

RAPPORT
INERIS-DRC-14-142495-07142A

06/07/2014

**Méthodologie d'élaboration des atlas
régionaux d'inégalités environnementales pour
les quatre Eléments Traces Métalliques : Cd,
Ni, Cr, Pb
Rapport final**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable

**Méthodologie d'élaboration des atlas régionaux
d'inégalités environnementales pour quatre Eléments
Traces Métalliques : Cd, Ni, Cr, Pb**

Rapport final

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Julien CAUDEVILLE	Muriel ISMERT	Martine RAMEL
Qualité	Ingénieur de l'Unité Impact sanitaire et expositions	Responsable de l'unité Impact sanitaire et expositions	Responsable du Pôle Risque et technologies durables
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	6
DEFINITIONS	7
1. INTRODUCTION	8
2. APPROCHE GLOBALE ET PRESENTATION DE L'ATLAS	10
3. CARTOGRAPHIES DES CONCENTRATIONS ENVIRONNEMENTALES	12
3.1 Cartographie des concentrations dans l'air	13
3.2 Cartographie des concentrations dans le sol	14
3.3 Cartographie des concentrations dans l'eau	15
4. MISE EN ŒUVRE DE LA MODELISATION	17
4.1 Description des comportements et des populations	18
4.2 Caractérisation des media d'exposition pris en compte	19
5. INDICATEURS D'EXPOSITION	19
5.1 Estimation de la Dose Journalière d'Exposition (DJE)	20
5.2 Estimation des Indicateurs Spatialisés du Risque (ISR).....	21
6. PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE DES DONNEES ENVIRONNEMENTALES	22
7. CONCLUSION	24
REFERENCES	24

RESUME

Le Plan National Santé Environnement (PNSE) constitue un cadre de programmation et de planification de l'action gouvernementale à travers l'identification d'actions à engager visant à prendre en compte la santé environnementale dans les politiques publiques de façon pérenne. Ainsi, les actions du second PNSE (PNSE 2) sont développées selon deux axes structurants :

- réduire les expositions responsables de pathologies à fort impact sur la santé,
- réduire les inégalités environnementales.

Chaque région a sélectionné, au regard des enjeux spécifiques sur son territoire, les actions qui répondent aux préoccupations majeures de santé environnementale de la population locale. Cette analyse a abouti à l'élaboration de PRSE 2 (Plans Régionaux en Santé Environnement). Une des actions des PRSE 2 est d'identifier les points noirs environnementaux en vue de définir des priorités d'une future politique publique de réduction des expositions.

Dans ce contexte, les démarches de l'évaluation de l'exposition et de la modélisation multimédia, interfacées dans un Système d'Information Géographique (SIG), constituent un outil méthodologique particulièrement adapté pour la caractérisation « sources-vecteurs-cibles », tenant compte des différentes échelles spatiales (globale, régionale et locale) et temporelles.

La plateforme PLAINE, développée par l'INERIS, permet l'agrégation des données nationales et/ou locales de sources et de formats différents. Des techniques d'analyse spatiale sont développées dans les SIG pour traiter les bases de données d'entrée et les rendre pertinentes vis à vis des objectifs définis de caractérisation de l'exposition. Le modèle multimédia d'exposition MODUL'ERS permet le calcul des doses d'exposition et des risques de populations cibles liés à l'ingestion de produits d'alimentation, d'eau de consommation, de sol et à l'inhalation de contaminants atmosphériques. Ce modèle est alimenté par des bases de données géoréférencées de différents types : environnemental (eau, air, sol, alimentation), comportemental et démographique, interfacées avec un SIG au sein de la plateforme.

Le présent rapport décrit les approches méthodologiques mises en œuvre pour la construction des cartes environnementales et d'exposition des atlas régionaux réalisées pour quatre Eléments Traces Métalliques (ETM) (Cd, Cr, Ni, Pb) sur la France métropolitaine (Référence DRC-13-133187-01132A) transmis aux différentes DREAL dans le cadre des PRSE2.

Au regard des données disponibles dans les différentes bases de données centralisées, trois approches ont été mises en œuvre pour caractériser les inégalités environnementales pour ces quatre polluants :

- la caractérisation de la contamination des milieux,
- la quantification de l'exposition,
- la construction d'indicateurs composites de l'exposition.

Trois types d'indicateurs d'exposition sont proposés correspondant à différents niveaux d'agrégation de voies d'exposition et de polluants. Les indicateurs d'exposition permettent d'attribuer des scores à chacune des entités géographiques définies. Toutefois, la cartographie des inégalités d'exposition d'un territoire, au vu des données disponibles, pose un certain nombre de questions méthodologiques qui confèrent aux cartes réalisées de nombreuses incertitudes.

DEFINITIONS

- Analyse spatiale : Raisonnement qui permet de déduire les caractéristiques d'un phénomène localisé en croisant des données géographiques.
- Bruit de fond : Concentration représentative ambiante en un élément, en un composé, ou en une substance dans un milieu donné, d'un territoire donné. Elle tient compte des concentrations naturelles (fond pédogéochimique naturel) et de celles provenant éventuellement de sources d'origine anthropique diffuses (comme les pollutions diffuses par engrais ou pesticides liées aux pratiques agricoles usuelles). Il peut aussi être défini comme la concentration habituelle dans un milieu donné, en l'absence de contamination locale (BRGM, 2000¹).
- Dose externe : Quantité de substance en contact avec les barrières de l'organisme (parois intestinales, alvéoles pulmonaires, peau). Elle s'exprime généralement en masse de substance par unité de masse corporelle et par unité de temps (Bonnard, 2010²).
- Dose Journalière d'Exposition : Dose (interne ou externe) de substance reçue par jour par l'organisme rapportée à la masse corporelle de l'individu (Bonnard, 2003³).
- ETM : Élément trace métallique, notion tendant à remplacer celle de métaux lourds qui a été et qui reste un concept mal défini car associant des métaux toxiques réellement lourds à d'autres l'étant moins.
- Exposition chronique : Exposition persistante, continue ou discontinue, se produisant sur une longue période, allant d'une année à la vie entière.
- Fond géochimique : Concentration naturelle en un élément, en un composé ou en une substance dans un milieu donné, en l'absence de tout apport extérieur spécifique, tel que l'activité humaine (BRGM, 2000¹).
- Krigeage : Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale, parfois considérée comme la plus juste d'un point de vue statistique, qui permet une estimation linéaire basée sur l'espérance mathématique et aussi sur la variance de la donnée spatialisée. À ce titre, le krigeage se base sur le calcul, l'interprétation et la modélisation du variogramme, qui est une appréciation de la variance en fonction de la distance entre données.
- Milieux d'exposition : Les milieux d'exposition désignent précisément les milieux au contact desquels se trouve la cible étudiée. Dans le cas des populations humaines, il peut s'agir par exemple, de l'air à l'intérieur des habitations, de l'eau du robinet, de la couche de sol superficiel, mais aussi des aliments (Bonnard, 2010²).
- Milieux environnementaux : Par opposition aux milieux d'exposition, les milieux environnementaux désignent l'air, les eaux souterraines, les eaux superficielles, les sols, les sédiments (Bonnard, 2010²).
- Voie d'exposition : Voie de passage d'une substance de la source vers une cible. Une voie d'exposition inclut une source, un point d'exposition et une voie d'exposition. Si le point d'exposition diffère de la source, il existe également un mécanisme de propagation et un compartiment intermédiaire où le polluant est transporté (Bonnard, 2010²).

¹ BRGM. Gestion des sites (potentiellement) pollués - version 2. BRGM Editions 2000.

² Bonnard R. Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle. DRC-08-94882-16675B, 2010.

