

Les éléments en traces dans les sols agricoles du Nord-Pas-de-Calais

I. Étude et cartographie des teneurs des horizons de surface

D. Baize⁽¹⁾, F. Douay⁽²⁾, E. Villanneau⁽³⁾, H. Bourennane⁽¹⁾, T. Sterckeman⁽⁴⁾, H. Ciesielski⁽⁵⁾ et D. King⁽¹⁾

- 1) INRA, UR2072 Science du Sol, Centre d'Orléans, CS 40001 Ardon, F-45075 Orléans cedex 2
Denis.Baize@orleans.inra.fr
- 2) Groupe ISA, Equipe Sols et Environnement, Laboratoire Génie Civil et géoEnvironnement Lille Nord de France (EA 4515)
48, boulevard Vauban, F-59046 Lille cedex
- 3) INRA Infosol, Centre d'Orléans, CS 40001 Ardon, F-45075 Orléans cedex 2
- 4) ENSAIA Nancy Université, INRA, Sols et Environnement - F-54505 Vandœuvre-lès-Nancy cedex
- 5) INRA, Laboratoire d'Analyses des Sols - 273, rue de Cambrai, F-62000 Arras

RÉSUMÉ

La base de données utilisée pour la présente étude rassemble des populations d'analyses de sols provenant de cinq sources correspondant chacune à une stratégie d'échantillonnage différente et à un objectif distinct. Au total, 3929 analyses réalisées entre 1990 et 2007 ont été collectées : elles provenaient presque exclusivement d'horizons de surface de sols agricoles. Outre les concentrations en ETM, les principales caractéristiques agro-pédologiques et les coordonnées géographiques, la base de données contient également des informations sur l'occupation du sol et sur la nature du matériau parental. Dans le Nord -Pas-de-Calais affleurent des roches sédimentaires variées, souvent recouvertes par des dépôts éoliens limoneux, mais tous ces matériaux montrent des teneurs naturelles faibles en ETM. Les différentes stratégies d'échantillonnage se sont assez bien complétées et ont permis une bonne couverture du territoire régional et des diverses causes de contaminations anthropiques : aussi bien les sources diffuses que celles très ponctuelles.

Ont été réalisés divers traitements tels que : statistiques régionales descriptives ; examen de la localisation des valeurs anormales ; cartographies mono-élémentaires par krigeage ; vision multi-élémentaire grâce à un indice numérique additif très simple.

Un fort contraste apparaît entre des secteurs fortement influencés par des contaminations voire des pollutions multimétalliques (zones riveraines de l'agglomération lilloise, environs immédiats de grands sites industriels) et les zones rurales qui ne montrent pas de contaminations nettes à l'exception du cadmium apporté par la fertilisation phosphatée.

Outre une vision spatiale des teneurs pour les 8 principaux éléments traces, les traitements ont permis d'avoir une bonne connaissance statistique des teneurs usuelles en stratifiant par matériaux parentaux et par petites régions naturelles. Ces « teneurs agricoles habituelles » (TAH) ainsi stratifiées peuvent être correctement estimées en considérant toutes les valeurs comprises entre le percentile 10 et le percentile 90. Ces TAH peuvent être utilisées comme valeurs de référence plus appropriées que de simples statistiques calculées à l'échelon régional ou départemental, tout particulièrement dans le cadre de l'interprétation de l'état des milieux ou pour proposer aux services santé-environnement des Agences Régionales de Santé des valeurs seuils de sélection pour prendre en compte tel ou tel élément trace dans une évaluation des risques sanitaires.

Mots clés

Éléments traces, horizon de surface, statistiques, Nord-Pas-de-Calais, valeurs de référence.

SUMMARY

TRACE ELEMENTS IN AGRICULTURAL SOILS FROM NORD-PAS-DE-CALAIS REGION (FRANCE)

I. Study and mapping of surface soil horizons

The data-set used for the present study gathers analyses coming from five sources each one corresponding to a different sampling strategy and a distinct objective. In total, 3929 analyses of surface soil horizons were collected carried out between 1990 and 2007. These were almost exclusively taken from cultivated lands. Besides the trace metal concentrations, the major agro-pedological characteristics and the geographical coordinates, the data-set also contains information relative to the land use and lithology of the parent materials. In the Nord - Pas-de-Calais region various sedimentary rocks are outcropping often overlaid by aeolian silty deposits, but all these materials show low natural contents in trace elements.

The different sampling strategies complemented rather well each other and allowed a good covering of the region territory and diverse causes of anthropogenic contamination: diffuse as well as point-sourced.

Have been carried out diverse data processing such as: i) region-wide summary statistics; ii) examination of the location of outlier values; iii) design of maps of each trace element using kriging; iv) multi-element view thanks to a very simple additive numerical index, etc.

A marked contrast appears between areas strongly influenced by multi-metal contamination or even pollution (surroundings of the Lille urban area, lands in the close vicinity of large industrial plants) and rural territories which do not show noticeable contamination (with the exception of cadmium supplied by phosphate fertilizers).

Besides a spatial view of the concentrations of soils in the main trace elements, the data processing allowed us to have good statistic knowledge of usual concentrations, especially when stratifying the data by parent material and "little natural regions". These "usual agricultural concentrations" (UAC) can be well assessed by considering all the values included between percentile 10 and percentile 90. UAC obtained in this manner can provide local "reference values" or guidelines much more appropriate than mere statistics reckoned at the region or the "département" scale, particularly in the framework of the approach so-called "interpretation of the state of the environment". These values also provide a reference state for those who must evaluate possibly polluted sites and carry out health risk assessments.

Key-words

Trace elements, topsoils, statistics, kriging, Nord-Pas-de-Calais, reference values.

RESUMEN

LOS ELEMENTOS EN TRAZA EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS DE LA REGIÓN "NORTE - PASO DE CALAIS"

I. Estudio y cartografía de los contenidos en los horizontes de superficie.

La base de datos usada para el estudio presente reúne poblaciones de análisis de suelos que provienen de cinco fuentes que corresponden cada una a estrategia de muestreo diferente y a un objetivo distinto. En total, se colectaron 3929 análisis realizados entre 1990 y 2007: provinieron casi exclusivamente de horizontes de superficie de suelos agrícolas. Además de las concentraciones en elementos en trazas metálicas (ETM), las principales características agro-pedológicas y las coordinadas geográficas, la base de datos contiene igualmente informaciones sobre el uso del suelo y sobre la naturaleza del material parental. En la región Norte- Paso de Calais afloran rocas sedimentarias variadas, a menudo recubiertas por depósitos eólicos limosos, pero todos estos materiales muestran pequeños contenidos naturales en ETM.

Las diferentes estrategias de muestreo se completaron bastante bien y permitieron una buena cobertura del territorio regional y de diversas causas de contaminaciones antrópicas: tan las fuentes difusas que puntuales.

Se realizaron diversos tratamientos como: estadísticas regionales descriptivas; examen de la localización de valores anormales; cartografías mono-elementarias por kriging; visión multielementaria gracias a un índice numérico aditivo muy simple.

Un fuerte contraste aparece entre los sectores fuertemente influenciados por contaminaciones, incluso contaminaciones metálicas (zonas vecinas de la aglomeración de Lille, cercanías inmediatas de grandes lugares industriales) y las zonas rurales que no muestran contaminaciones netas con excepción del cadmio aportado por la fertilización fosfatada.

Además de una visión espacial de los contenidos para 8 principales elementos traza, los tratamientos permitieron tener un buen conocimiento estadístico de los contenidos usuales estratificando por materiales parentales y por pequeñas regiones naturales. Estos "contenidos agrícolas habituales" (TAH) así estratificados pueden estar correctamente estimados considerando todos los valores incluidos entre el percentil 10 y el percentil 90. Estos TAH pueden estar usados como valores de referencia mas apropiados que simples estadísticas calculadas a escala regional o departamental, particularmente en el cuadro de la interpretación del estado de los medios o para proponer a los servicios de salud y medio ambiente de las Agencias Regionales de Salud valores umbrales de selección para tomar en cuenta tal o tal elementos traza en una evaluación de los riesgos sanitarios.

Palabras clave

Elementos en traza, horizonte de superficie, estadísticas, región Nord-Pas-de-Calais, valores de referencia.

