D</u> | <u>D</u> | i |
| Plants de PDT | | | | | | | <u>D</u> | i |
| PDT de féculerie | | | | | | | | i |

Figure S1. Répartition spatiale des types d'exploitation en fonction des recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)

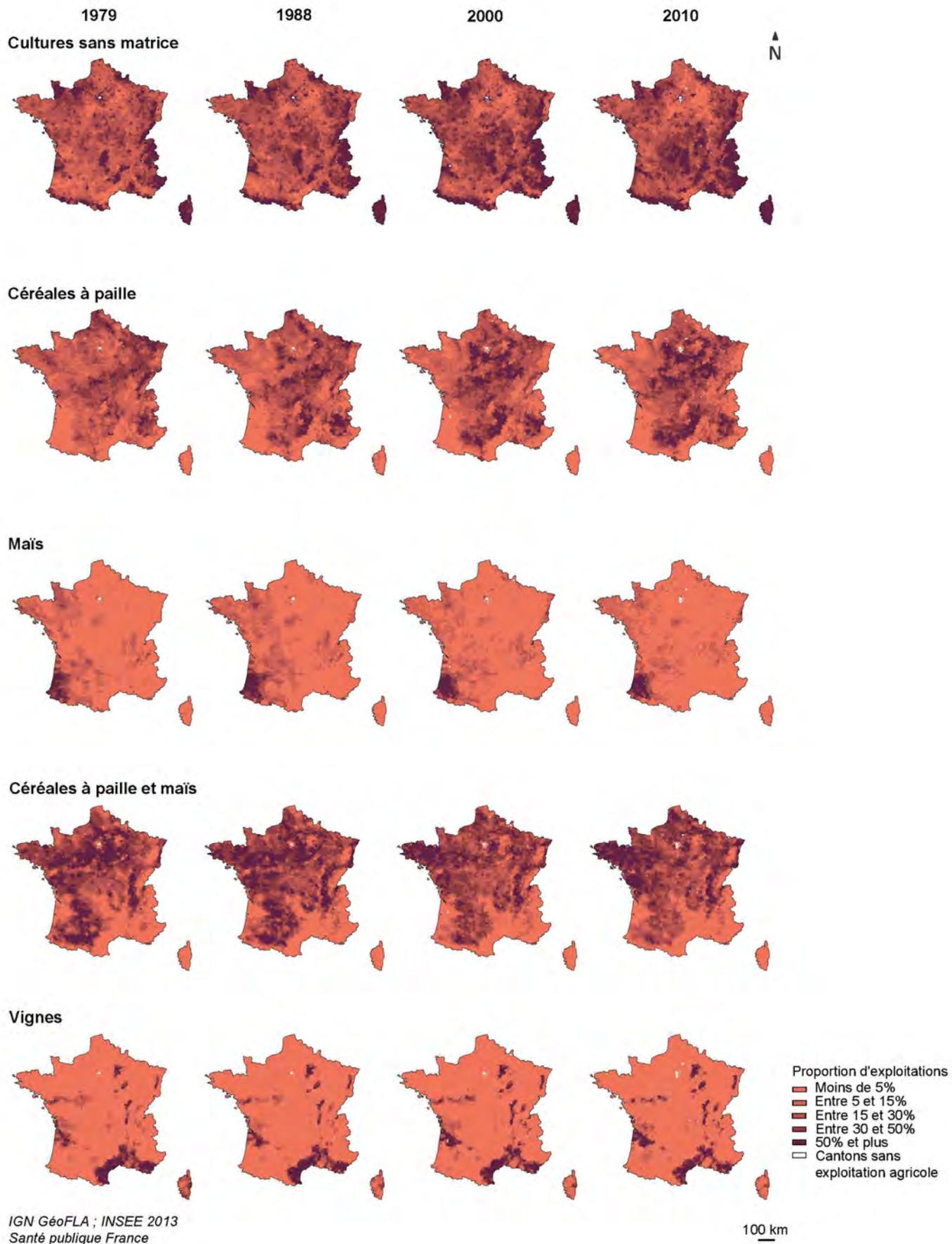


Tableau S3. Distribution des cantons selon la proportion d'exploitations pour les différents types de culture d'intérêt et selon le recensement

| | Nombre de cantons (%) | | | |
|---|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Proportion d'exploitations sans culture avec matrice | | | | |
| Cantons sans exploitation | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 237 (6,4) | 181 (4,9) | 190 (5,2) | 248 (6,7) |
| Entre 5 et 15 % | 993 (26,9) | 788 (21,3) | 588 (15,9) | 641 (17,4) |
| Entre 15 et 30 % | 1 113 (30,2) | 1 117 (30,3) | 993 (26,9) | 955 (25,9) |
| Entre 30 et 50 % | 654 (17,7) | 789 (21,4) | 955 (25,9) | 863 (23,4) |
| 50 % et plus | 656 (17,8) | 756 (20,5) | 880 (23,9) | 868 (23,5) |
| Proportion d'exploitations de céréales à paille | | | | |
| Cantons sans exploitation | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 855 (23,2) | 905 (24,5) | 972 (26,4) | 942 (25,5) |
| Entre 5 et 15 % | 1 136 (30,8) | 1 018 (27,6) | 919 (24,9) | 866 (23,5) |
| Entre 15 et 30 % | 988 (26,8) | 964 (26,1) | 829 (22,5) | 793 (21,5) |
| Entre 30 et 50 % | 513 (13,9) | 513 (13,9) | 567 (15,4) | 583 (15,8) |
| 50 % et plus | 161 (4,3) | 231 (6,3) | 319 (8,6) | 391 (10,6) |
| Proportion d'exploitations de maïs | | | | |
| Cantons sans exploitation | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 2 637 (71,5) | 2 408 (65,3) | 2 584 (70,1) | 2 709 (73,4) |
| Entre 5 et 15 % | 691 (18,7) | 847 (23,0) | 726 (19,7) | 660 (17,9) |
| Entre 15 et 30 % | 218 (5,9) | 245 (6,6) | 189 (5,1) | 117 (3,2) |
| Entre 30 et 50 % | 70 (1,9) | 70 (1,9) | 44 (1,2) | 33 (0,9) |
| 50 % et plus | 37 (1,0) | 61 (1,6) | 63 (1,7) | 56 (1,5) |
| Proportion d'exploitations de céréales à paille et de maïs | | | | |
| Cantons sans exploitation | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 921 (25,0) | 845 (22,9) | 884 (24,0) | 865 (23,4) |
| Entre 5 et 15 % | 523 (14,2) | 391 (10,6) | 476 (12,9) | 423 (11,5) |
| Entre 15 et 30 % | 735 (19,9) | 733 (19,9) | 778 (21,1) | 804 (21,8) |
| Entre 30 et 50 % | 836 (22,6) | 960 (26,0) | 1 025 (27,8) | 913 (24,7) |
| 50 % et plus | 638 (17,3) | 702 (19,0) | 443 (12,0) | 570 (15,5) |
| Proportion d'exploitations de vignes | | | | |
| Cantons sans exploitation | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 2 962 (80,3) | 3 025 (82,0) | 2 967 (80,4) | 2 986 (81,0) |
| Entre 5 et 15 % | 236 (6,4) | 214 (5,8) | 208 (5,7) | 178 (4,8) |
| Entre 15 et 30 % | 147 (4,0) | 103 (2,8) | 115 (3,1) | 100 (2,7) |
| Entre 30 et 50 % | 119 (3,2) | 95 (2,6) | 103 (2,8) | 100 (2,7) |
| 50 % et plus | 189 (5,1) | 194 (5,2) | 213 (5,8) | 211 (5,7) |