³ Bonnard R. Evaluation de l'impact sur la santé des rejets atmosphériques des tranches charbon d'une grande installation de combustion - Partie 2 : Exposition par voies indirectes. INERIS-DRC-03-45956/ERSA-RBn 2003.

1. INTRODUCTION

Le Plan National Santé Environnement (PNSE) constitue un cadre de programmation et de planification de l'action gouvernementale à travers l'identification d'actions à engager visant à prendre en compte la santé environnementale dans les politiques publiques de façon pérenne. Ainsi, les actions du second PNSE (PNSE 2) sont développées selon deux axes structurants :

- réduire les expositions responsables de pathologies à fort impact sur la santé,
- réduire les inégalités environnementales.

Chaque région a sélectionné, au regard des enjeux spécifiques sur son territoire, les actions qui répondent aux préoccupations majeures de santé environnementale de la population locale. Cette analyse a abouti à l'élaboration de PRSE 2 (Plans Régionaux en Santé Environnement). Une des actions des PRSE 2 est d'identifier les points noirs environnementaux en vue de définir des priorités d'une future politique publique de réduction des expositions.

L'inégalité environnementale se fonde sur le constat de disparités très fortes marquant des territoires ou des individus face aux dégradations de l'environnement. Dans ces zones, les populations apparaissent davantage exposées aux effets négatifs des pollutions de l'air, du sol ou de l'eau. Les mesures pouvant contribuer à l'identification de ces points noirs puis à la réduction des expositions et à la protection de la santé des populations concernées constituent un axe prioritaire du second Plan National Santé Environnement.

La cartographie des inégalités d'expositions d'un territoire par la spatialisation directe des données issues des mesures environnementales pose un certain nombre de questions méthodologiques qui confèrent aux cartes réalisées de nombreuses incertitudes. Pour des résolutions fines, les données disponibles n'étant pas toujours à un niveau d'agrégation suffisant, les outils d'analyse spatiale inclus dans la plupart des SIG permettent d'estimer des variables à partir de variables auxiliaires ou d'augmenter les résolutions de celles-ci.

La construction de cartes de paramètres décrivant des compartiments environnementaux isolés, lorsqu'ils ne sont pas croisés avec des données de population, reste insuffisante au regard de la caractérisation des expositions des populations à l'échelle d'un territoire. L'exposition humaine aux substances chimiques émises dans l'environnement dépend du contact de la population avec l'eau, l'air, le sol et les aliments contaminés et des concentrations des substances dans ces milieux. La multiplicité des voies, le besoin de considérer les expositions sur le long terme (vie entière), la difficulté de disposer de mesures sur la personne et la nécessité de réaliser des études prospectives concourent à un besoin fort de modélisation dans ce domaine. Dans ce contexte, les démarches de l'évaluation de l'exposition et de la modélisation multimédia, interfacées dans un Système d'Information Géographique (SIG), constituent un outil méthodologique particulièrement adapté pour la caractérisation « sources-vecteurs-cibles », tenant compte des différentes échelles spatiales (globale, régionale et locale) et temporelles.

La plateforme PLAINE permet l'agrégation des données nationales et/ou locales de sources et de formats différents. Des techniques d'analyse spatiale sont développées dans les SIG pour traiter les bases de données d'entrée et les rendre pertinentes en vue des objectifs définis dans l'étude. Le modèle multimédia d'exposition MODUL'ERS (Bonnard and McKone, 2010⁴) permet le calcul des doses d'exposition et des risques de populations cibles liés à l'ingestion de produits d'alimentation, d'eau de consommation, de sol et à l'inhalation de contaminants atmosphériques. Ce modèle est alimenté par des bases de données géoréférencées de différents types : environnemental (eau, air, sol, alimentation), comportemental et démographique, interfacées avec un SIG au sein de la plateforme.

Cette approche répond à des problématiques d'enjeux au niveau national et en appui aux pouvoirs publics, d'identification des points noirs environnementaux (PNSE2), et de prioriser les mesures de gestion à mettre en œuvre. Il s'agit d'élaborer une approche globale, intégrée et transparente d'aide à la décision. Les échelles restent a minima régionales, au vu des données environnementales spatialisées disponibles au niveau national. Les développements inhérents peuvent faciliter la priorisation au niveau national, en assurant davantage de robustesse et de mise en cohérence, tout en ne se substituant pas, par exemple, à l'identification pragmatique des points noirs environnementaux au niveau régional (PRSE2).

Le présent rapport décrit les approches méthodologiques mises en œuvre pour la construction des cartes environnementales et d'exposition des atlas régionaux réalisées pour quatre ETM (Cd, Cr, Ni, Pb) sur la France métropolitaine. Il s'organise de la manière suivante :

- le chapitre 2 présente l'atlas et l'approche globale ;
- le chapitre 3 décrit la construction des cartes environnementales ;
- les chapitres 4 et 5 s'attachent à la mise en œuvre de la modélisation des indicateurs d'exposition ;
- le chapitre 6 détaille l'intégration des incertitudes dans les cartographies d'exposition ;
- le chapitre 7 rassemble les conclusions.

⁴ Bonnard R, McKone TE. Integration of the predictions of two models with dose measurements in a case study of children exposed to the emissions of a lead smelter, Human and Ecological Risk Assessment 2010; 15(6).

2. APPROCHE GLOBALE ET PRESENTATION DE L'ATLAS

Ce premier atlas concerne la famille des éléments traces métalliques (Cd, Cr, Ni, Pb).

Les atlas en format ppt présentent systématiquement pour chacune des régions :

- les hypothèses de modélisation,
- les concentrations environnementales estimées (eau, air, sol) pour chacun des polluants,
- les doses journalières d'exposition (ingestion) pour chacun des polluants,
- les indicateurs spatialisés du risque pour le Cd, Cr, Ni et leur combinaison,
- les indicateurs spatialisés du risque intégrant l'incertitude des données spatiales d'entrée pour le Cd, Ni, Pb,
- les doses journalières d'exposition (ingestion) intégrant l'incertitude des données spatiales d'entrée pour le Cr,
- les doses journalières d'exposition (ingestion) pour le Cr, les indicateurs spatialisés du risque et leur combinaison pour le Cd, Ni, Pb avec des fonds de carte (Open Street Map).

Pour l'ensemble des paramètres cartographiés au niveau régional est associé un tableau rassemblant les statistiques élémentaires du paramètre obtenu au niveau national (minimum, maximum, moyenne, écart-type).

La caractérisation des inégalités environnementales implique quatre conditions majeures :

- la prise en compte des voies d'exposition principales ;
- la description des phénomènes sur des mailles fines ;
- l'intégration des sources actuelles, passées et sur de larges échelles ;
- la construction de scénarios réalistes intégrant les expositions liées au bruit de fond.

Les ETM sont accumulés dans tous les compartiments de l'environnement. L'exposition a donc été caractérisée pour les voies d'inhalation et d'ingestion par une approche multimédia. **La contamination par voie cutanée est considérée ici comme négligeable par rapport aux autres voies d'exposition.** Celle-ci est surtout prépondérante dans le cas des expositions professionnelles. Ne sont développés ici que les aspects portant sur l'évaluation de la dose externe. La voie par inhalation, liée à l'air intérieur, n'est également pas traitée ici. L'ensemble des développements, hypothèses de travail et méthodes sont détaillées dans Caudeville J, 2011⁵.

⁵ Caudeville J. Développement d'une plateforme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques: construction d'indicateurs spatialisés en vue d'identifier les inégalités environnementales à l'échelle régionale. Compiègne : Université Technologique de Compiègne, 2011, 198 pages.