Dès l'antiquité et au cours du Moyen Âge, les teneurs en éléments traces métalliques (ETM) se sont accrues dans les couches supérieures des sols, essentiellement en lien avec des techniques très imparfaites d'extraction des métaux à partir des minerais. Ce phénomène s'est grandement accéléré depuis environ 150 ans du fait d'une utilisation massive de fertilisants (minéraux, organiques, épandages de boues de stations d'épuration...), de produits phytosanitaires et des retombées atmosphériques en lien avec les activités anthropiques (émissions industrielles, chauffage urbain, circulation automobile...). Ces apports, très variables dans le temps et l'espace, peuvent influencer parfois fortement sur la qualité des sols et des productions végétales. Les transferts des ETM vers la biosphère et notamment les plantes mettent en jeu des mécanismes complexes, que ce soit dans leur rhizosphère ou dans leurs parties aériennes (Bargagli, 1998; Prasad and Hagemeyer, 1999). Ils sont fonction de la nature, des concentrations et de la spéciation des éléments, des paramètres physico-chimiques des sols et des caractéristiques physiologiques des plantes. L'origine des ETM est aussi un facteur déterminant dans leur mobilité et leur biodisponibilité; les éléments d'origine anthropogène sont en effet connus pour être plus mobiles que ceux d'origine géogène (Karczewska, 1996; Wilcke *et al.*, 1998).

Plus que jamais, dans le contexte de la mondialisation des échanges et des crises concernant la sécurité alimentaire, la connaissance des teneurs des ETM dans les sols et de leur distribution spatiale est un élément déterminant pour une optimisation durable des agrosystèmes et une gestion raisonnable des espaces ruraux. Cette connaissance est donc au cœur des préoccupations des gestionnaires des territoires et des évaluateurs de risques. Les méthodologies mises en œuvre pour l'évaluation de ces valeurs de référence diffèrent toutefois fortement selon les objectifs et les auteurs. Il en est ainsi pour les stratégies d'échantillonnage des sols, et ceci quel que soit leur usage. Il peut s'agir d'un échantillonnage systématique (McGrath and Loveland, 1992), stratifié pour assurer une représentation taxonomique (Ordre) et géographique (Chen *et al.*, 1999) ou selon l'usage des sols et la probabilité de leur contamination (De Temmerman *et al.*, 2003; Kim and Kim, 1999). D'autres auteurs, tels que Pierce *et al.* (1982), ont mis en œuvre une approche typologique basée sur une stratification tenant compte à la fois de l'usage des sols, de la taxonomie (Série) et de l'organisation pédogénétique.

En France, il existe plusieurs bases de données traitant des analyses d'ETM dans les sols.

Le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) constitue un cadre national pour l'observation de l'évolution de la qualité des sols. Cette approche systématique repose sur l'observation et le suivi de près de 2 200 sites de surveillance répartis uniformément sur le territoire français, selon une maille carrée de 16 km de côté, quelle que soit l'occupation du sol (Arrouays *et al.*, 2003; Jolivet *et al.*, 2006; Villanneau *et al.*, 2008).

Peut-être cité également le programme européen FOREGS dont le nombre de sites analysés est de 1588 pour toute l'Europe dont seulement 119 sur le territoire français (Rodriguez-Lado *et al.*, 2008).

Dans ce contexte, la démarche typologique mise en œuvre en région Nord -Pas-de-Calais reste originale car fondée sur un échantillonnage stratifié des sols selon la petite région naturelle, la typologie des sols, leurs horizons et leurs usages (Sterckeman *et al.*, 2002b; Sterckeman *et al.*, 2007). Elle a abouti à la constitution d'un outil, le Référentiel Pédogéochimique du Nord-Pas-de-Calais, qui renseigne sur les caractéristiques physico-chimiques et les teneurs en 18 ETM et en deux éléments majeurs des principaux types de sols de la région (horizons de surface, matériaux parentaux et horizons intermédiaires). Grâce à ses 276 sites étudiés et aux 768 horizons analysés, cet outil a fourni une bonne connaissance des teneurs en ETM des sols du Nord-Pas-de-Calais, connaissance extrapolable sur une base typologique.

Les suivis agronomiques réalisés dans le cadre des épandages de boues de stations d'épuration des eaux sur les terres agricoles peuvent fournir également de nombreuses données analytiques qui contribuent à améliorer les connaissances sur les teneurs en ETM des sols cultivés.

C'est ce qui a été fait en 1998 dans le cadre d'une première collecte nationale (dite ANADEME ou BDETM) pour laquelle le nombre de sites analysés (presque uniquement sols cultivés susceptibles de recevoir des épandages de boues) est un peu supérieur à 11 300. Malheureusement, ces sites étaient fort mal distribués géographiquement (Baize *et al.*, 2006). Une nouvelle collecte a été réalisée en 2009 (incluant la première) qui a permis de collecter les analyses d'ETM pour plus de 72 500 sites, assez bien répartis à travers la France (Duigou et Baize, 2010).

Toutefois, ne sont déterminées que les teneurs en 8 éléments (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn) et ceci pour les seuls horizons de surface de sols cultivés susceptibles de recevoir des effluents. De plus, la grande majorité de ces analyses a été réalisée après mise en solution des éléments par l'eau régale (norme NF ISO 11466), ce qui ne permet pas une minéralisation complète de ceux-ci. Les résultats exprimés correspondent donc à des concentrations pseudo-totales pour lesquelles il n'existe pas toujours de relation simple avec les concentrations totales mesurées après une mise en solution au moyen d'un mélange d'acides fluorhydrique et perchlorique, tel que décrit dans la norme NF ISO 14869-1.

Le présent article expose les travaux réalisés et les premiers résultats du programme « Spatialisation des éléments traces dans les sols en région Nord-Pas-de-Calais - Identification de leurs origines naturelles et anthropiques » (dit aussi NICOSIA), co-financé par l'ADEME.

La construction d'une base de données pédogéochimiques géoréférencées de plus de 3900 sites a constitué une première phase. La seconde phase a consisté en des traitements statistiques et à une analyse géostatistique des données en vue de

disposer d'une image assez précise de la distribution des ETM à l'échelle régionale et d'émettre des hypothèses sur l'origine des variabilités observées.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le territoire étudié

Le Nord-Pas-de-Calais est une région très densément peuplée qui a été profondément affectée par l'exploitation minière du charbon et par des industries lourdes et où est présente une agriculture intensive (figure 1). Cette région regroupe près de quatre millions d'habitants pour 12 400 km². Localement, la densité de population excède 500 habitants par km².

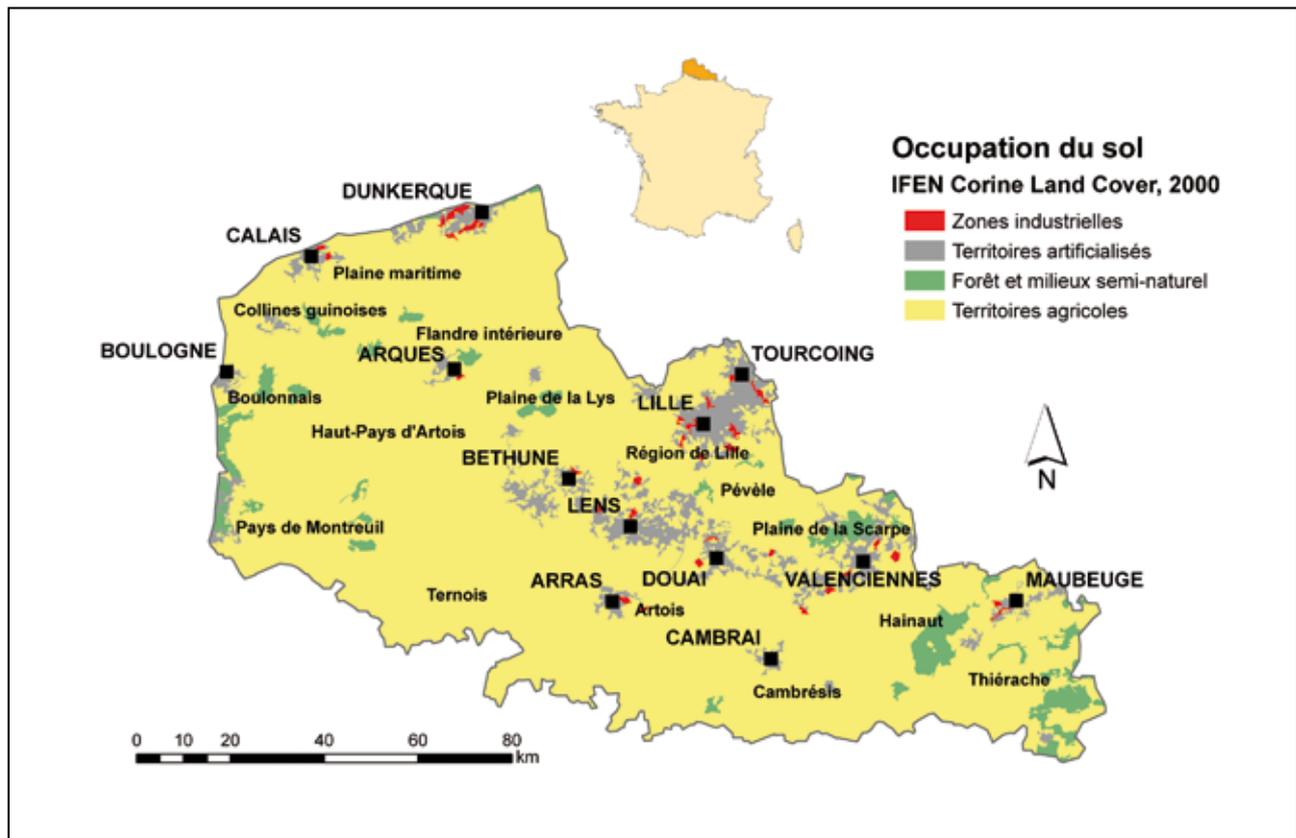
Le substrat géologique est constitué de sédiments marins déposés depuis le Primaire jusqu'au Crétacé. Il s'agit de roches massives et dures (telles que des calcaires durs, des grès ou des schistes), ou bien des roches très cryoturbées telles les craies et, parfois, des argiles ou des sables. Ces substrats affleurent rarement car ils sont généralement recouverts par des formations superficielles quaternaires : le plus souvent des lœss ou des lœss