Les catégories définies correspondent à celles de la représentation spatiale dans le document.

Calcul des indicateurs d'exposition professionnelle

Pour l'exposition professionnelle, il est nécessaire de calculer les probabilités et les fréquences d'exposition pour chaque exploitation en fonction des cultures qui la composent.

Soit une exploitation hypothétique avec deux cultures $c1$ et $c2$ dont les probabilités d'exposition à X (groupe de pesticides, famille chimique ou substance active) sont P_{c1}^X et P_{c2}^X avec des fréquences de traitement F_{c1}^X et F_{c2}^X . Les principes des calculs sont les suivants :

- S'il y a *dépendance* pour les probabilités d'exposition à X , la probabilité que l'exploitation soit exposée à X est le maximum des deux, soit $P_{\max(c1,c2)}^X = \max(P_{c1}^X, P_{c2}^X)$.
 - Par exemple, si la probabilité de traiter les céréales à paille par herbicides est $P_{cp}^H = 80\%$ et celle de traiter le maïs grain est $P_{mg}^H = 50\%$, parmi 100 exploitations cultivant à la fois des céréales à paille et du maïs grain, 80 exploitations utilisent des herbicides. Parmi ces 80 exploitations, 50 traitent les deux cultures et 30 traitent seulement les céréales à pailles (Figure S2).
- De même, s'il y a *dépendance* pour les fréquences, la fréquence de traitements par X est égale à la fréquence maximum, soit $F_{\max(c1,c2)}^X = \max(F_{c1}^X, F_{c2}^X)$.
 - Par exemple, si une exploitation possède les quatre types de pommes de terre, on utilisera la fréquence maximum parmi les quatre. L'hypothèse est que si un exploitant doit faire 8 traitements sur un type de pommes de terre et 6 sur l'autre, il fera les traitements en même temps puisque ce sont les mêmes produits (dépendance des groupes de pesticides, familles chimiques et substances actives). Parmi les 8 traitements, 6 sont destinées aux deux types de pommes de terre et 2 à un seul.
- S'il y a *indépendance* pour les probabilités d'exposition, pour calculer la probabilité que l'exploitation soit exposée à X , on soustrait à 1 la probabilité que l'exploitation ne traite pas avec X , cette probabilité étant égale au produit des probabilités de ne pas traiter chaque culture, soit $P^X = 1 - (1 - P_{c1}^X)(1 - P_{c2}^X)$.
- S'il y a *indépendance* pour les fréquences d'exposition, on utilise la fréquence pour chaque type de groupe de pesticide, famille chimique et substance active.

Au total, en suivant ce raisonnement :

- Pour une exploitation possédant toutes les cultures avec matrice, la probabilité d'exposition aux *groupes* G de pesticides est :
$$P^G = 1 - (1 - P_{\max(cp,mg,mf)}^G)(1 - P_{\max(pdt)}^G)(1 - P_v^G)$$
- Pour les *familles chimiques et substances actives*, FA , le calcul doit être modifié si une exploitation possède des céréales à paille et du maïs, car les cultures sont dépendantes au niveau du groupe mais indépendantes au niveau des familles chimiques et substances actives.
 - Si on reprend l'exemple précédent : parmi 100 exploitations cultivant à la fois des céréales à paille ($P_{cp}^F = 80\%$) et du maïs grain ($P_{mg}^F = 50\%$), 80 exploitations utilisent des herbicides, parmi lesquelles 50 traitent les deux cultures et 30 traitent seulement les céréales à paille. La probabilité d'utiliser la famille chimique d'herbicide FA si on traite par herbicides est $P_{cp}^{FA/F} = 30\%$ pour les céréales à paille et $P_{mg}^{FA/F} = 20\%$ pour le maïs grain. Comme il existe une indépendance pour la famille chimique entre ces deux cultures, parmi les 50 exploitations qui traitent les deux cultures, 30 % traitent les céréales à paille avec FA et 20 % traitent le maïs grain avec FA ; la probabilité que ces exploitations utilisent FA est donc 0,44 ($= [1 - (1-0,2) \times (1-0,3)]$). Pour les 30

exploitations qui ne traitent que les céréales à paille, 30 % sont traitées avec cette famille chimique ; la probabilité que ces exploitations utilisent *FA* est donc 0,3. Au total, parmi les 100 exploitations cultivant à la fois des céréales à paille et du maïs grain, 31 % (=0,5×0,44 + 0,3×0,3) d'entre elles utilisent l'herbicide *FA* (Figure S2).