L'INERIS a développé ses propres outils à l'aide des équations disponibles dans la littérature pour évaluer les niveaux d'exposition et de risque à partir de contamination environnementale (Bonnard, 2010)⁶. L'outil de modélisation MODUL'ERS est ici utilisé pour calculer les expositions partir des cartographies des concentrations dans les milieux environnementaux. La nécessité d'intégrer de nombreuses données de source de nature variée implique de définir une base uniforme pour la cartographie et l'analyse spatiale. Un maillage kilométrique est généré sur l'ensemble de la France métropolitaine (dite grille de référence). Une base de données est construite permettant la description, sur la grille, de chacun des éléments de la chaîne source-vecteur-cible des paramètres pertinents de l'étude. La résolution kilométrique permet un recoupement pertinent de l'ensemble des données de population, environnementales et d'exposition sur une échelle spatiale fine. Il devient nécessaire de développer des méthodes de traitement pour reconstruire les variables d'intérêt représentatives au niveau de résolution définie. Les bases de données environnementales et populationnelles utilisées dans le cadre de ces travaux sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Variables spatiales intégrées dans le modèle multimédia

Paramètre	Support et résolution	Source et mode de spatialisation
Dépôt atmosphérique	Mailles de 10 x 15 km	Agrégation des données du modèle de dispersion atmosphérique CHIMERE (INERIS)
Concentration initiales dans les sols de surface	Point et surface (commune)	Interpolation géostatistique (krigeage) des données de la nouvelle collecte de la base de données des éléments traces métalliques et du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (BD ETM, programme INRA & ADEME ; RMQS, INRA)
Concentration de bruit de fond dans les sols de surface	Maille de 1 X 1 km	Interpolation géostatistique (modèle linéaire mixte) des données du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (INRA, Marchant et al., 2010 ⁷).
Concentration dans l'eau de distribution	Surface (commune)	Spatialisation des données de la base Sise'Eaux (DGS) au niveau des Unités de Distribution (UDI)
Scénario d'ingestion	Surface (intersection des communes et de l'occupation au sol)	Construction d'un indicateur d'autoconsommation, basé sur une étude au niveau national, spatialisé à partir des données de recensement (INSEE) et de l'occupation au sol (CORINE Land Cover)
Consommation alimentaire	Surface (région)	Spatialisation des données de la base Ciblex à partir des zones administratives définies par ZEAT

⁶ Bonnard R. Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle. DRC-08-94882-16675B, 2010.

⁷ Marchant BP, Saby NPA, Lark M, Bellamy PH, Jolivet CC, Arrouays D. Robust analysis of soil properties at the national scale: cadmium content of French soils. European Journal of Soil Science 2010; 61: 144-152.

3. CARTOGRAPHIES DES CONCENTRATIONS ENVIRONNEMENTALES

Les bases de données utilisées dans le cadre de ce travail ont été identifiées suite à un inventaire des bases de données spatiales environnementales. Leur sélection et utilisation dépendent des critères suivants :

- disponibilité de données harmonisées,
- représentativité géographique de ces données,
- pertinence de leur utilisation dans le cadre de l'évaluation de l'exposition et de la caractérisation des inégalités environnementales.

Les informations non structurées (ex : informations contenues issues d'investigations ponctuelles dans les rapports d'activités, rapports d'études, et documents divers) et les bases de données produites au niveau local ou régional n'ont pas été utilisées dans ce travail. En effet, l'intégration de données produites localement lors de campagnes de mesures ponctuelles (surveillances réglementaires autour des ICPE, gestion de pollution historique...) constitue des sources de données hétérogènes dont l'intégration entraînerait des biais liés au manque d'harmonisation au niveau national (contexte de production et disponibilité).

L'estimation de l'exposition provenant de l'ensemble des sources (ou au moins les principales) est essentielle à l'évaluation de l'ampleur du risque associé à l'exposition aux substances présentes dans l'environnement général. Dans ce cadre, le choix des données pour décrire les compartiments environnementaux s'est orienté de manière préférentielle sur les données mesurées, celles-ci permettant l'intégration de l'ensemble des sources, passées et actuelles. L'année 2004 correspond à la période pour laquelle le plus de données étaient disponibles.

Des techniques d'analyse spatiale sont développées dans les SIG pour traiter les bases de données d'entrée et les rendre pertinentes en vue des objectifs définis dans l'étude. Néanmoins, toutes ces méthodes sont dépendantes des couvertures spatiales et de la qualité des données disponibles pour fournir une caractérisation précise des variations locales de l'exposition. Des méthodes permettent de reconstruire des variables à partir de variables connues ou d'augmenter les résolutions de celles-ci. On trouvera ci-après un résumé rapide des approches retenues pour chaque milieu en insistant sur les biais associés.

3.1 CARTOGRAPHIE DES CONCENTRATIONS DANS L'AIR

Les données de modélisation du modèle eulérien CHIMERE⁸ (Bessagnet et al., 2010⁹) développé par l'Institut Laplace CNRS et l'INERIS sont intégrées pour caractériser les concentrations atmosphériques et les dépôts au sol dans le modèle d'exposition. Les modèles de type eulérien permettent le calcul de la dispersion et de la chimie des gaz, des particules, des polluants primaires et secondaires pour des sources ponctuelles, linéiques et surfaciques. L'évolution au cours du temps des concentrations de polluants est calculée en reliant la variation temporelle des concentrations de polluants sur le domaine à des processus physico-chimiques, qui augmentent (processus de production) ou diminuent (processus de perte) la concentration d'une espèce chimique dans l'atmosphère. A partir de données météorologiques et d'émission EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) et TNO (National and regional emission monitoring), le modèle a simulé des concentrations et des dépôts sur des mailles de 10 x 15 km sur l'année de référence 2004 (Figure 1). Les concentrations atmosphériques et les dépôts à proximité immédiate des sources d'émission, essentiellement industrielles, sont donc sous-estimées. En conséquence, les expositions liées aux transferts de contaminants vers les matrices animales et végétales et les voies d'inhalation sont également sous-estimées dans ces zones. A noter que les données d'émissions spatialisées construites à partir de l'Inventaire National Spatialisé permettront d'améliorer les résolutions et qualités des prédictions dans le cadre de la mise à jour de ces cartographies.

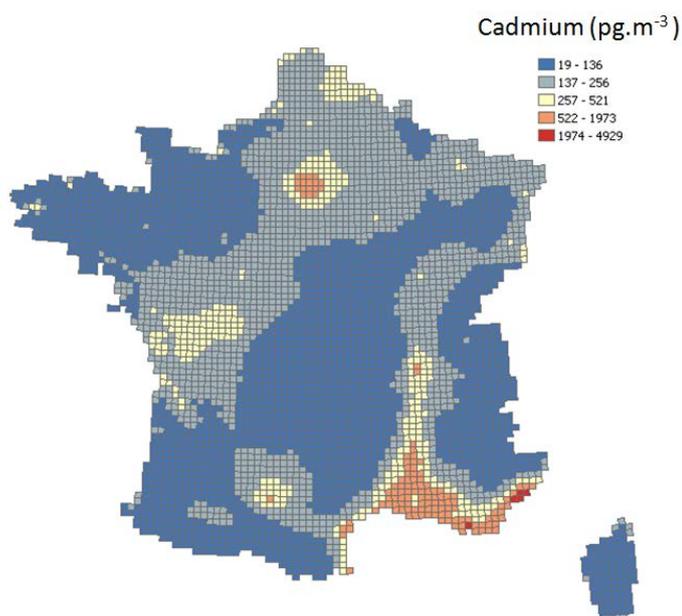


Figure 1 : Concentration atmosphérique en cadmium dans la maille de modélisation pour l'année 2004. Source et traitement : INERIS.