sableux, mais également des colluvions ou des alluvions récentes fluviatiles et marines. Pour une présentation plus détaillée des matériaux parentaux et des sols, le lecteur est invité à se reporter à Sterckeman *et al.*, 2007 ou à Fourrier et Douay, 2008.

Dans cette région, les processus pédogénétiques ont peu modifié la composition héritée des matériaux parentaux. C'est en effet cette composition initiale qui gouverne la part naturelle des teneurs totales en éléments traces mesurées dans les horizons des sols. Dans ce contexte régional, les « formations résiduelles à silex » sont la seule exception. Elles résultent de processus d'altération intense qui, dès la fin de l'ère tertiaire, ont engendré une importante dissolution des roches crayeuses à silex du Crétacé supérieur, laissant ainsi sur place des résidus dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres. De par leur origine, ces formations ont pu accumuler certains éléments traces.

Par ailleurs, il n'existe pas d'anomalies géochimiques naturelles. En revanche, un certain nombre de sources de pollutions sont bien identifiées, ponctuelles ou diffuses (agglomérations). Les trois « sites critiques » (*hot spots*) les mieux étudiés sont les alentours d'une célèbre fonderie à Noyelles-Godault (fermée en 2003), d'une usine métallurgique à Auby (Sterckeman *et al.*, 1996,

Figure 1 - Carte d'occupation des sols de la région Nord-Pas de Calais. Découpage territorial en « petites régions naturelles » (PRN).
Figure 1 - Map of land use of the Nord-Pas de Calais region. The territories are « little natural regions ».



2002a; Douay *et al.*, 2001), et de la zinguerie de Mortagne-du-Nord dont l'activité a cessé en 1962 (van Oort *et al.*, 2002).

Construction de la base de données

La base de données utilisée rassemble des populations d'analyses d'horizons de surface provenant de cinq sources. A chacune d'elles, correspondent une stratégie d'échantillonnage différente et un objectif distinct (tableau 1).

• **Référentiel PédoGéochimique (RPG) du Nord-Pas-de-Calais** (Sterckeman *et al.*, 2002b; 2007): L'échantillonnage des sols a été organisé et stratifié par type de matériau parental et par région naturelle. Ont été sélectionnés des sols éloignés de toute source connue de pollution et n'ayant pas reçu d'effluents industriels ou urbains. Les prélèvements ont concerné 276 sites et ont été réalisés dans des fosses en respectant les limites des horizons. Ont été déterminées les caractéristiques physico-chimiques et les concentrations totales en 18 éléments (As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, V et Zn) de deux ou trois horizons de chaque fosse étudiée.

Une étude préparatoire à la réalisation du RPG, consacrée à la caractérisation géochimique des lœss et à l'analyse de trois solums issus de lœss, a été intégrée (Cordier, 1999).

• **Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) « régional complété »** (Douay *et al.*, 2005). Conformément au programme national, les prélèvements ont été faits en des sites localisés aux nœuds d'une grille de 16 x 16 km (Arrouays *et al.*, 2003). Le programme régional en diffère par l'ajout de caractérisations et de déterminations. Les objectifs que se sont fixés les

partenaires étaient en effet de renforcer la connaissance des sols agricoles sur le plan pédologique (typologie et distribution spatiale), sur les teneurs en éléments potentiellement toxiques (éléments traces métalliques, hydrocarbures aromatiques polycycliques) et d'acquérir des informations sur leur biodiversité (floristique et malacologique). Comme pour le RPG, les prélèvements ont été réalisés dans des fosses en respectant les limites des horizons. Ils ont concerné 48 sites répartis régulièrement sur le territoire. Ont été mesurées les caractéristiques physico-chimiques et les concentrations totales en 13 éléments (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, Zn) des principaux horizons superposés.

• **Programme de Recherches Concertées (PRC) « Sites et Sols Pollués »** (Sterckeman *et al.*, 1996). Les sols de 11 sites affectés massivement par les émissions atmosphériques passées des fonderies de Noyelles-Godault et d'Auby ont été échantillonnés en fosses. Sur les horizons de surface ont été mesurées les concentrations totales en 7 éléments (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb et Zn). Dès le lancement du programme NICOSIA, il existait déjà dans ce secteur environ 500 sites analysés permettant de cartographier la contamination des sols agricoles (Douay *et al.*, 2001 - plus de 700 sites à ce jour). Ces 500 sites n'ont pas été retenus afin de ne pas trop privilégier les fortes pollutions locales et de manière à mieux dégager les tendances générales et à faire apparaître d'éventuelles contaminations diffuses.

• Collectes d'analyses réalisées dans le cadre de **plans d'épandage de boues d'épuration urbaines**. Ces données proviennent de la collecte nationale ANADEME de 1998

Tableau 1 - Principales caractéristiques des cinq programmes.

Table 1 - Main features of the five programmes.

Programme	Stratégie d'échantillonnage des sols	Cible du programme	Nombre d'ETM analysés	Mise en solution	Nombre de sites
Référentiel Pédo-Géochimique du Nord-Pas de Calais (RPG) [1] et Cordier [2]	Fosses creusées loin de toute source de pollution connue	Contamination diffuse en zones rurales	18	HF*	276
Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) régional adapté [3]	Échantillonnage selon une grille de 16 x 16 km	Monitoring systématique	13	HF*	48
Programme de Recherches Concertées (PRC) [4]	Proximité de fonderies de plomb et de zinc	Sites critiques de pollution industrielle	7	HF*	11
Mortagne-du-Nord [5]	Idem	Idem	4	HF*	156
Collectes régionales d'analyses 1998 [6] et 2007	Horizons de surface de parcelles agricoles susceptibles de recevoir des boues	Sols agricoles	7 ou 8	HF* ou le plus souvent ER**	3438

[1] Sterckeman *et al.*, 2002b

[2] Cordier, 1999

[3] Douay *et al.*, 2005

[4] Sterckeman *et al.*, 1996

[5] van Oort *et al.*, 2002

[6] Baize *et al.*, 2006

* HF: minéralisation au moyen d'un mélange d'acides fluorhydrique et perchlorique (concentrations totales, norme NF ISO 11466)

** ER: minéralisation à l'eau régale (concentrations pseudo-totales, norme NF ISO 14869-1)

(Baize *et al.*, 2006) et d'une nouvelle collecte réalisée localement en 2007. Elles portent sur les horizons de surface de sols cultivés susceptibles de recevoir des boues, situés principalement en zones rurales. Ont été mesurées uniquement les teneurs pour les 8 éléments retenus par la réglementation : Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn. Au total, sont renseignés 3 438 sites, 2 100 proviennent de la collecte 2007 et concernent le Pas-de-Calais.

• **Programme « Devenir et impact des polluants présents dans les friches industrielles »** autour de l'ancienne zinguerie de Mortagne-du-Nord (van Oort *et al.*, 2002). Sur les 3 500 ha de l'étude, les sols agricoles ont fait l'objet d'un échantillonnage systématique selon un réseau régulier (1 prélèvement par carré de 25 ha). Dans un second temps, la démarche a été complétée par une cinquantaine de prélèvements complémentaires dans le but de préciser certaines distributions, notamment dans les zones boisées. Au total, les horizons de surface (0 - 30 cm) de 156 sites ont été échantillonnés et leurs concentrations totales en Cd, Cu, Pb et Zn ont été mesurées.

Au total, 3929 analyses d'horizons de surface ont été rassemblées, correspondant presque exclusivement à des sols agricoles, ayant été réalisées entre 1990 et 2007.