- En résumé, la probabilité d'exposition à *FA* appartenant au groupe *G* dans les exploitations avec ces deux cultures est donc :

$$P_{cp \text{ et } mg}^{FA} = P_{\min(cp,mg)}^G \times [1 - (1 - P_{cp}^{FA/G}) \times (1 - P_{mg}^{FA/G})] + P_{\text{diff}(cp,mg)}^G \times P_{mg}^{FA/G}$$

avec $P_{\min(cp,mg)}^G = \min(P_{cp}^G, P_{mg}^G)$ et $P_{\text{diff}(cp,mg)}^G = P_{\max(cp,mg)}^G - P_{\min(cp,mg)}^G$.

Le calcul des indicateurs d'exposition professionnelle se fait ensuite en deux étapes : une première étape consiste à calculer chaque indicateur par type d'exploitation (par canton) et, dans un deuxième temps, le calcul des indicateurs se fait par canton qui prend en compte tous les types d'exploitation :

1- Première étape : calcul des indicateurs d'exposition professionnelle par type d'exploitation

- La proportion d'exploitations ayant des cultures avec matrices exposées à *G* ou *FA* pour une exploitation de type *t* du canton *i* est égale à :

$$G : Pp_{t_i}^G = 1 - (1 - P_{\max(cp_i,mg_i,mf_i)}^G)(1 - P_{\max(pdt_i)}^G)(1 - P_{v_i}^G)$$

$$FA : Pp_{t_i}^{FA} = 1 - (1 - P_{cp \text{ et } mg_i}^{FA})(1 - P_{\max(pdt_i)}^{FA})(1 - P_{v_i}^{FA})$$

- Le nombre de traitements non pondéré de *X* (groupe, famille chimique, substance active) pour une exploitation de type *t* du canton *i* possédant des cultures avec matrice est égal à :

$$Np_{t_i}^X = (P_{cp_i}^X F_{cp_i}^X) + (P_{\max(mg_i,mf_i)}^X F_{\max(mg_i,mf_i)}^X) + (P_{\max(pdt_i)}^X F_{\max(pdt_i)}^X) + (P_{v_i}^X F_{v_i}^X).$$

Ces calculs se font séparément pour les 144 types d'exploitation définies à partir des combinaisons de cultures ; pour une exploitation appartenant au type d'exploitation *t* du canton *i*, on obtient ainsi la probabilité d'exposition $Pp_{t_i}^X$ et le nombre de traitements $Np_{t_i}^X$.

- Le nombre moyen de traitements de *X* pondéré par la surface de cultures (groupe, famille chimique, substance active) pour une exploitation possédant des cultures avec matrice est :

$$Np_{t_i}^X/ha = \frac{\sum_c (P_{c_i}^X \times F_{c_i}^X \times S_{c_i})}{S_i}.$$

- La quantité moyenne épanchée par hectare de la substance active *FA* pour une exploitation possédant des cultures avec matrice est :

$$Qp_{t_i}^{FA}/ha = \frac{\sum_c (P_{c_i}^{FA} \times F_{c_i}^{FA} \times I_{c_i}^{FA} \times S_{c_i})}{S_i}.$$

2- Deuxième étape : calcul des indicateurs d'exposition professionnelle pour l'ensemble du canton

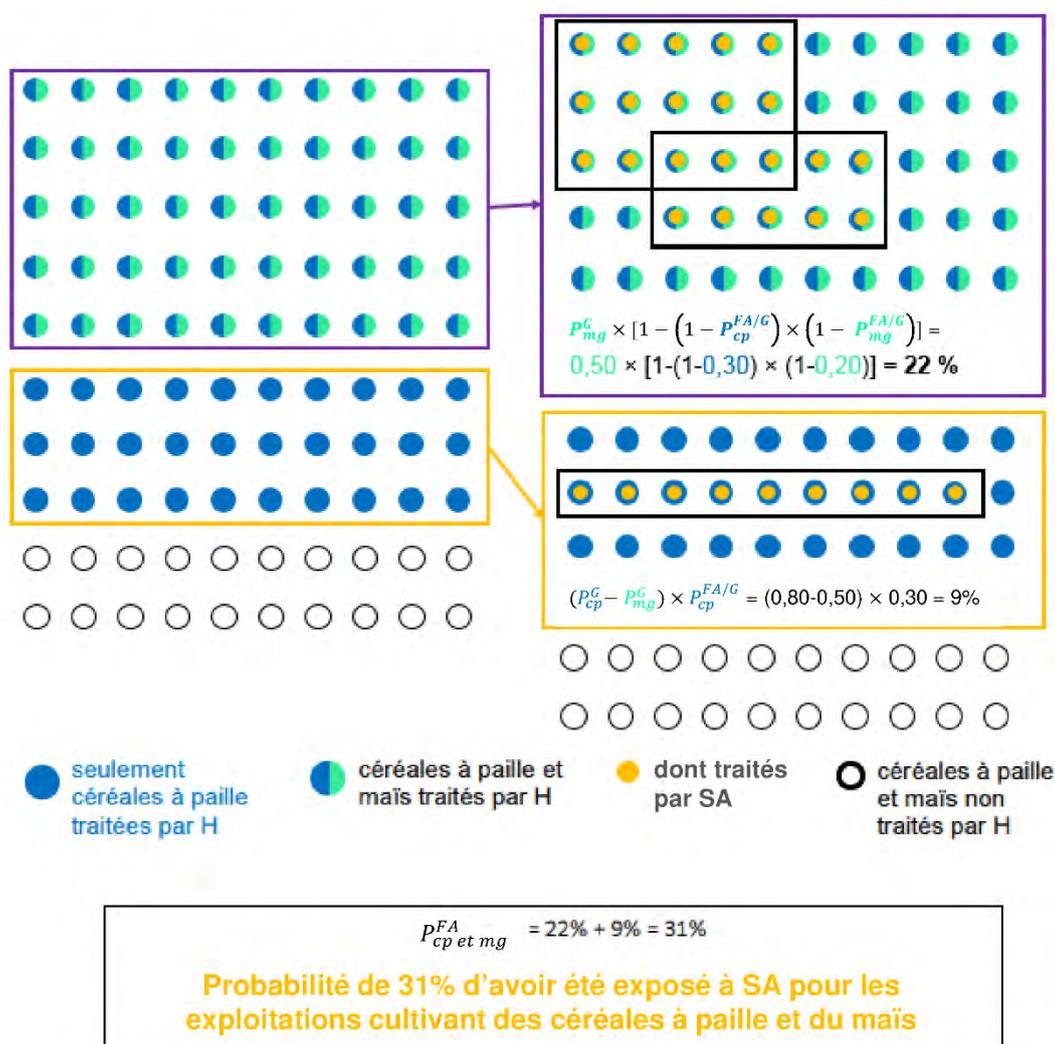
Soit n_{t_i} le nombre d'exploitations de type *t* dans le canton *i* avec des probabilités d'exposition $Pp_{t_i}^X$ et un nombre annuel de traitements $Np_{t_i}^X$ de *X* (groupe, famille chimique, substance active). Les indicateurs sont les suivants :