⁸ **CHIMERE** est un modèle de chimie-transport. C'est un code informatique qui réunit un ensemble d'équations représentant le transport et la chimie d'espèces chimiques et qui permet de quantifier l'évolution d'un panache de polluants en fonction du temps sur différents domaines (de l'urbain au continental). À partir de données de météorologie et de flux d'émissions, CHIMERE permet de calculer des champs tridimensionnels de concentrations de polluants dans l'atmosphère. De par les données d'entrée utilisées, le nombre d'équations à résoudre et la physico-chimie qui y est représentée, CHIMERE est un modèle méso-échelle c'est-à-dire simulant la troposphère (de la surface à 20hPa, 10km d'altitude) pour une résolution horizontale de 1 à 100km et sur des domaines d'étude allant de la ville au continent.

⁹ Bessagnet B, Seigneur C, Menut L. Impact of dry deposition of semi-volatile organic compounds on secondary organic aerosols. Atmospheric Environment. 2010; 44(14): 1781-1787.

3.2 CARTOGRAPHIE DES CONCENTRATIONS DANS LE SOL

En Evaluation des Risques Sanitaires (ERS), les contaminations des végétaux, des animaux et l'ingestion de sol par les individus sont classiquement estimées à partir de la concentration de la couche de sol s'étendant de la surface à la profondeur d'intérêt (la hauteur du sol bêché ou labouré pour le transfert vers les végétaux cultivés).

Dans le cadre de la réalisation des plans d'épandage des boues de stations d'épuration urbaines, de très nombreuses analyses de huit ETM (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn) ont été effectuées sur des échantillons d'horizons de surface de sols avant l'épandage de boues résiduaires et sur l'ensemble du territoire national depuis 1985 (date à laquelle la norme NFU 44-041 a été adoptée) et surtout à partir de 1994 (programme ADEME-INRA : Duigou et Baize, 2010¹⁰). Une collecte s'est déroulée de novembre 2008 à janvier 2010. Une base de données a ainsi été créée rassemblant les analyses de Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn pour plus de 73 000 sites répartis de manière hétérogène sur l'ensemble du territoire. Cette base de données intègre à la fois des données géoréférencées sur des points et au niveau communal. Les méthodes géostatistiques incluses dans les SIG permettent l'interpolation spatiale des données sur le territoire considéré et notamment l'estimation et la cartographie des niveaux de concentrations sur l'ensemble de la zone d'étude. Une méthode de krigeage (ou algorithme d'interpolation en géostatistique) a permis d'intégrer les données sans coordonnées, géoréférencées à la commune (Caudeville et al., 2012¹¹) pour cartographier les concentrations des polluants du sol. A cette collecte (BD ETM), les données du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) de l'INRA d'Orléans ont été intégrées pour l'analyse.

Bien que les données proviennent de campagnes de mesures différentes (analysées avec des protocoles et à des temps différents), entraînant des problèmes de comparabilité, les échelles de temps d'évolution (perte/apport) pour le compartiment sol, pour ces polluants et ces échelles spatiales, sont relativement longues (dizaines d'années).

Les différents protocoles d'analyse utilisés pour mesurer l'ensemble des échantillons entraînent des variations quantitatives sur les résultats notamment sur le choix de l'extractant : acide fluorhydrique ou eau régale. Une méthode a été développée pour prendre en compte ces deux types de données (Caudeville et al., 2013¹²).

Néanmoins, l'hétérogénéité de répartition spatiale des échantillons implique que certaines zones ne soient que très faiblement (ou pas du tout) caractérisées par des mesures (Figure 2).

¹⁰ Duigou N, Baize D. Nouvelle collecte nationale d'analyses d'éléments en traces dans les sols (horizons de surface) - (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). Rapport final. Contrat ADEME 0875C0036 2010 ; 284.

¹¹ Caudeville J, Goovaerts P, Carré F, Bonnard R, Arrouays D, Cicoletta C, Jolivet C, Saby NPA, Boudet C. 2012. Spatial modeling of human exposure to soil contamination- an example of Digital Soil Assessment. Chapter in "Digital Soil Assessments and beyond". Eds. Minasny B, Malone BP, McBratney AB. Published CRC Press.

¹² Caudeville J, Boudet C, Saby N, Carré F, Arrouays D. Fine-resolution soil exposure mapping based on different soil measurement datasets and taxotransfer rules. Spatial Statistics 2013, Columbus, US, 6 juin 2013. Poster.

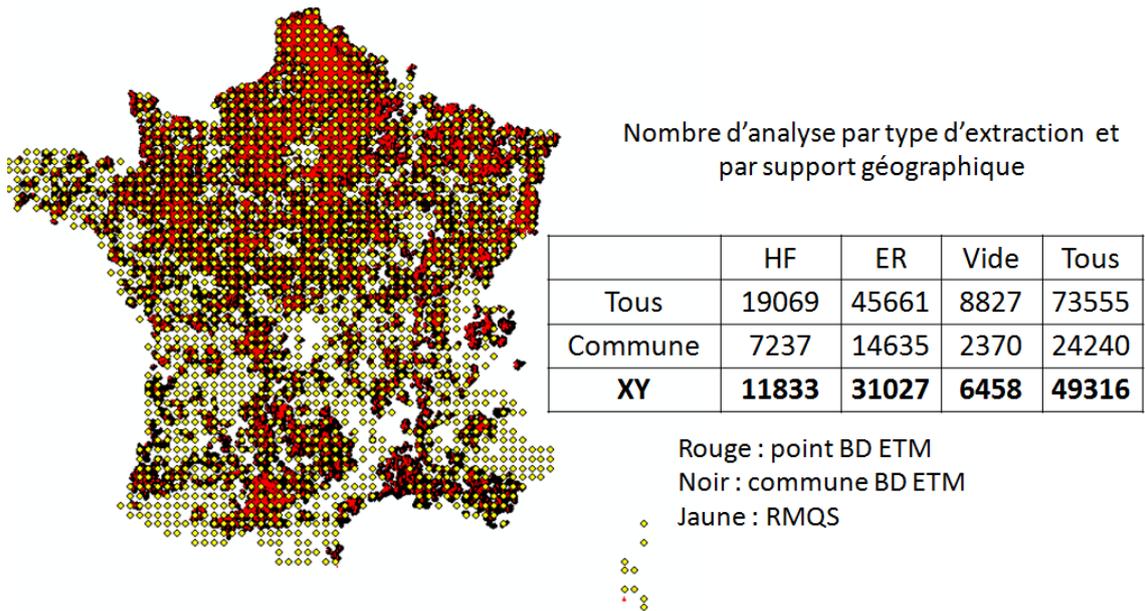


Figure 2 : Répartition des échantillons de sol en France des différentes bases de données (RMQS et BD ETM). Source : BDETM© INRA, Unité INFOSOL, Orléans, ADEME, 2012 ; RMQS © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2012. Traitement : INERIS.

3.3 CARTOGRAPHIE DES CONCENTRATIONS DANS L'EAU

L'exposition aux substances chimiques peut dépendre de l'ingestion d'eau, qui constitue un milieu récepteur non négligeable. La caractérisation de la qualité des eaux de consommation constitue donc une étape primordiale du processus d'estimation des expositions.

L'acheminement de l'eau potable depuis le site de production jusqu'au robinet se fait par un réseau de distribution. En France, ce réseau est structuré en Unités de Distribution (UDI) rattachées à des Unités de Gestion (UGE), qui délivrent une eau de qualité réputée homogène (même origine). L'UDI présente une unité de gestion (propriétaire et gestionnaire des installations uniques). Tous les abonnés raccordés au réseau public d'eau potable sont ainsi associés à une UDI. Les données recueillies par les ARS dans le cadre de leur mission de contrôle sanitaire des eaux d'alimentation sont intégrées dans la base SISE'Eaux¹³ et permettent d'évaluer la qualité des eaux distribuées.

Ces concentrations sont renseignées à partir de la base SISE'Eaux et spatialisées sur la grille de référence à partir de l'attribution aux communes des concentrations mesurées au niveau des UDI à partir desquelles les eaux sont acheminées.