Outre les valeurs numériques des concentrations en ETM, les principales caractéristiques agro-pédologiques et les coordonnées géographiques, la base de données contient également, autant que possible, des informations sur le type d'occupation du sol et sur la nature (avérée ou très probable) du matériau parental.

Au final, il apparaît que les différentes stratégies d'échantillonnage se complètent assez bien et permettent une bonne couverture du territoire régional et des diverses causes de contaminations anthropiques : les retombées diffuses aussi bien que celles liées à des sources ponctuelles.

La fusion de multiples bases de données aux stratégies d'échantillonnage et objectifs différents aurait pu générer un problème quant à la profondeur des prélèvements des horizons dits « de surface ». Heureusement, la quasi-totalité des prélèvements concerne des sols labourés pour lesquels il n'existe pas de gradient important de teneurs en ETM dans les 25 à 30 premiers centimètres, à la différence de ce qui se passe dans les sols forestiers.

Méthodes analytiques

Ces méthodes sont décrites en détail au *tableau 2*. En ce qui concerne les analyses d'ETM que nous avons pu rassembler, deux modes de mise en solution avant dosages ont été employés. L'un, utilisant un mélange d'acides fluorhydrique et perchlorique, fournit des concentrations totales (codées HF). L'autre, qui utilise l'eau régale, fournit des concentrations dites pseudo-totales (codées ER).

Méthode géostatistique de spatialisation

La méthode géostatistique utilisée pour la spatialisation des données est le krigeage ordinaire. La distribution des données est dissymétrique avec un étalement vers les fortes valeurs pour

Tableau 2 - Méthodes d'analyses des éléments en traces utilisées.

Table 2 - *Methods of trace element determination.*

Détermination	Principe	Norme
Préparation	Tamisage à 2 mm ; broyage à 0,250 mm pour la mise en solution	NF ISO 11464
Teneurs totales en Al, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Ti, V, Zn (INRA Arras et SADEF) notée HF	Calcination à 450 °C suivie par une dissolution par HF + HClO ₄ , digestion à 180 °C. Dosages par ICP -OES ^a ou ICP -MS ^b .	NF ISO 14869-1
Teneurs pseudo-totales en Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn (autres laboratoires) notée ER	Mise en solution par l'eau régale	NF ISO 11466
Teneur totale en Hg (INRA Arras)	Dissolution par un mélange d'acides sulfurique et nitrique à 60 °C. Dosages par CVAFS ^c	Méthode INRA
Teneur totale en Hg (autres laboratoires)	Méthodes diverses, non précisées	
Teneurs totales en As et Se (INRA Arras)	Dissolution dans un mélange d'acide sulfurique et d'acide nitrique en présence de pentoxyde de vanadium (V ₂ O ₅). Dosages par CVAAS ^d	Méthode INRA
Teneur totale en Se (autres laboratoires)	Méthodes inconnues	Non normalisées

a ICP -OES, spectrométrie d'émission atomique à plasma induit d'argon.

b ICP -MS, spectrométrie de masse à plasma induit d'argon.

c CVAFS, spectrométrie de fluorescence atomique en vapeurs froides.

d CVAAS, spectrométrie d'absorption atomique en vapeurs froides.

chaque élément. Il est donc difficile d'utiliser toutes les données pour établir le variogramme nécessaire au krigeage mais il est souhaitable de n'éliminer qu'un minimum de valeurs pour l'établir. C'est pourquoi il n'y a pas eu d'exclusion systématique de l'ensemble des *outliers* supérieurs (tableau 3).

Le principe retenu consiste à calculer la nuée variographique. Il s'agit d'une mesure de dissemblance entre l'ensemble des couples de points formé à partir des N points de notre jeu de donnée en fonction de la distance. A partir de ce nuage de points, les couples présentant une forte dissemblance à courte distance ont été identifiés. Dans chaque couple ainsi identifié, l'individu présentant une forte teneur a été masqué et le variogramme expérimental a été à nouveau estimé. Afin de masquer un minimum de points, l'opération a été réalisée de façon itérative. Autrement dit, à la suite de chaque 'masquage' le variogramme expérimental a été modélisé et une validation croisée réalisée. Le procédé est arrêté dès que les résultats de la va-

lidanation croisée donnent une erreur moyenne et un ratio entre l'erreur effective et l'erreur théorique statistiquement non différentes respectivement de 0 et 1.

Les points masqués ont été réactivés lors de l'interpolation par krigeage. Cela dit le poids d'un individu masqué lors de l'analyse variographique est faible dans l'interpolation. Ceci n'est pas très préjudiciable dans le contexte de ce travail où nous cherchons à cartographier des tendances régionales.

Rappelons que le krigeage fournit ce que l'on peut appeler la valeur la plus probable de concentration en tout point de l'espace, associée à la variance de l'erreur commise. Cela a notamment comme conséquence « que la carte gomme les pics et les creux et est comme attirée vers la moyenne de la variable sur la zone d'intérêt. C'est la propriété de lissage du krigeage: la variabilité réelle dans l'espace n'est pas reproduite quand on interpole les données » (Deraisme et Bobbia, 2003).

Tableau 3 - Vibrisses supérieures, nombre de valeurs anomaliques supérieures et nombre de valeurs exclues pour l'établissement des variogrammes.

Table 3 - *Upper whiskers, number of outliers and number of values excluded for establishing variograms.*

Élément	vibrisse supérieure en mg/kg	nombre de valeurs anomaliques supérieures	nombre de valeurs exclues	seuil d'exclusion
As total	17,85	19	7	
Bi total	0,33	12	0	
Cd total et pseudo total	0,89	219	48	> 2,0
Co total	18,95	12	1	
Cr total	86,01	21	1	
Cr pseudo total	67,9	20	1	
Cu total et pseudo total	26,31	168	6	> 80
Hg total	0,115	250	8	
In total	0,08	4	4	
Mn total	1257,8	9	0	
Mo total	1,01	28	7	
Ni total	41,89	17	0	
Ni pseudo total	32,35	86	0	
Pb total et pseudo total	51,45	313	20	> 260
Sb total	1,29	24	2	
Se total	0,42	94	0	
Sn total	4,03	10	0	
Tl total	0,74	9	3	
V total	134,3	4	2	
Zn total et pseudo total	110,55	225	32	> 470

Rappelons aussi la définition des *outliers* selon Tukey (1977). En ajoutant 1,5 fois la distance interquartile au 3^e quartile, on définit la vibrisse supérieure (*upper whisker*). Toute valeur supérieure à la vibrisse supérieure est dite *upper outlier* ou valeur anomale supérieure. Une telle valeur statistiquement anomale se conçoit par rapport à la structure d'une certaine population et uniquement par rapport à celle-là.

RÉSULTATS

Les valeurs mesurées - Statistiques descriptives - Comparaisons entre les deux méthodes de mise en solution

Les analyses après mise en solution au moyen d'un mélange d'acides fluorhydrique et perchlorique (HF), réalisées le plus souvent par le Laboratoire d'Analyses des Sols de l'INRA d'Arras, sont un peu mieux réparties spatialement que celles réalisées après mise en solution à l'eau régale (figure 2). Les statistiques descriptives pour les 20 éléments analysés sont présentées au *tableau 4*.

Comme on pouvait s'y attendre, les médianes et quartiles des valeurs obtenues par HF sont nettement supérieurs à ceux obtenus à l'eau régale (ER) pour Cr, Ni, Pb et Zn. C'est en partie le résultat de la différence de force d'extraction des acides employés, mais cela résulte également du fait qu'un certain nombre

d'analyses HF proviennent de points proches de sources polluantes (programmes PRC et Mortagne-du-Nord). En revanche, il y a peu de différence entre les deux populations en ce qui concerne Cd et Cu.

Par ailleurs, des essais inter-laboratoires du circuit européen BIPEA menés sur une trentaine d'échantillons d'horizons de surface labourés ont montré que les résultats des dosages s'avéraient identiques pour Cd et Cu quelle que soit la méthode de mise en solution et peu différents en ce qui concerne Pb et Zn. Ceci n'était pas vrai pour Cr et Ni. En conséquence, dans la suite de cet article, une seule population générale sera souvent prise en considération pour Cd, Cu, Pb et Zn tandis que deux populations distinctes seront maintenues pour Cr et Ni, en fonction de la méthode d'extraction.

Enfin, Cd(HF), Pb(HF) et Zn(HF) montrent des valeurs de P90 (9^e décile) qui excèdent la vibrisse supérieure. En d'autres termes, plus de 10 % des valeurs mesurées peuvent être considérées comme valeurs anomales. Ceci reflète une contamination des sols de la région par ces trois éléments en lien avec les activités humaines essentiellement urbaines et industrielles.