- La proportion d'exploitations ayant des cultures avec matrice exposées à *X* dans le canton *i* est : $Pp_i^X = \frac{\sum_t n_{t_i} Pp_{t_i}^X}{\sum_t n_{t_i}}$.

- Le nombre moyen de traitements annuels non pondéré de *X* dans le canton *i* pour les exploitations ayant des cultures avec matrice est : $Np_i^X = \frac{\sum_t n_{t_i} Np_{t_i}^X}{\sum_t n_{t_i}}$.

- Le nombre moyen de traitements annuels de X pondéré par la surface dans le canton i pour les exploitations ayant des cultures avec matrice est : $Np_i^X/ha = \frac{\sum_t n_{t_i} Np_{t_i}^X/ha}{\sum_t n_{t_i}}$.
- La quantité annuelle moyenne épanchée de la substance active FA par hectare dans le canton i pour les exploitations ayant des cultures avec matrice est : $Qp_i^{FA}/ha = \frac{\sum_t n_{t_i} Q_{t_i}^{FA}/ha}{\sum_t n_{t_i}}$.

Figure S2. Illustration pour le calcul de la probabilité que l'exploitation composée de céréales à paille et de maïs grain soit exposée au groupe herbicides (dépendance des traitements au groupe entre les deux cultures) et à une famille chimique (indépendance des traitements à la famille chimique entre les deux cultures)



Source : document interne de travail : Geoffroy-Perez B, Breuillard E, Spinosi J, Chaperon L, Bénézet L. Méthodes pour l'évaluation de l'exposition individuelle aux pesticides dans COSET-MSA à partir des Matrices Cultures-Expositions Matphyto ; 2019. 55 p.

Annexe 3. Résultats complémentaires

Figure S3. Répartition spatiale des cultures pour lesquelles les matrices sont disponibles en fonction des recensements (1979, 1988, 2000 et 2010)

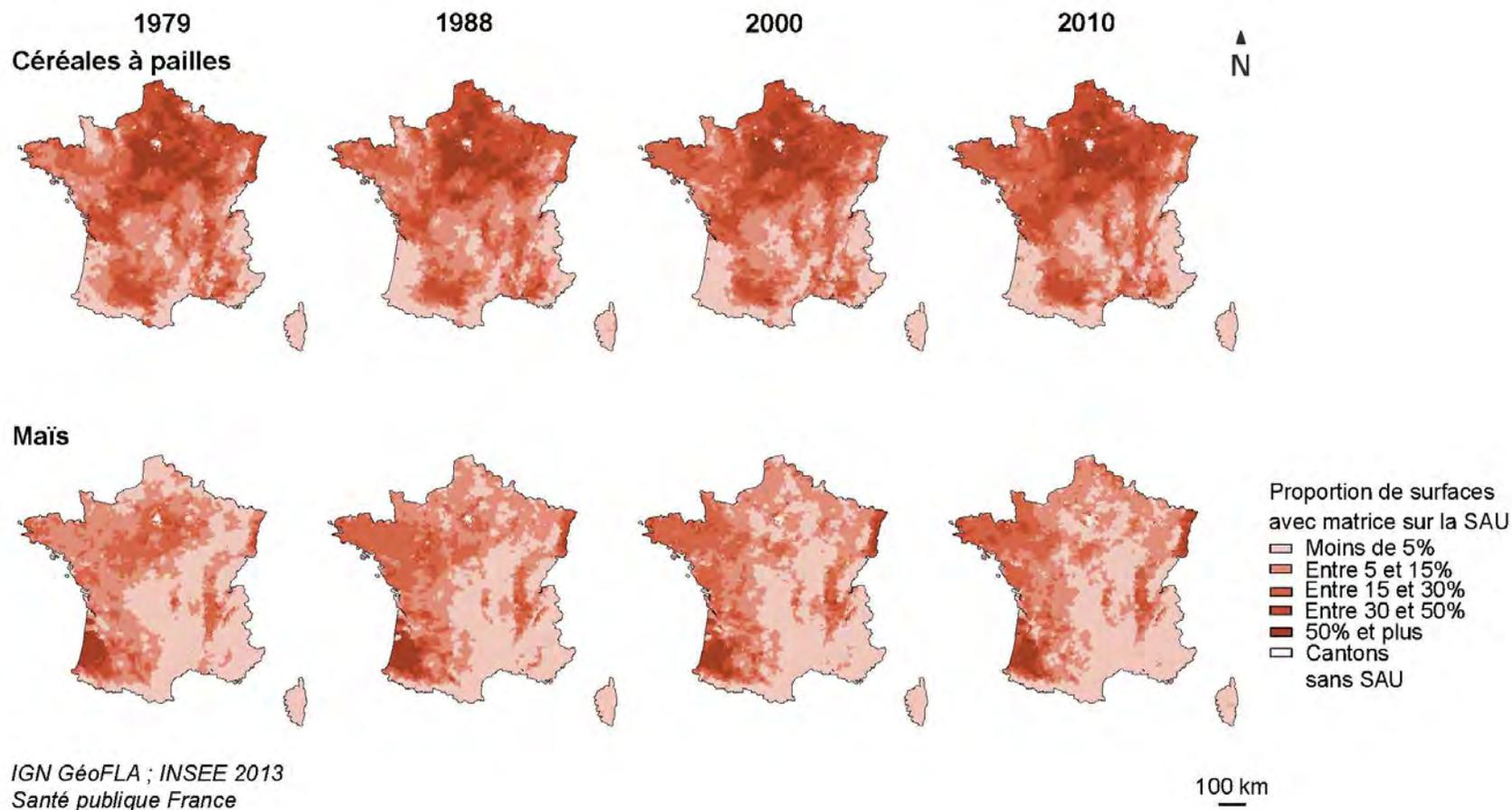


Figure S3 (suite)