¹³ Davezac H, Grandguillot G, Robin A, et al. L'eau potable en France 2005-2006, Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative, Paris 2008.

Le choix temporel est fait de manière à obtenir, d'une part, un encadrement de l'année de référence (2004) et, d'autre part, un nombre minimum de données pour chaque UDI. En effet, les fréquences de prélèvements et d'analyses sont basées sur les débits des installations (captages et stations de traitement) et sur les populations desservies (UDI) pour les polluants considérés (une seule analyse tous les 5 ans dans le pire des cas). Le nombre d'échantillons inférieurs au seuil de détection étant très important (90% des valeurs) et très hétérogènes d'un département à un autre (liés à des données aberrantes, les seuils déclarés peuvent varier jusqu'à un facteur d'un million). Dans un souci d'homogénéisation et pour éviter une surestimation ou une sous-estimation de cette voie d'exposition, différentes valeurs par défaut sont attribuées pour remplacer les seuils associés aux limites de détection pour le calcul des concentrations moyennes. Ces valeurs ont été définies suite à une analyse exploratoire sur chacun des polluants et correspondent aux valeurs maximales et minimales de l'encadrement des gammes des bornes minimales et maximales des seuils déclarés. Entre ces gammes, la valeur correspond à la moitié de la valeur du seuil de détection déclaré (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs de remplacement des seuils de détection déclarés par polluant

LD Cd	valeur Cd	LD Cr	Valeur Cr	LD Pb	Valeur Pb	LD Ni	Valeur Ni
[0 ; 0,1]	0,1	[0 ; 0,5]	0,5	[0 ; 0,5]	0,5	[0 ; 1]	1
]0,1 ; 5]	LD/2	]0,5 ; 25]	LD/2	]0,5 ; 10]	LD/2	]1 ; 10]	LD/2
]5 ; 100]	5	]25 ; 2000]	30	]10 ; 3000]	10	]10 ; 500]	10

Au delà des limites de la spatialisation et celles liées aux limites de détection, le caractère trop ponctuel des mesures de polluants dans les eaux de consommation ne permet pas de prendre en compte les fluctuations et les pics (données des ARS ; fréquence des mesures en fonction de la population desservie, d'une fois tous les 5 ans à 4 fois par an). Ainsi, un risque de non représentativité des mesures par rapport à l'exposition réelle des populations peut être induit. Toutefois, en cas de dépassement de seuil, de nouvelles analyses sont réalisées permettant d'évaluer le caractère ponctuel de ce dépassement. Ces zones sont donc potentiellement mieux caractérisées.

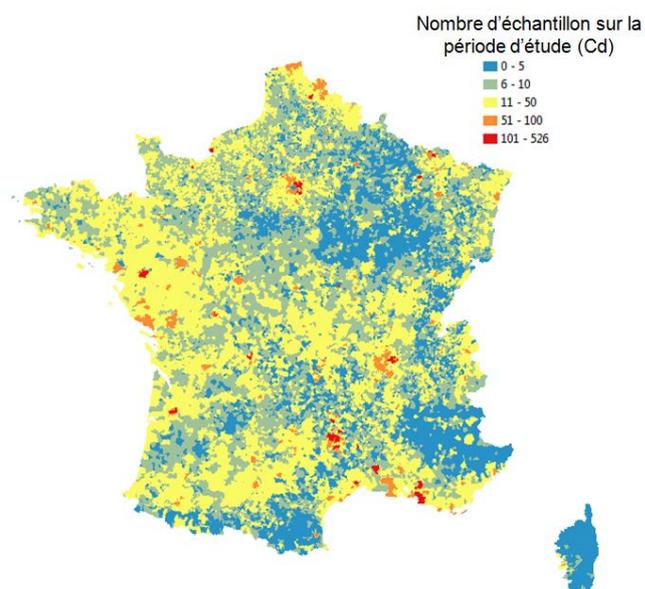


Figure 3 : Nombre d'échantillons intégré pour le calcul des concentrations dans les eaux de distribution sur la période d'étude (cas du Cd). Source : Ministère chargé de la santé - ARS - SISE Eaux. Traitement : INERIS.

En application de la directive 98/89/CE, les analyses des échantillons de nickel et de plomb, contrairement à celles du cadmium et du chrome, sont effectuées au niveau du robinet du consommateur final. Ce protocole permet la prise en compte des relargages des métaux dans les eaux par corrosion des tuyaux de distribution. Toutefois, la prise en compte de données individuelles entraîne une plus grande variabilité des résultats et une perte de représentativité. De-même, les données de spatialisation transmises par les ARS ne permettent pas d'avoir une cartographie lisible des réseaux de distribution d'eau pour faciliter la prise en compte des zones de mixage et le lien entre une commune et un réseau de distribution.

4. MISE EN ŒUVRE DE LA MODELISATION

Le modèle multimédia d'exposition MODUL'ERS permet le calcul des doses d'exposition et des risques de populations cibles liés à l'ingestion de produits d'alimentation, d'eau de consommation, de sol et à l'inhalation de contaminants atmosphériques. Ce modèle est alimenté par des bases de données géoréférencées de différents types : environnementales (eau, air, sol, alimentation) et populationnelles interfacées avec un SIG au sein de la plateforme.

On s'intéresse aux expositions totales incluant :

- l'inhalation d'air respiré localement ;
- l'ingestion d'aliments d'origine locale autoproduits par les consommateurs. Les concentrations dans ces aliments sont modélisées à partir de la contamination des compartiments environnementaux ;
- l'ingestion d'aliments produits en dehors de la zone d'impact du site ;
- l'ingestion de sol.

Dans ce travail, les équations ont été adaptées à la disponibilité et à la représentativité des données suite à l'analyse de l'inventaire. Le modèle calcule la **dose externe** à travers les différentes voies d'exposition. Il s'agit d'équations adaptées à la prise en compte du caractère local et chronique des expositions (Caudeville et al., 2011¹⁴). La démonstration et la présentation plus détaillée de ces équations sont décrites dans le guide 'Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle' (Bonnard, 2010¹⁵). Les paramètres initialement décrits dans le modèle, prévus dans un cadre d'ERS classiques et donc majorants, ont été modifiés pour une approche plus réaliste des expositions.

¹⁴ Caudeville J, Bonnard R., Boudet C., Denys S., Govaert G., Cicoletta A. Development of a spatial stochastic multimedia model to assess population exposure at a regional scale. *Journal of Total Environment* 2012 Volume 432, Pages 297-308.

¹⁵ Bonnard R. Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle. DRC-08-94882-16675B, 2010. <http://www.ineris.fr/centredoc/quations-modifrbn-relecture6-couverture.pdf>

4.1 DESCRIPTION DES COMPORTEMENTS ET DES POPULATIONS

La description de la voie d'ingestion nécessite la définition du poids corporel, des quantités d'aliments, d'eau, de sol ingérées et du facteur d'autoconsommation des populations considérées. Dans le cadre de la cartographie des inégalités environnementales, les scénarios d'exposition doivent permettre l'inter-comparaison des différents groupes de population étudiés. L'approche majorante est évitée. Des sous-groupes en fonction de l'âge sont construits de manière à décrire des scénarios d'exposition plus réalistes. **Les expositions liées au bruit de fond d'aliments produits en dehors des zones d'études sont également intégrées dans la modélisation.** Ces sources sont prises en compte par la spatialisation du facteur d'autoconsommation caractérisant la part d'aliments consommés supposés provenir de la zone d'exposition retenue.

Différents niveaux d'agrégation spatiale des données sont utilisés pour caractériser l'ingestion alimentaire :

- Au niveau local : contamination des produits autoproduits ; facteur d'autoconsommation.
- Au niveau régional : régime alimentaire.
- Au niveau national : contamination des produits issus du commerce.