Confrontation aux valeurs nationales

Le *tableau 5* présente une comparaison des valeurs régionales avec des statistiques obtenues à l'échelle nationale sur toutes les autres régions (population dite « reste de la France » - Duigou et Baize., 2010). Les deux populations ainsi mises en

Figure 2 - Localisation des sites analysés et méthodes de mise en solution.

Figure 2 - Location of the analyzed sites according to the digestion method.

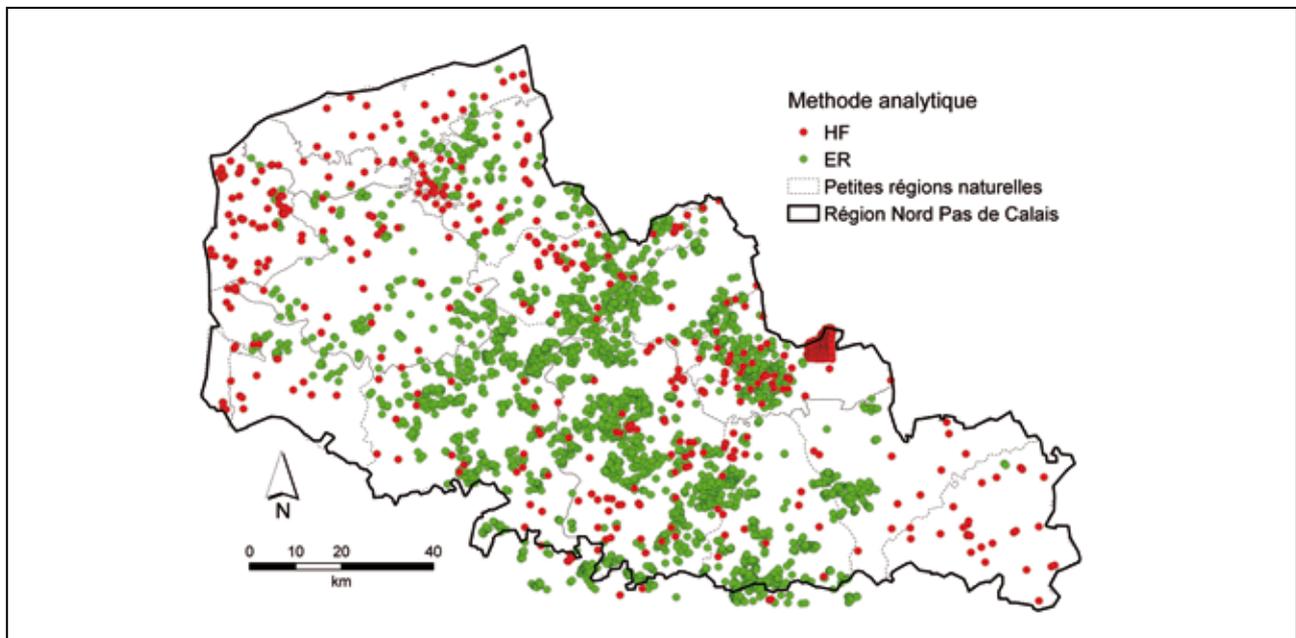
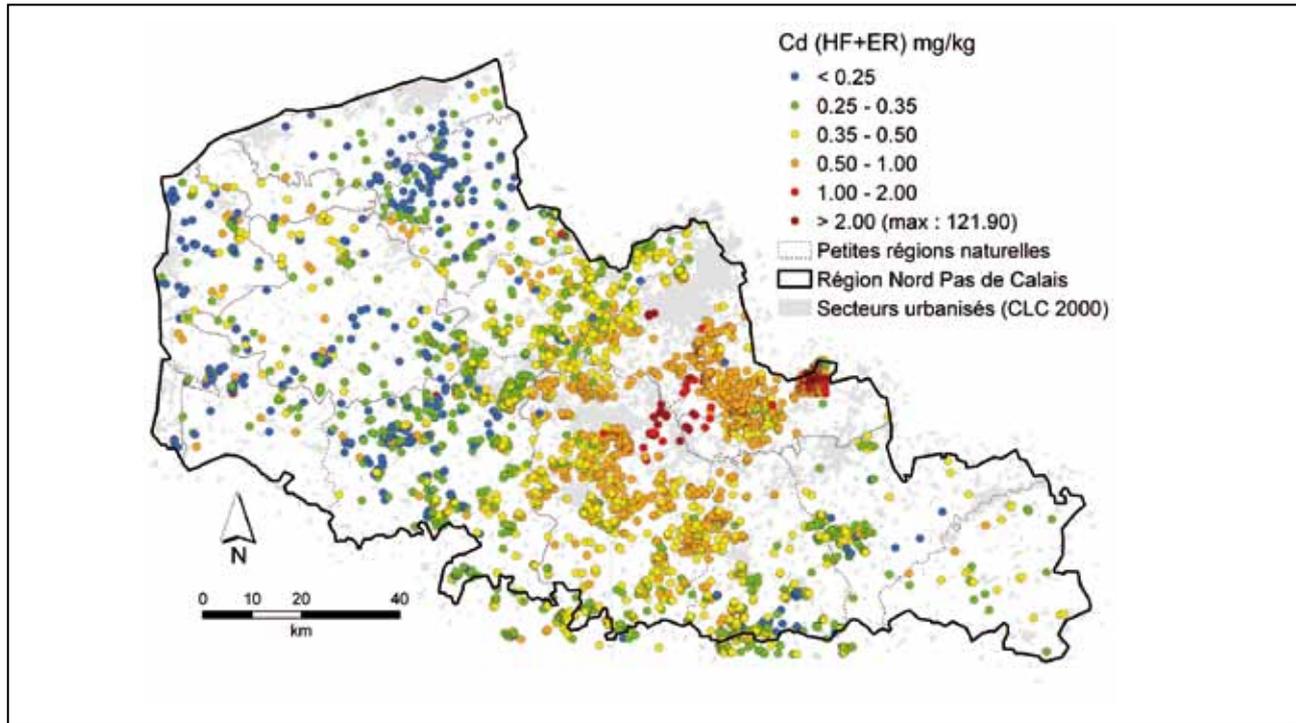
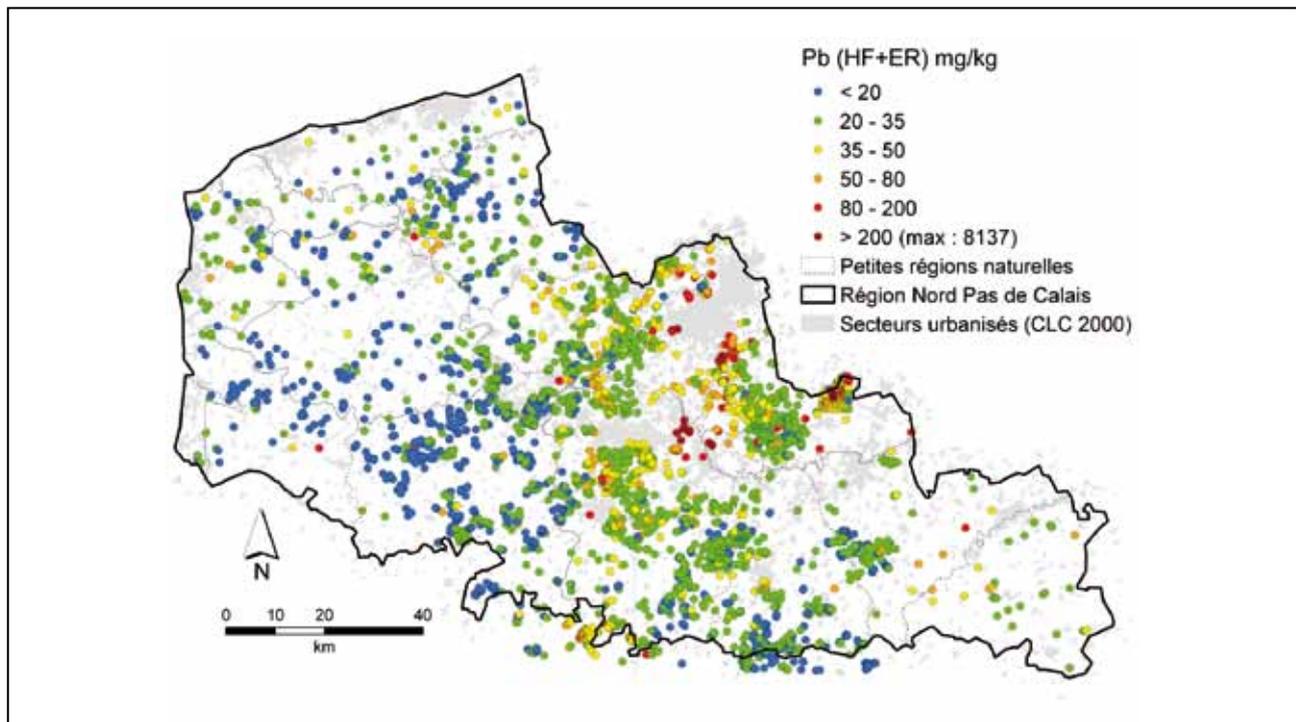


Figure 3 - Cartogramme des teneurs en cadmium.*Figure 3* - Cartogram of cadmium contents.**Figure 4** - Cartogramme des teneurs en plomb.*Figure 4* - Cartogram of lead contents.

comparaison correspondent presque exclusivement à des horizons de surface de sols agricoles.