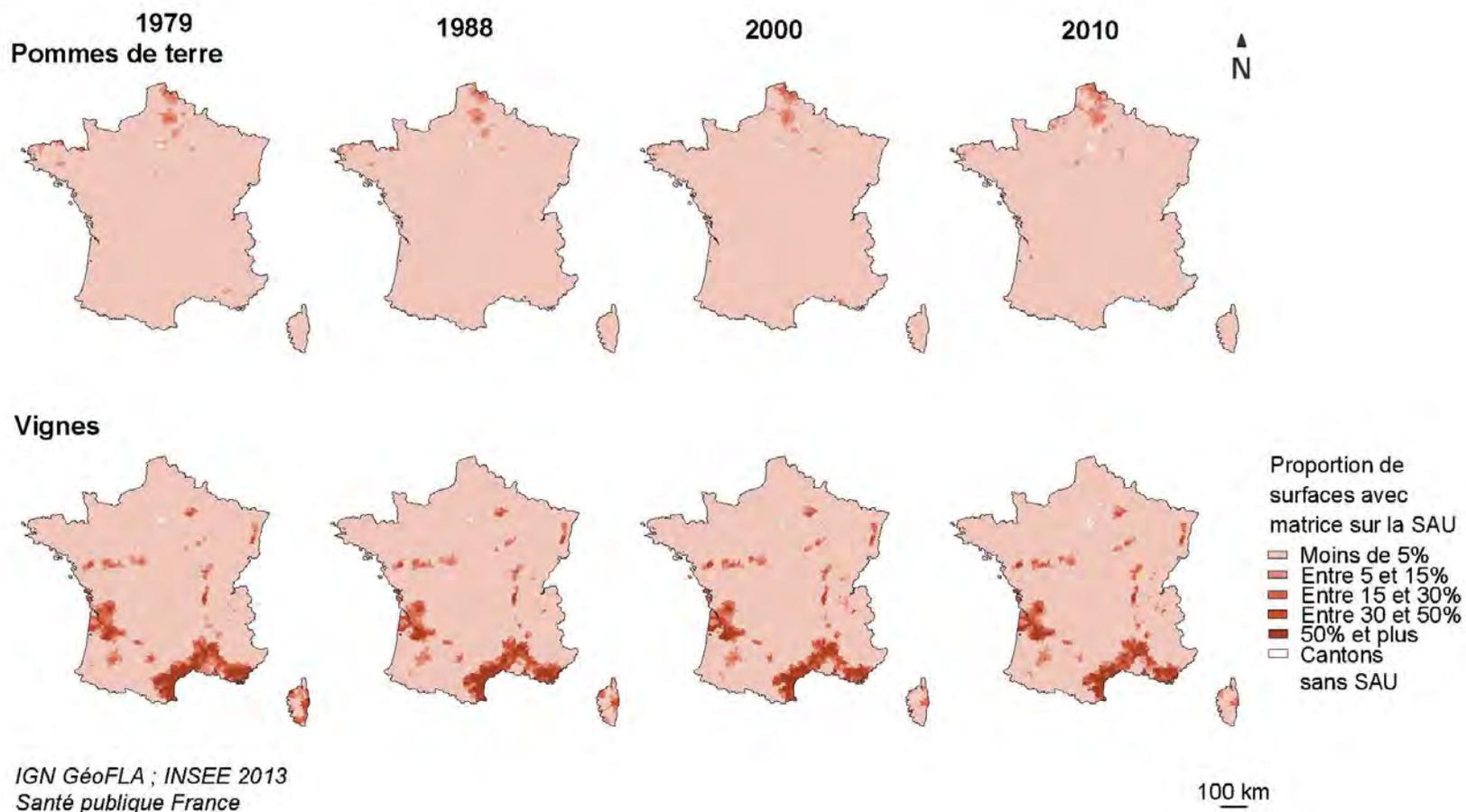


Tableau S4. Distribution des cantons selon la proportion de surfaces d'intérêt et selon le recensement