Ces choix correspondent à un compromis entre disponibilité et représentativité des données. Les rations alimentaires fournies par la base de donnée CIBLEX, découpées par ZEAT (Zone d'Étude et d'Aménagement du Territoire) permettent d'intégrer les disparités infra régionales en matière de consommation alimentaire selon des zones homogènes sur le plan du régime alimentaire. Les régimes alimentaires sont présentés en fonction de l'âge des individus concernés, ce critère conditionnant les données physiologiques caractéristiques associées. Ces catégories de classes d'âges ont permis de redéfinir celles-ci dans le modèle.

Les consommations alimentaires de 0 à 2 ans sont basées sur divers conseils alimentaires et études récentes en France. Pour cette raison, ces classes d'âges n'ont pas été intégrées dans le modèle, celles-ci n'ayant pas été construites sur la même base méthodologique que les autres données de l'enquête INCA¹⁶.

Un facteur d'autoconsommation caractérise la part d'aliments consommés supposée provenir de la zone d'exposition retenue. Ce pourcentage est calculé à partir des données de l'enquête INSEE (Bertrand, 1993¹⁷). Il correspond à la différence entre les consommations totales d'aliments par personne et les consommations données hors autoconsommation. Quatre scénarios d'autoconsommation sont considérés, basés sur le nombre d'habitants par unité urbaine. Un facteur correctif empirique est défini pour cette étude. Il s'agit ici d'intégrer les disparités intercommunales par l'intégration de l'occupation des sols dans la caractérisation des facteurs d'autoconsommation (Caudeville et al., 2011¹⁸).

¹⁶ Volatier J.L. Enquête INCA individuelle et nationale sur les consommations alimentaires, Editions Technique & Documentation ISBN : 2-7430-0426-6 2000.

¹⁷ Bertrand M. Consommation et lieux d'achat des produits alimentaires en 1991. Collection INSEE Résultats, Paris 1993

¹⁸ Caudeville J, Boudet C, Denys S, Bonnard R, Govaert G, Cicoletta A. (2011). Caractérisation des inégalités environnementales en Picardie fondée sur l'utilisation couplée d'un modèle multimédia et d'un système d'information géographique. Environnement, risques et santé. 10(6), 239-242. doi : 10.1684/ers.2011.0492.

4.2 CARACTERISATION DES MEDIA D'EXPOSITION PRIS EN COMPTE

Pour l'inhalation, les concentrations correspondent aux valeurs moyennes sur l'année des concentrations atmosphériques dans l'air ambiant. Il est considéré que les riverains restent sur place toute la journée et 365 jours par an. Il est assumé dans le modèle que la qualité de l'air est la même pour les milieux intérieur et extérieur.

Pour les expositions par ingestion d'eau de consommation, les concentrations dans l'eau correspondent aux valeurs moyennes des eaux distribuées sur la maille considérée. Les teneurs en polluant dans les aliments de la part non locale sont issues de l'Etude de l'Alimentation Totale (EAT¹⁹) et correspondent aux niveaux moyens observés de contamination des aliments. Ces données sont représentatives des aliments consommables sur le territoire français et prennent en compte les variabilités saisonnières.

Les concentrations dans l'air, dans l'eau et dans les aliments de provenance commerciale sont considérées constantes sur toute la durée de modélisation.

Les concentrations en substances chimiques dans les produits locaux sont calculées à partir de la modélisation des transferts de polluant des compartiments environnementaux vers les média d'exposition.

Le sol contient de façon naturelle des Eléments Traces Métalliques (ETM) qui ont pour origine la roche mère et agit également comme réservoir des retombées atmosphériques actuelles ou passées. Ainsi sa caractérisation nécessite la prise en compte des concentrations initiales, du fond géochimique, des dépôts (émissions actuelles) et des processus de dégradation. Les concentrations de bruit de fond dans les sols permettent de tenir compte, dans la modélisation, des concentrations naturelles et des sources diffuses d'origine anthropique. De même, les mécanismes de perte qui peuvent concourir à la réduction de la concentration du polluant dans le sol ont été intégrés. Les concentrations dans le sol sont estimées sur 70 ans en tenant compte des concentrations initiales, du bruit de fond, des dépôts et des phénomènes de pertes. Les dépôts sont estimés à partir de la modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants liés aux émissions industrielles et aux transports. Les phénomènes de ruissellement et de lixiviation sont pris en compte pour caractériser les pertes de polluant dans le sol.

Les concentrations dans les végétaux (légume-feuille, légume-racine, légume-fruit et fruit) sont évaluées à partir des transferts racinaires, de la remise en suspension des particules du sol et des dépôts atmosphériques sur les parties consommables ; les concentrations dans les produits d'origine animale (viande, œuf, lait) à partir des compartiments sol et végétal (ensilage, fourrage et céréales).

Le calcul de transfert racinaire des ETM du sol superficiel vers les différents végétaux utilise les données disponibles dans la base de données BAPPET (projet BAPPET, 2005-2007) afin de définir des coefficients de transfert. Une analyse bibliographique approfondie des valeurs de paramètres de transfert a été réalisée en vue de disposer des données nécessaires au calcul de transfert d'éléments vers les matrices animales. Le facteur de bioaccessibilité ici est considéré égal à 1.

5. INDICATEURS D'EXPOSITION

Trois niveaux d'indicateurs d'exposition sont proposés dans l'atlas :

¹⁹ Leblanc JC. Etude de l'alimentation totale française., INRA-DGAL-AFSSA, Mycotoxines, minéraux et éléments traces, Coord., 2004.

- les doses journalières d'exposition (DJE) pour chacun des polluants combinant les voies d'exposition associées à l'ingestion,
- les indicateurs spatialisés du risque (ISR) pour chacun des polluants (sauf pour le Cr) combinant les voies d'exposition associées à l'ingestion et à l'inhalation,
- l'indicateur spatialisé du risque composite (ISRC) combinant les voies d'exposition associées à l'ingestion et à l'inhalation de l'ensemble des polluants (sauf pour le Cr).

L'ensemble des indicateurs est calculé sur chacune des zones mailles de la grille de référence.

5.1 ESTIMATION DE LA DOSE JOURNALIERE D'EXPOSITION (DJE)

L'utilisation de la DJE permet la combinaison des expositions relatives à l'ensemble des média d'exposition de la voie d'ingestion (eau, sol, aliments). La DJE est calculée selon les équations classiques par sommation de chacune des voies.

La DJE dans le travail présenté ici, relative au risque non-cancérigène, est calculée selon l'équation suivante :

$$DJE_{i,k,m} = \sum_j \frac{FE_k \times Q_{j,k} \times (Cl_{i,j,m} \times f_{ACj,m} + Cn_{i,j} \times (1 - f_{ACj,m}))}{PC_k}$$

avec $DJE_{i,k,m}$: Dose journalière d'exposition moyenne pour une substance i, pour la classe k et pour la maille m ($mg.kg^{-1}.j^{-1}$),

$Q_{j,k}$: Quantité journalière ingérée de matrice j par la classe d'âge k ($kg.j^{-1}$),

$Cl_{i,j,m}$: Concentration en substance i dans la matrice d'exposition j locale pour la maille m ($mg.kg^{-1}$),

$Cn_{i,j}$: Concentration en substance i dans la matrice d'exposition j non locale ($mg.kg^{-1}$),

$f_{ACj,m}$: Fraction de matrice d'exposition j pour la maille m (facteur d'autoconsommation),

FE_k : Fréquence d'exposition de la classe d'âge k ($jours.an^{-1}$), la fréquence d'exposition considérée est de 365 jours sur 365 ($F = 1$),

PC_k : Poids corporel moyen de la classe de population k sur la période d'exposition.