Si on s'intéresse particulièrement aux médianes, on note pour la région Nord-Pas-de-Calais des valeurs plus élevées pour Pb(HF), Cd(HF), Cr(HF), Zn(HF), Cd(ER), Pb(ER) et Zn(ER) qui reflètent une plus forte influence des activités humaines agricoles ou industrielles par rapport au reste de la France. Ces tendances sont souvent confirmées par les percentiles P10 ou P90.

On notera qu'aucune valeur médiane du Nord-Pas-de-Calais n'est nettement inférieure à celle du reste de la France. C'est seulement le cas des valeurs P90 (9^e décile) de Cr(ER), Cu(ER), Ni(HF), Ni(ER) et Zn(ER).

Les cartogrammes mono-élémentaires

Cinq cartogrammes seront présentés: Cd(HF+ER), Pb(HF+ER), Zn(HF+ER), Cu(HF+ER) et Ni ER. Pour tous ces cartogrammes (figures 3 à 7), les limites de classes et les couleurs sont celles utilisées couramment et déterminées à l'échelon national (tableau 7 - Baize, 1997). L'intérêt de cette présentation est de situer les valeurs régionales dans un cadre plus large.

Cd(HF + ER) (figure 3)

Ce cartogramme met tout particulièrement en valeur l'impact des trois sites critiques précédemment évoqués (à Noyelles-Godault, Aubry et Mortagne-du-Nord) et de la conurbation de Lille-Roubaix-Tourcoing sur toute la partie centrale de la région. En revanche, les zones rurales, surtout celles situées à l'ouest et au nord-ouest de la région, semblent peu affectées par les contaminations diffuses en Cd, quelle qu'en soit l'origine.

Pb(HF + ER) (figure 4)

En ce qui concerne le plomb, l'impact des trois sites critiques et des grandes zones urbaines est bien visible mais sur des superficies beaucoup plus restreintes que pour Cd. En zones rurales, la très grande majorité des mesures reste inférieure à 35 mg/kg.

Zn(HF + ER) (figure 5)

En ce qui concerne le zinc, la partie centrale de la région montre des valeurs comprises entre 60 et 100 mg/kg sous l'influence lointaine des secteurs fortement urbanisés et des trois sites critiques. Ces derniers ont un impact important mais assez localisé.

Cu(HF + ER) (figure 6)

La très grande majorité des mesures demeure inférieure à 20 mg/kg, y compris dans les zones centrales péri-industrielles de la région. Les secteurs situés à l'ouest de Lille, à proximité de Béthune et de Lens et dans la Plaine de la Lys montrent des valeurs un peu plus élevées (entre 20 et 30 mg/kg) qui pourraient être imputées, notamment, à l'utilisation de produits phytosan-

naires sur les cultures de pommes de terre largement présentes dans le secteur.

Ni(ER) (figure 7)

Ce cartogramme montre que les sols du Nord-Pas-de-Calais sont peu chargés en nickel. En effet, la médiane régionale vaut 18,6 mg/kg et la vibrisse supérieure 32,4 mg/kg (tableau 4). Rares sont les valeurs comprises entre 30 et 50 mg/kg. Il est vrai qu'il s'agit là de concentrations pseudo-totales et il est bien connu que les mesures de nickel après mise en solution par l'eau régale donnent des résultats très inférieurs (d'un tiers environ) à celles réalisées avec l'acide fluorhydrique. A la différence de Cd, Pb, Zn et Cu, le nickel est, comme le chrome, typiquement un métal d'origine naturelle. Le cartogramme de Cr(ER) (non présenté) est sensiblement identique à celui de Ni(ER).

Localisation des valeurs anormales

Le tableau 3 fournit les valeurs des vibrisses supérieures et le nombre de valeurs anormales. La répartition dans l'espace de ces dernières est particulièrement significative pour deux séries de populations:

* Cd(ER); Cu(ER); Pb(ER); Zn(ER) et Hg dont les valeurs anormales sont nombreuses dans la partie centrale de la région et dont l'origine pourrait être liée à des retombées diffuses péri-urbaines mais aussi, dans une moindre mesure, à des épandages de boues d'épuration;

* Cd(HF); Cu(HF); Pb(HF) et Zn(HF) très nettement associés aux trois sites critiques, comme on pouvait s'y attendre.

Trois cartes présentent la répartition géographique des valeurs anormales supérieures. Les trois principaux sites critiques y sont symbolisés par des étoiles. Celle du plomb et celle du mercure (figures 8 et 9) font apparaître que la plupart des valeurs anormales sont localisées dans la zone centrale tandis que 17 valeurs anormales en arsenic sur 19 se situent dans le Boulonnais (figure 10). Ces valeurs semblent bien d'origine naturelle car il a été montré (Sterckeman *et al.*, 2006) que cinq des matériaux parentaux présents en Boulonnais sur huit montraient de très nets enrichissements lithologiques en arsenic.

Le tableau 6 présente les 26 populations d'analyses (éléments en traces et majeurs) et l'interprétation que nous pensons pouvoir en faire en termes de localisation, distribution (localisée vs généralisée) et d'origine (géogène vs anthropogène).

Cartographies mono-élémentaires

Douze cartographies, obtenues par krigeage ordinaire, sont présentées à la figure 11, respectivement: Cd(HF+ER), Pb(HF+ER), Zn(HF+ER), Cu(HF+ER), Cr(ER), Cr(HF), Ni(ER), Ni(HF), Hg, Se, As et Co. Rappelons ici que tout krigeage entraîne un « lissage » des valeurs extrêmes, d'où des différences importantes entre cartes et cartogrammes.