| | Nombre de cantons (%) | | | |
|---|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Proportion de surfaces avec matrice sur la SAU | | | | |
| Cantons sans SAU | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 25 % | 1 304 (35,4) | 1 193 (32,3) | 1 141 (31,0) | 1 075 (29,1) |
| Entre 25 et 50 % | 1 108 (30,0) | 1 190 (32,3) | 1 188 (32,2) | 1 087 (29,5) |
| Entre 50 et 75 % | 938 (25,4) | 1 074 (29,1) | 1 155 (31,3) | 1 276 (34,6) |
| 75 % et plus | 303 (8,2) | 174 (4,7) | 122 (3,3) | 137 (3,7) |
| Proportion de surfaces avec matrice sur la SAU sans prairies | | | | |
| Cantons sans SAU | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 25 % | 192 (5,2) | 192 (5,2) | 224 (6,1) | 218 (5,9) |
| Entre 25 et 50 % | 114 (3,1) | 146 (3,9) | 142 (3,9) | 111 (3,0) |
| Entre 50 et 75 % | 865 (23,4) | 1 224 (33,2) | 1 270 (34,4) | 1 283 (34,8) |
| 75 % et plus | 2 482 (67,3) | 2 069 (56,1) | 1 970 (53,4) | 1 963 (53,2) |
| Proportion de surfaces de céréales à paille sur la SAU | | | | |
| Cantons sans SAU | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 656 (17,8) | 708 (19,2) | 753 (20,4) | 719 (19,5) |
| Entre 5 et 15 % | 900 (24,4) | 953 (25,8) | 813 (22,1) | 694 (18,8) |
| Entre 15 et 30 % | 893 (24,2) | 895 (24,3) | 905 (24,5) | 848 (23,0) |
| Entre 30 et 50 % | 771 (20,9) | 717 (19,4) | 778 (21,1) | 932 (25,2) |
| 50 % et plus | 433 (11,7) | 358 (9,7) | 357 (9,7) | 382 (10,4) |
| Proportion de surfaces de maïs sur la SAU | | | | |
| Cantons sans SAU | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 1 589 (43,1) | 1 360 (36,8) | 1 480 (40,1) | 1 496 (40,6) |
| Entre 5 et 15 % | 1 308 (35,4) | 1 247 (33,8) | 1 190 (32,3) | 1 177 (31,9) |
| Entre 15 et 30 % | 613 (16,6) | 796 (21,6) | 708 (19,2) | 668 (18,1) |
| Entre 30 et 50 % | 100 (2,7) | 147 (4,0) | 138 (3,7) | 152 (4,1) |
| 50 % et plus | 43 (1,2) | 81 (2,2) | 90 (2,5) | 82 (2,2) |
| Proportion de surfaces de pommes de terre sur la SAU | | | | |
| Cantons sans SAU | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 3 512 (95,2) | 3 511 (95,2) | 3 480 (94,4) | 3 434 (93,1) |
| Entre 5 et 15 % | 119 (3,2) | 98 (2,6) | 95 (2,6) | 110 (3,0) |
| Entre 15 et 30 % | 19 (0,5) | 20 (0,5) | 30 (0,8) | 28 (0,7) |
| Entre 30 et 50 % | 3 (0,1) | 2 (0,1) | 0 (0,0) | 3 (0,1) |
| 50 % et plus | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 1 (0,0) | 0 (0,0) |
| Proportion de surfaces de vignes sur la SAU | | | | |
| Cantons sans SAU | 36 (1,0) | 58 (1,6) | 83 (2,2) | 114 (3,1) |
| Moins de 5 % | 3 200 (86,8) | 3 208 (87,0) | 3 185 (86,4) | 3 162 (85,7) |
| Entre 5 et 15 % | 137 (3,7) | 121 (3,3) | 116 (3,2) | 115 (3,1) |
| Entre 15 et 30 % | 97 (2,6) | 88 (2,4) | 100 (2,7) | 97 (2,6) |
| Entre 30 et 50 % | 89 (2,4) | 98 (2,6) | 82 (2,2) | 83 (2,3) |
| 50 % et plus | 130 (3,5) | 116 (3,1) | 123 (3,3) | 118 (3,2) |

Tableau S5. Distribution des cantons pour l'exposition environnementale selon le recensement

| | Nombre de cantons (%) | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Fongicides | | | | |
| Proportion de surfaces avec matrice traitée | | | | |
| Moins de 50 % | 679 (18,4) | 987 (26,8) | 922 (25,0) | 839 (22,7) |
| Entre 50 et 75 % | 1 336 (36,2) | 953 (25,8) | 940 (25,5) | 965 (26,2) |
| Entre 75 et 90 % | 1 065 (28,9) | 896 (24,3) | 799 (21,6) | 857 (23,2) |
| 90 % et plus | 609 (16,5) | 853 (23,1) | 1 028 (27,9) | 1 028 (27,9) |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| Moins de 1 | 2 409 (65,3) | 855 (23,2) | 613 (16,6) | 569 (15,4) |
| Entre 1 et 2 | 656 (17,8) | 1 854 (50,2) | 1 180 (32,0) | 1 202 (32,6) |
| Entre 2 et 3 | 169 (4,6) | 434 (11,8) | 1 100 (29,8) | 1 133 (30,7) |
| Plus de 3 | 455 (12,3) | 546 (14,8) | 796 (21,6) | 785 (21,3) |
| Herbicides | | | | |
| Proportion de surfaces avec matrice traitée | | | | |
| Moins de 50 % | 125 (3,4) | 160 (4,3) | 197 (5,3) | 231 (6,2) |
| Entre 50 et 75 % | 8 (0,2) | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 80 (2,2) |
| Entre 75 et 90 % | 1 296 (35,1) | 139 (3,8) | 131 (3,6) | 199 (5,4) |
| 90 % et plus | 2 260 (61,3) | 3 390 (91,9) | 3 361 (91,1) | 3 179 (86,2) |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| Moins de 1 | 223 (6,0) | 236 (6,4) | 357 (9,7) | 412 (11,2) |
| Entre 1 et 2 | 3 462 (93,9) | 3 450 (93,5) | 3 220 (87,3) | 2 284 (61,9) |
| Entre 2 et 3 | 4 (0,1) | 3 (0,1) | 112 (3,0) | 983 (26,6) |
| Plus de 3 | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 10 (0,3) |
| Insecticides | | | | |
| Proportion de surfaces avec matrice traitée | | | | |
| Moins de 50 % | 3 347 (90,7) | 3 054 (82,8) | 347 (9,4) | 899 (24,4) |
| Entre 50 et 75 % | 199 (5,4) | 476 (12,9) | 2 400 (65,1) | 2 033 (55,1) |
| Entre 75 et 90 % | 135 (3,7) | 152 (4,1) | 927 (25,1) | 738 (20,0) |
| 90 % et plus | 8 (0,2) | 7 (0,2) | 15 (0,4) | 19 (0,5) |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| Moins de 1 | 3 197 (86,7) | 3 219 (87,3) | 3 344 (90,7) | 3 418 (92,6) |
| Entre 1 et 2 | 222 (6,0) | 214 (5,8) | 271 (7,3) | 239 (6,5) |
| Entre 2 et 3 | 101 (2,7) | 92 (2,5) | 74 (2,0) | 32 (0,9) |
| Plus de 3 | 169 (4,6) | 164 (4,4) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |

Tableau S5 (suite)

| | Nombre de cantons (%) | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Aryloxy-acides | | | | |
| Proportion de surfaces avec matrice traitée | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 170 (4,6) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 20 % | 286 (7,8) | 354 (9,6) | 789 (21,4) | 1 460 (39,6) |
| Entre 20 et 30 % | 178 (4,8) | 368 (10,0) | 795 (21,6) | 1 562 (42,3) |
| Entre 30 et 45 % | 513 (13,9) | 2 438 (66,1) | 1 494 (40,5) | 308 (8,4) |
| 45 % et plus | 2 565 (69,5) | 359 (9,7) | 286 (7,7) | 0 (0,0) |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 170 (4,6) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 0,20 | 309 (8,4) | 546 (14,8) | 789 (21,4) | 3 022 (81,9) |
| Entre 0,20 et 0,30 | 188 (5,1) | 787 (21,3) | 795 (21,6) | 308 (8,4) |
| Entre 0,30 et 0,45 | 565 (15,3) | 1 944 (52,7) | 1 494 (40,5) | 0 (0,0) |
| 0,45 et plus | 2 480 (67,2) | 242 (6,56) | 286 (7,7) | 0 (0,0) |
| 2,4-D | | | | |
| Proportion de surfaces avec matrice traitée | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 185 (5,0) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 5 % | 187 (5,1) | 272 (7,4) | 1 175 (31,9) | 2 205 (59,8) |
| Entre 5 et 10 % | 112 (3,0) | 533 (14,4) | 2 189 (59,3) | 1 125 (30,5) |
| Entre 10 et 20 % | 374 (10,1) | 2 357 (63,9) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| 20 % et plus | 2 869 (77,8) | 342 (9,3) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| Nombre moyen de traitements annuels | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 185 (5,0) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 0,05 | 196 (5,3) | 304 (8,2) | 1 175 (31,9) | 3 330 (90,3) |
| Entre 0,05 et 0,10 | 110 (3,0) | 2 053 (55,7) | 2 189 (59,3) | 0 (0,0) |
| Entre 0,10 et 0,20 | 521 (14,1) | 1 147 (31,1) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| 0,20 et plus | 2 715 (73,6) | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| Quantité annuelle totale diffusée (kg) | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 185 (5,0) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 10 | 390 (10,6) | 655 (17,8) | 792 (21,5) | 1 168 (31,7) |
| Entre 10 et 50 | 485 (13,2) | 850 (23,0) | 987 (26,7) | 1 164 (31,6) |
| Entre 50 et 100 | 367 (9,9) | 550 (14,9) | 572 (15,5) | 620 (16,8) |
| 100 et plus | 2 300 (62,3) | 1 449 (39,3) | 1 013 (27,5) | 378 (10,2) |
| Quantité annuelle moyenne diffusée par hectare (g/ha) | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 185 (5,0) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 15 | 143 (3,9) | 256 (6,9) | 649 (17,6) | 2 367 (64,2) |
| Entre 15 et 30 | 69 (1,9) | 297 (8,1) | 1 353 (36,7) | 963 (26,1) |
| Entre 30 et 60 | 123 (3,3) | 2 951 (80,0) | 1 362 (36,9) | 0 (0,0) |
| 60 et plus | 3 207 (86,9) | 0 (0,00) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |

Tableau S6. Distribution des cantons pour l'exposition professionnelle selon le recensement

| | Nombre de cantons (%) | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Fongicides | | | | |
| Proportion d'exploitations utilisatrices pour les cultures avec matrice | | | | |
| Moins de 50 % | 277 (7,5) | 306 (8,3) | 337 (9,1) | 356 (9,6) |
| Entre 50 et 75 % | 250 (6,8) | 244 (6,6) | 212 (5,8) | 147 (4,0) |
| Entre 75 et 90 % | 885 (24,0) | 600 (16,3) | 512 (13,9) | 428 (11,6) |
| 90 % et plus | 2 277 (61,7) | 2 539 (68,8) | 2 628 (71,2) | 2 758 (74,8) |
| Nombre moyen de passages annuels | | | | |
| Moins de 1 | 690 (18,7) | 257 (7,0) | 283 (7,7) | 304 (8,2) |
| Entre 1 et 2 | 1 140 (30,9) | 917 (24,9) | 406 (11,0) | 312 (8,5) |
| Entre 2 et 3 | 542 (14,7) | 1 167 (31,6) | 984 (26,7) | 1 004 (27,2) |
| Plus de 3 | 1 317 (35,7) | 1 348 (36,5) | 2 016 (54,6) | 2 069 (56,1) |
| Nombre moyen de passages annuels pondéré par la surface | | | | |
| Moins de 1 | 2 094 (56,8) | 689 (18,7) | 495 (13,4) | 455 (12,3) |
| Entre 1 et 2 | 794 (21,5) | 1829 (49,6) | 1 031 (28,0) | 1 021 (27,7) |
| Entre 2 et 3 | 228 (6,2) | 517 (14,0) | 1 192 (32,3) | 1 206 (32,7) |
| Plus de 3 | 573 (15,5) | 654 (17,7) | 971 (26,3) | 1 007 (27,3) |
| Herbicides | | | | |
| Proportion d'exploitations utilisatrices pour les cultures avec matrice | | | | |
| Moins de 50 % | 125 (3,4) | 160 (4,3) | 197 (5,3) | 231 (6,3) |
| Entre 50 et 75 % | 2 (0,1) | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 61 (1,6) |
| Entre 75 et 90 % | 447 (12,1) | 138 (3,8) | 148 (4,0) | 235 (6,4) |
| 90 % et plus | 3 115 (84,4) | 3 391 (91,9) | 3 344 (90,7) | 3 162 (85,7) |
| Nombre moyen de passages annuels | | | | |
| Moins de 1 | 177 (4,8) | 209 (5,7) | 310 (8,4) | 379 (10,3) |
| Entre 1 et 2 | 577 (15,6) | 444 (12,0) | 436 (11,8) | 351 (9,5) |
| Entre 2 et 3 | 2 411 (65,4) | 1 689 (45,8) | 1 596 (43,3) | 1 240 (33,6) |
| Plus de 3 | 524 (14,2) | 1 347 (36,5) | 1 347 (36,5) | 1 719 (46,6) |
| Nombre moyen de passages annuels pondéré par la surface | | | | |
| Moins de 1 | 246 (6,7) | 261 (7,1) | 384 (10,4) | 438 (11,9) |
| Entre 1 et 2 | 3 439 (93,2) | 3 417 (92,6) | 3 175 (86,1) | 2 287 (62,0) |
| Entre 2 et 3 | 4 (0,1) | 11 (0,3) | 130 (3,5) | 954 (25,8) |
| Plus de 3 | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 10 (0,3) |
| Insecticides | | | | |
| Proportion d'exploitations utilisatrices pour les cultures avec matrice | | | | |
| Moins de 50 % | 1 918 (52,0) | 1 748 (47,4) | 308 (8,4) | 436 (11,8) |
| Entre 50 et 75 % | 1 444 (39,1) | 1 619 (43,9) | 1 312 (35,6) | 1 333 (36,1) |
| Entre 75 et 90 % | 239 (6,5) | 247 (6,7) | 2 016 (54,6) | 1 864 (50,5) |
| 90 % et plus | 88 (2,4) | 75 (2,0) | 53 (1,4) | 56 (1,5) |