Les scénarios d'exposition construits de manière à caractériser des groupes de référent (classe d'âge, localisation, comportement alimentaire) permettent de quantifier l'exposition des populations aux différents polluants. L'exposition de chacune des classes est estimée. Les DJE présentées dans l'atlas correspondent aux moyennes des DJE des différentes classes d'âge estimées pondérées par la durée des classes d'âge.

Pour des besoins de simplification, de nombreux types d'aliments de faible autoconsommation mais présents dans l'EAT n'ont pas été pris en compte, entraînant une sous-estimation des expositions calculées (évaluée plus loin). L'estimation des apports journaliers de contaminants obtenus dans l'EAT montre que pour le nickel et le chrome, la non prise en compte de certaines catégories d'aliment, comme les produits à base de céréale, peut être significative.

5.2 ESTIMATION DES INDICATEURS SPATIALISES DU RISQUE (ISR)

Pour les métaux étudiés, les DJE estimées pour la voie par inhalation sont généralement négligeables par rapport à celles obtenues pour l'ingestion. De plus, les agents toxiques n'ont pas les mêmes mécanismes d'action, les mêmes organes cibles, ni les mêmes types d'effet d'une voie d'exposition à une autre. Les DJE pour l'ingestion et les concentrations atmosphériques pour l'inhalation peuvent être confrontées aux Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) dans le cadre des évaluations de risque sanitaire pour obtenir des Quotients de Danger (QD) pour les risques non cancérogène.

La construction d'indicateurs de risques à travers la sommation des risques associés à la fois aux voies d'ingestion et d'inhalation permet la combinaison de ces différentes voies d'expositions à partir de l'étape de calcul du risque.

L'Indicateur Spatialisé du Risque (ISR) est défini, tel que :

$$ISR_i = QD_{i,inh} + QD_{i,ing}$$

Avec ISR_i : Indicateur spatialisé du risque pour le polluant i ,

$QD_{i,inh}$: Quotient de danger pour la voie d'inhalation et le polluant i ,

$QD_{i,ing}$: Quotient de danger pour la voie d'ingestion et le polluant i .

L'Indicateur Spatialisé du Risque (ISR), correspond à l'exposition des populations modélisée sur une durée de 70 ans par inhalation et ingestion pondérée par les VTR sans seuil.

L'utilisation de VTR ajoute un niveau d'incertitude supplémentaire non négligeable, d'autant plus que celles-ci sont construites dans une logique conservatrice et pour des spéciations non spécifiques, pouvant potentiellement générer des distorsions dans la comparaison des voies d'exposition du fait de l'utilisation de facteurs de précaution. Ce type d'indicateur permet l'intégration en une seule métrique de l'ensemble des voies d'exposition mais assimile des réponses biologiques à des expositions d'effets sanitaires différents. Cette approche permet de construire des indicateurs relatifs permettant l'identification des sous-groupes de population pouvant subir de potentiels effets sanitaires et n'indiquent seulement que la sévérité relative de ces risques.

L'ensemble des concentrations environnementales en chrome sont fournies en termes de teneur totale, sans précision sur la spéciation du métal. Celui-ci ayant des effets sanitaires très différents selon que le degré d'oxydation soit III ou VI, il est difficile de lui associer une VTR en l'absence d'information sur sa spéciation. Ce polluant a donc été écarté pour l'analyse des ISR.

Le dernier indicateur le plus agrégé correspond à la somme de l'ensemble des risques obtenus pour l'ensemble des polluants et des voies d'exposition :

$$ISRC = ISR_{Cd} + ISR_{Pb} + ISR_{Ni}$$

Avec $ISRC$ Indicateur spatialisé du risque composite,

ISR_x : Indicateur spatialisé du risque pour le polluant x .

Cet indicateur s'éloigne de réalités biologiques mais permet une visualisation de zones de cumul d'expositions provenant de différents polluants et compartiments environnementaux (air, eau, sol).

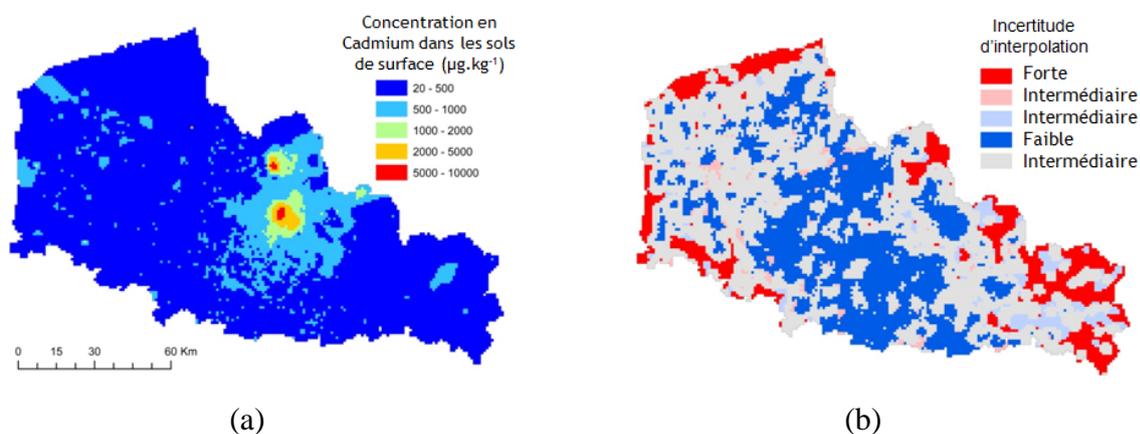
6. PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE DES DONNEES ENVIRONNEMENTALES

La nécessité de construire des variables continues sur l'ensemble de la zone à partir de données spatiales non exhaustives génère des incertitudes liées aux différents problèmes de représentativité des données. Selon la densité d'information relative à partir de laquelle la variable est construite, les zones sont plus ou moins bien caractérisées. Il devient alors nécessaire de fournir des éléments permettant d'évaluer la représentativité des données d'entrée qui contribuent significativement aux expositions.

La caractérisation de la densité d'information et du type de données à partir desquels les indicateurs ont été construits permet l'interprétation de la représentativité des prédictions : la variance de krigeage pour les sols, le nombre d'échantillons pour les eaux et la maille de prédiction du modèle de dispersion atmosphérique. Ces informations peuvent être intégrées aux cartographies d'indicateurs de l'exposition à travers l'utilisation d'une maille de taille adaptative fonction de l'incertitude des données d'entrée : plus l'incertitude est élevée, plus la maille est grossière.

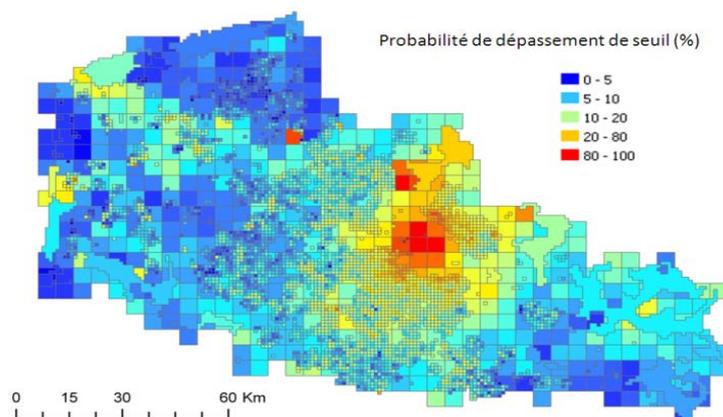
Les résultats précédents, à travers l'analyse des déterminants, permettent d'estimer les compartiments environnementaux qui contribuent majoritairement aux expositions pour chacun des polluants.