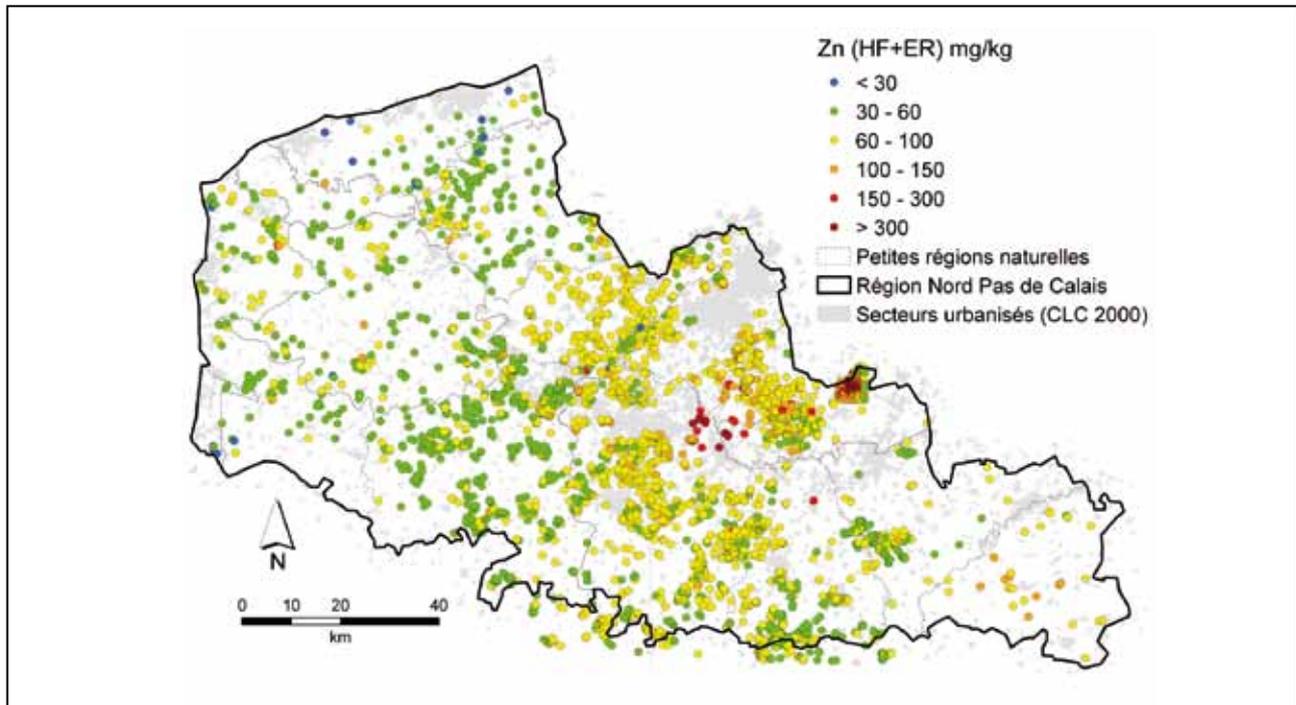
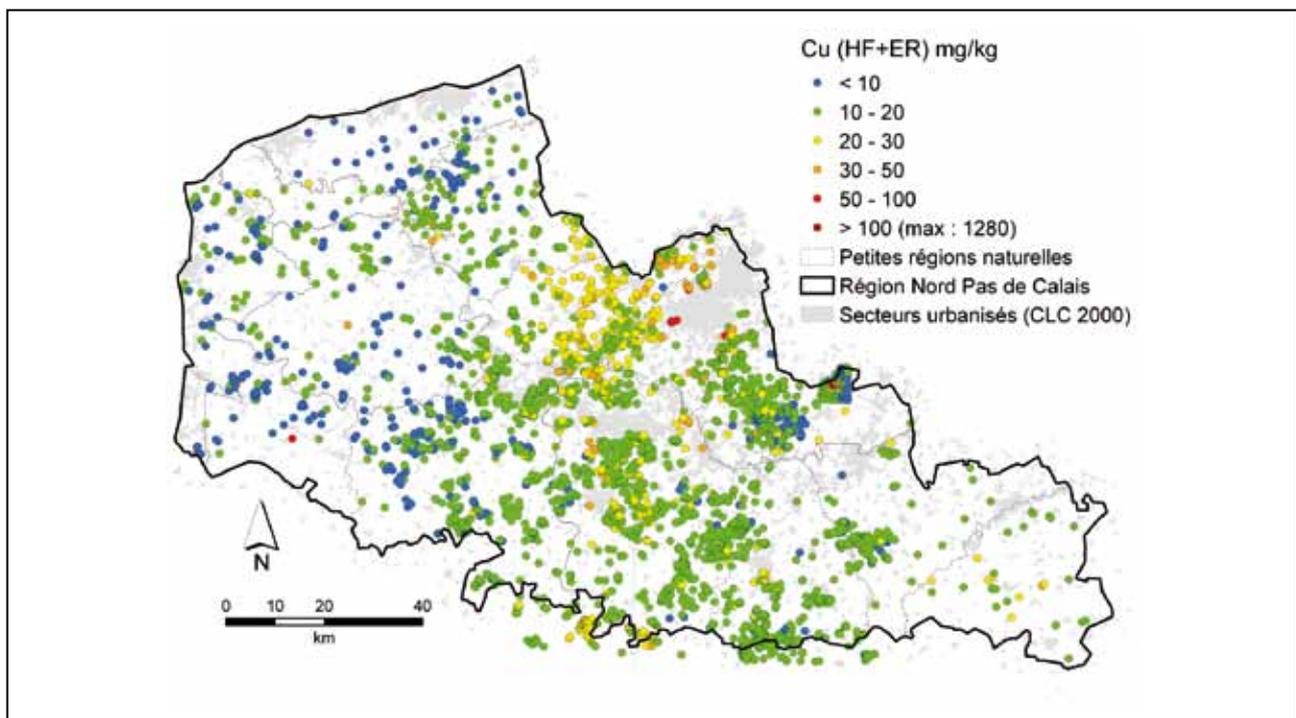
Figure 5 - Cartogramme des teneurs en zinc.*Figure 5* - Cartogram of zinc contents.**Figure 6** - Cartogramme des teneurs en cuivre.*Figure 6* - Cartogram of copper contents.

Figure 7 - Cartogramme des teneurs en nickel (eau régale seulement).

Figure 7 - Cartogram of nickel contents (only digestion by aqua regia).

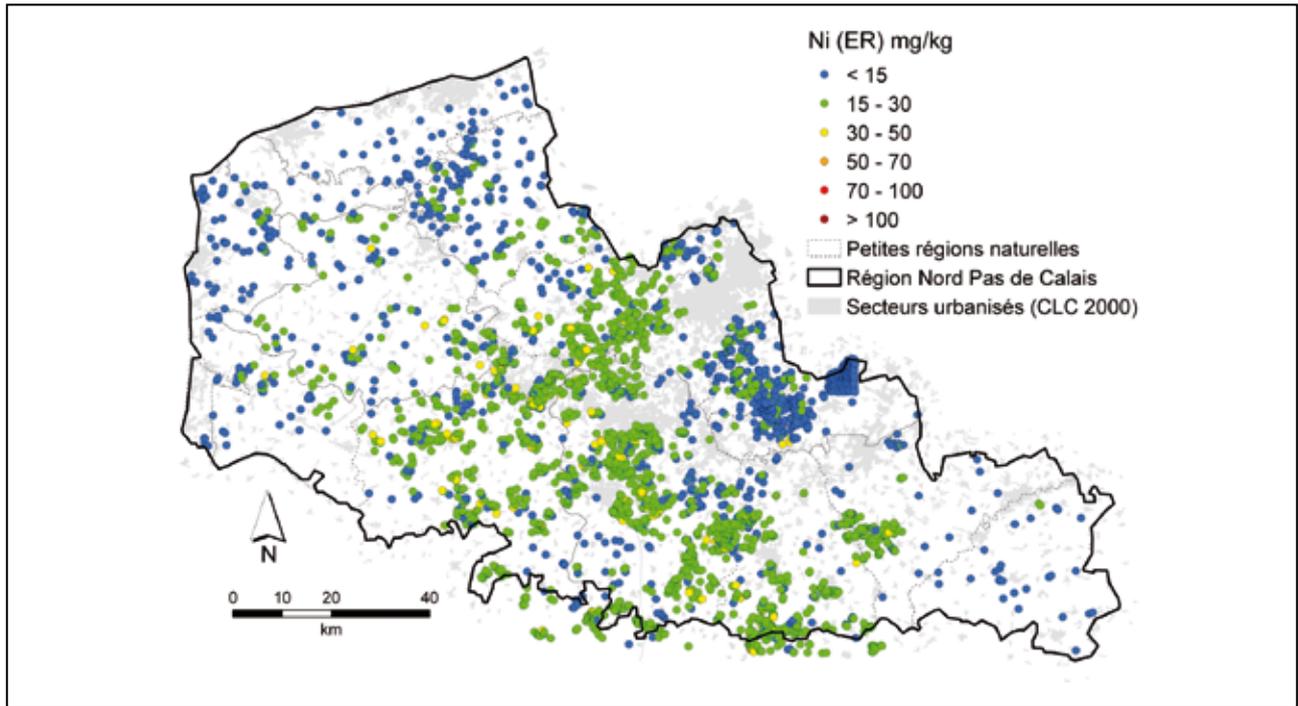


Figure 8 - Localisation des valeurs anomiques en plomb.

Figure 8 - Location of outlier values - Lead.