Tableau S6 (suite)

| | Nombre de cantons (%) | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Nombre moyen de passages annuels | | | | |
| Moins de 1 | 2 129 (57,7) | 2 431 (65,9) | 1 157 (31,4) | 1 643 (44,5) |
| Entre 1 et 2 | 934 (25,3) | 730 (19,8) | 2 287 (62,0) | 1 892 (51,3) |
| Entre 2 et 3 | 276 (7,5) | 216 (5,8) | 218 (5,9) | 141 (3,8) |
| Plus de 3 | 350 (9,5) | 312 (8,5) | 27 (0,7) | 13 (0,4) |
| Nombre moyen de passages annuels pondéré par la surface | | | | |
| Moins de 1 | 3 031 (82,2) | 3 101 (84,0) | 3 192 (86,5) | 3 354 (90,9) |
| Entre 1 et 2 | 304 (8,2) | 264 (7,2) | 390 (10,6) | 292 (7,9) |
| Entre 2 et 3 | 146 (4,0) | 126 (3,4) | 107 (2,9) | 43 (1,2) |
| Plus de 3 | 208 (5,6) | 198 (5,4) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| Aryloxy-acides | | | | |
| Proportion d'exploitations utilisatrices pour les cultures avec matrice | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 170 (4,6) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 30 % | 360 (9,7) | 495 (13,4) | 646 (17,5) | 1 929 (52,3) |
| Entre 30 et 40 % | 129 (3,5) | 230 (6,2) | 586 (15,9) | 1 401 (38,0) |
| Entre 40 et 50 % | 191 (5,2) | 976 (26,5) | 2 132 (57,8) | 0 (0,0) |
| 50 % et plus | 2 862 (77,6) | 1 818 (49,3) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| Nombre moyen de passages annuels | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 170 (4,6) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 0,20 | 265 (7,2) | 378 (10,2) | 434 (11,8) | 1 929 (52,3) |
| Entre 0,20 et 0,40 | 211 (5,7) | 438 (11,9) | 798 (21,6) | 1 401 (38,0) |
| Entre 0,40 et 0,50 | 147 (4,0) | 1 117 (30,3) | 2 132 (57,8) | 0 (0,0) |
| 0,50 et plus | 2 919 (79,1) | 1 586 (43,0) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| Nombre moyen de passages annuels pondéré par la surface | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 170 (4,6) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 0,15 | 304 (8,2) | 484 (13,1) | 620 (16,8) | 1 801 (48,8) |
| Entre 0,15 et 0,25 | 200 (5,4) | 415 (11,3) | 594 (16,1) | 1 529 (41,5) |
| Entre 0,25 et 0,40 | 404 (11,0) | 1 604 (43,5) | 1 349 (36,6) | 0 (0,0) |
| 0,40 et plus | 2 634 (71,4) | 1 016 (27,5) | 801 (21,7) | 0 (0,0) |
| 2,4-D | | | | |
| Proportion d'exploitations utilisatrices pour les cultures avec matrice | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 185 (5,0) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 5 % | 156 (4,3) | 235 (6,4) | 537 (14,6) | 882 (23,9) |
| Entre 5 et 10 % | 97 (2,6) | 285 (7,7) | 2 827 (76,6) | 2 448 (66,4) |
| Entre 10 et 20 % | 204 (5,5) | 1 096 (29,7) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| 20 % et plus | 3 085 (83,6) | 1 888 (51,2) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |

Tableau S6 (suite)

| | Nombre de cantons (%) | | | |
|--|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1979 | 1988 | 2000 | 2010 |
| Nombre moyen de passages annuels | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 185 (5,0) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 0,05 | 161 (4,4) | 277 (7,5) | 537 (14,6) | 3 330 (90,3) |
| Entre 0,05 et 0,10 | 100 (2,7) | 374 (10,2) | 2 827 (76,6) | 0 (0,0) |
| Entre 0,10 et 0,20 | 207 (5,6) | 2 494 (67,6) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| 0,20 et plus | 3 074 (83,3) | 359 (9,7) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| Nombre moyen de passages annuels pondéré par la surface | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 185 (5,0) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 0,05 | 240 (6,5) | 382 (10,4) | 1 214 (32,9) | 3 330 (90,3) |
| Entre 0,05 et 0,10 | 129 (3,5) | 2 132 (57,8) | 2 150 (58,3) | 0 (0,0) |
| Entre 0,10 et 0,15 | 155 (4,2) | 988 (26,8) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| 0,15 et plus | 3 018 (81,8) | 2 (0,0) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |
| Quantité annuelle moyenne diffusée par hectare (g/ha) | | | | |
| 0 | 147 (4,0) | 185 (5,0) | 325 (8,8) | 359 (9,7) |
| Entre 0 et 20 | 210 (5,7) | 384 (10,4) | 1 075 (29,1) | 3 330 (90,3) |
| Entre 20 et 40 | 108 (2,9) | 2 025 (54,9) | 2 164 (58,7) | 0 (0,0) |
| Entre 40 et 60 | 86 (2,3) | 1 095 (29,7) | 125 (3,4) | 0 (0,0) |
| 60 et plus | 3 138 (85,1) | 0 (0,0) | 0 (0,0) | 0 (0,0) |