Par exemple pour le cadmium, l'exposition est principalement liée à l'ingestion de fruits et de légumes de provenance locale, potentiellement contaminés par le transfert racinaire du sol vers les végétaux (Caudeville et al., 2012a)²⁰. Les cartes d'incertitude construites dans le cadre de l'interpolation spatiale des données de concentration dans les sols permettent de générer la taille des mailles sur l'ensemble de la zone : la variance d'interpolation est plus importante dans les endroits moins denses en données de mesure. La carte de variance permet donc d'évaluer la précision de l'estimation, selon l'endroit considéré, dans le domaine d'étude et de repérer les zones où l'échantillonnage est insuffisant (Caudeville et al., 2012b)²¹.



²⁰ Caudeville J, Bonnard R., Boudet C., Denys S., Govaert G., Cicoletta A. Development of a spatial stochastic multimedia model to assess population exposure at a regional scale. *Journal of Total Environment* 2012 Volume 432, Pages 297-308.

²¹ Caudeville J, Goovaerts P, Carré F, Bonnard R, Arrouays D, Cicoletta C, Jolivet C, Saby NPA, Boudet C. 2012. Spatial modeling of human exposure to soil contamination- an example of Digital Soil Assessment. Chapter in "Digital Soil Assessments and beyond". Eds. Minasny B, Malone BP, McBratney AB. Published CRC Press.



(c)

Figure 4 : Construction par interpolation spatiale (krigeage) des cartes (a) de concentration de cadmium dans les sols, (b) d'incertitudes d'interpolation. (c) Intégration des incertitudes spatiales dans la cartographie de l'indicateur d'exposition (ici probabilité de dépassement de la VTR par la DJE).

Bien que les contributions aux expositions des indicateurs soient portées principalement par un seul compartiment environnemental (selon les voies de transfert préférentielles par polluant), il est observé une diversité de situations de contribution des compartiments environnementaux au niveau local. Ces différentes combinaisons de contribution sont estimées sur chacune des zones et intégrées à travers la maille adaptative dans le rendu des cartes d'indicateurs d'exposition.

In fine, ce type de carte permet :

- d'estimer le niveau de confiance à accorder aux résultats obtenus,
- de renseigner les biais intrinsèques relatifs aux données d'entrée,
- d'évaluer les potentielles sur ou sous-estimation des prédictions,
- de déterminer les zones pour lesquelles des collectes de données supplémentaires sont nécessaires.

7. CONCLUSION

L'identification, à l'échelle d'un territoire, des inégalités environnementales des populations et de leurs déterminants est rendue possible à travers l'intégration et le traitement de données spatialisées et la construction d'indicateurs d'exposition. Ces travaux répondent aux enjeux, au niveau national et en appui aux pouvoirs publics, d'identification et de hiérarchisation des points noirs environnementaux (PNSE2), en vue de prioriser les mesures de gestion à mettre en œuvre.

L'utilisation de données spatiales ne répondant pas initialement exactement aux objectifs de l'étude entraîne des biais d'utilisation liés au géocodage, à la disponibilité et à la qualité des données, l'absence d'accompagnement par des métadonnées, ou l'hétérogénéité spatio-temporelle des mesures ou des estimations. Les fréquences de mesures où les densités spatiales de prélèvement ne sont pas toujours suffisantes. L'incertitude est inhérente à ce type d'exercice, elle peut être réduite et mieux caractérisée en collectant plus de données et par le développement de techniques permettant l'amélioration de la représentativité spatiale des données d'entrée pour pallier le caractère ponctuel des données comme les mesures de polluants (par exemple dans les sols de surface). Ces cartes permettent également l'orientation de collectes de données supplémentaires ou de campagnes de terrain dans les zones de densité d'informations faibles ou celles dont une surexposition de la population est suspectée.

Aucune méthodologie ne permet d'intégrer dans les approches cartographiques les effets synergiques à l'exposition de plusieurs substances (effet cocktail). Au regard de ces limites associées, les indicateurs composites d'exposition proposés ici sont des scores relatifs permettant la priorisation de l'action.

Ces cartographies constituent un point de départ homogène au niveau national permettant un état de référence en termes d'expositions dans le contexte des PRSE pouvant être amélioré à travers notamment l'intégration de données produites au niveau régional pour l'analyse de zones plus fines ou de secteurs particuliers. L'évolution de la disponibilité des données environnementales permettra une mise à jour des cartes proposées. De même l'exercice réalisé sur ces quatre polluants sera décliné prochainement d'autres polluants ou facteurs de risque, les polluants organiques (HAP) par exemple.

REFERENCES

- Bertrand M. Consommation et lieux d'achat des produits alimentaires en 1991. Collection INSEE Résultats, Paris 1993
- Bessagnet B, Seigneur C, Menut L. Impact of dry deposition of semi-volatile organic compounds on secondary organic aerosols. *Atmospheric Environment*. 2010; 44(14): 1781-1787.
- Bonnard R. Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle. DRC-08-94882-16675B, 2010.
- Bonnard R. Evaluation de l'impact sur la santé des rejets atmosphériques des tranches charbon d'une grande installation de combustion - Partie 2 : Exposition par voies indirectes. INERIS-DRC-03-45956/ERSA-RBn 2003.
- Bonnard R, McKone TE. Integration of the predictions of two models with dose measurements in a case study of children exposed to the emissions of a lead smelter, *Human and Ecological Risk Assessment* 2010; 15(6).
- BRGM. Gestion des sites (potentiellement) pollués - version 2. BRGM Editions 2000.
- Caudeville J. Développement d'une plateforme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques: construction d'indicateurs spatialisés en vue d'identifier les inégalités environnementales à l'échelle régionale. Compiègne : Université Technologique de Compiègne, 2011, 198 pages.
- Caudeville J, Bonnard R., Boudet C., Denys S., Govaert G., Cicoletta A. Development of a spatial stochastic multimedia model to assess population exposure at a regional scale. *Journal of Total Environment* 2012 Volume 432, Pages 297-308.
- Caudeville J, Goovaerts P, Carré F, Bonnard R, Arrouays D, Cicoletta C, Jolivet C, Saby NPA, Boudet C. 2012. Spatial modeling of human exposure to soil contamination- an example of Digital Soil Assessment. Chapter in "Digital Soil Assessments and beyond". Eds. Minasny B, Malone BP, McBratney AB. Published CRC Press.

- Caudeville J, Boudet C, Denys S, Bonnard R, Govaert G, Cicoella A. (2011). Caractérisation des inégalités environnementales en Picardie fondée sur l'utilisation couplée d'un modèle multimédia et d'un système d'information géographique. *Environnement, risques et santé*. 10(6), 239-242. doi : 10.1684/ers.2011.0492.
- Caudeville J, Boudet C, Saby N, Carré F, Arrouays D. Fine-resolution soil exposure mapping based on different soil measurement datasets and taxotransfer rules. *Spatial Statistics* 2013, Columbus, US, 6 juin 2013. Poster.
- Davezac H, Grandguillot G, Robin A, et al. L'eau potable en France 2005-2006, Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative, Paris 2008.
- Duigou N, Baize D. Nouvelle collecte nationale d'analyses d'éléments en traces dans les sols (horizons de surface) - (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). Rapport final. Contrat ADEME 0875C0036 2010 ; 284.
- Leblanc JC. Etude de l'alimentation totale française., INRA-DGAL-AFSSA, Mycotoxines, minéraux et éléments traces, Coord., 2004.
- Marchant BP, Saby NPA, Lark M, Bellamy PH, Jolivet CC, Arrouays D. Robust analysis of soil properties at the national scale: cadmium content of French soils. *European Journal of Soil Science* 2010; 61: 144-152.
- Volatier JL. Enquête INCA individuelle et nationale sur les consommations alimentaires, Editions Technique & Documentation ISBN : 2-7430-0426-6 2000.