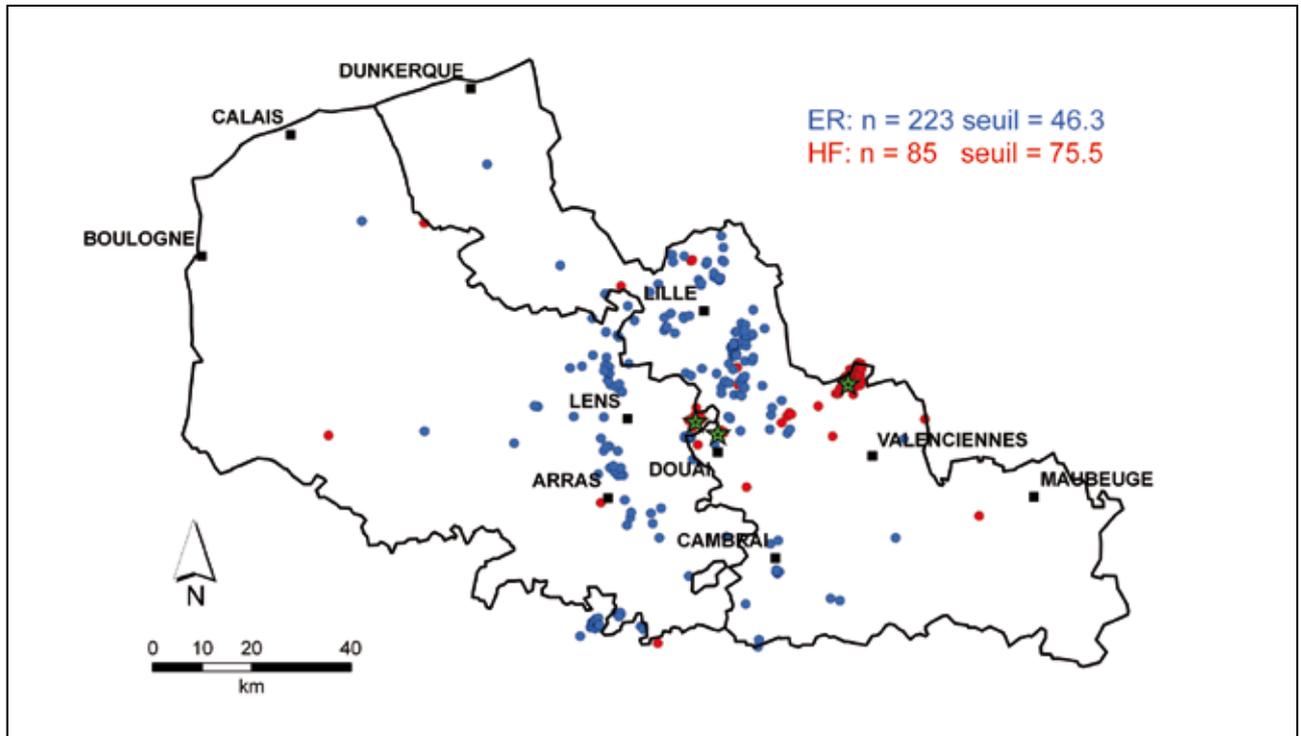


Figure 9 - Localisation des valeurs anomaliques en mercure.

Figure 9 - Location of outlier values - Mercury.

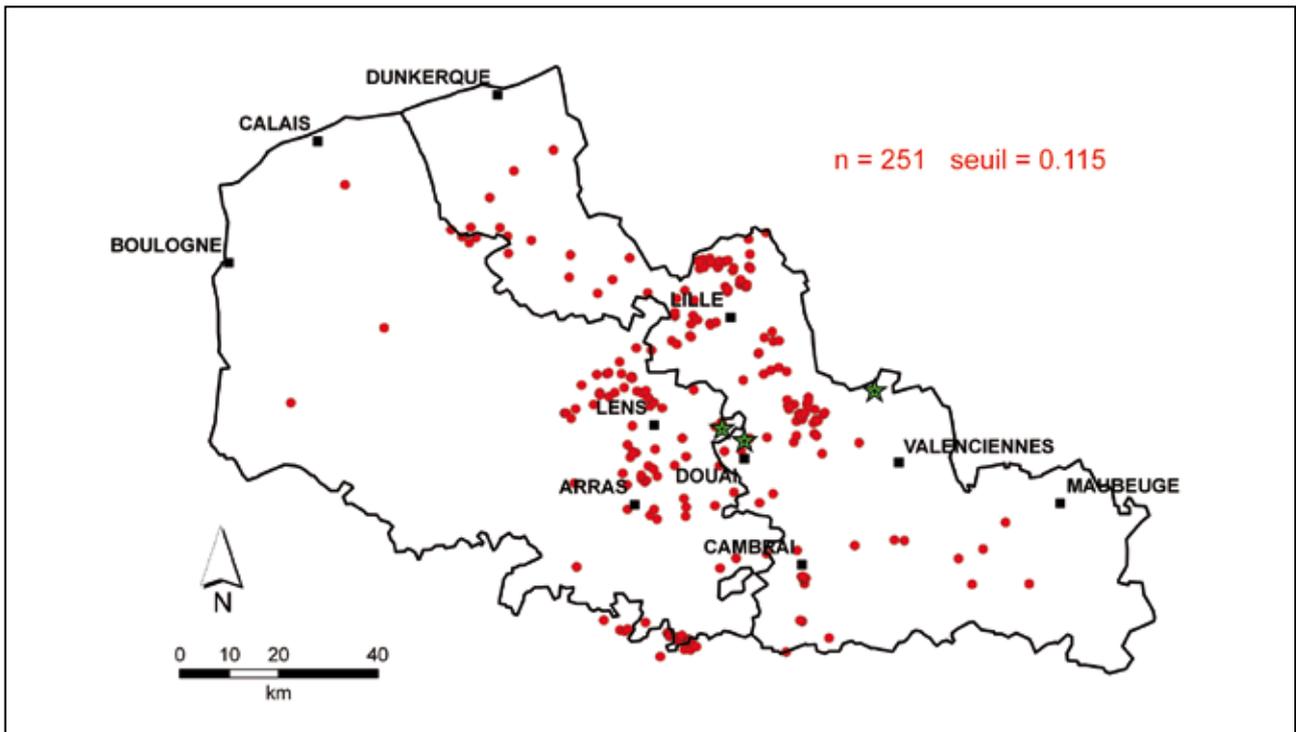


Figure 10 - Localisation des valeurs anomaliques en arsenic.

Figure 10 - Location of outlier values - Arsenic.

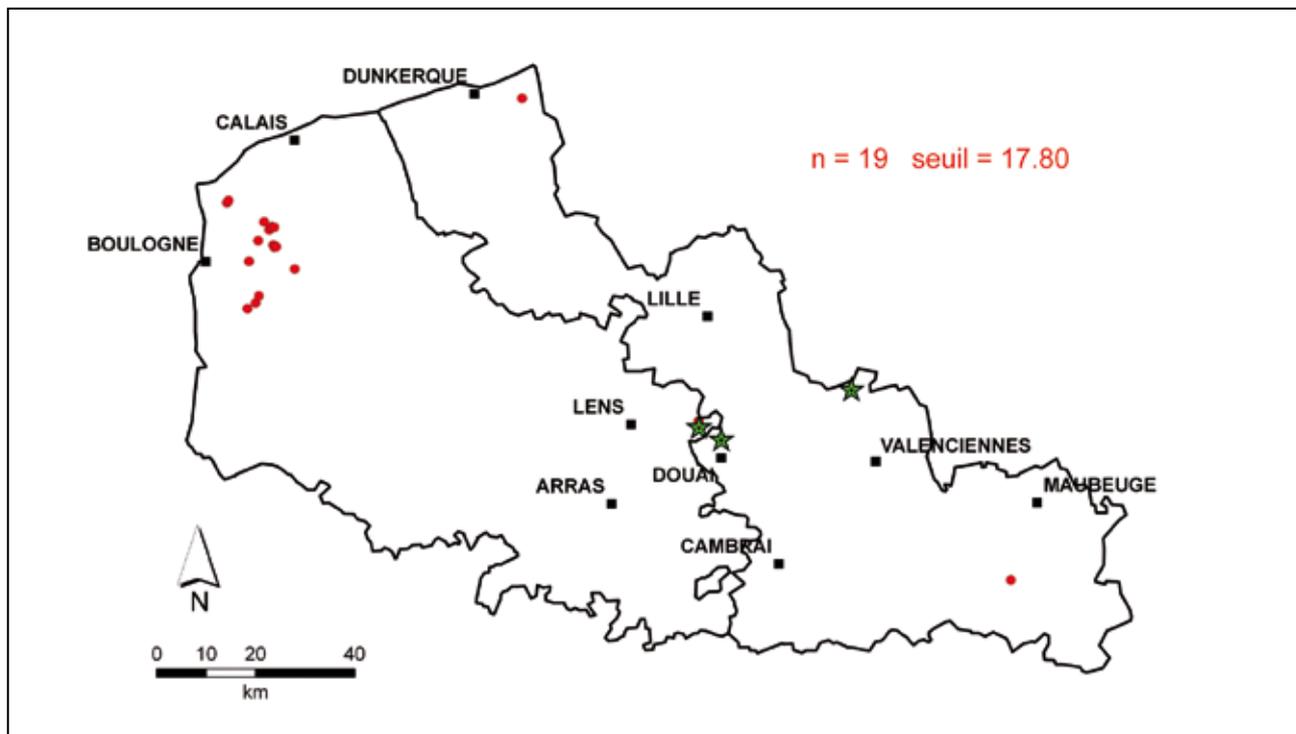


Tableau 4 - Statistiques descriptives relatives aux 20 éléments analysés.

a : Comparaison entre les deux méthodes de mise en solution pour Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn - b : Résultats pour les 14 autres éléments.

Table 4 - Summary statistics relative to the 20 analyzed elements.

a : Comparison between the two methods of digestion for Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn - b : Results for the other 14 elements.

	Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	HF	ER	HF	ER	HF	ER	HF	ER	HF	ER	HF	ER
Nb	740	3142	586	3187	732	3187	574	3187	741	3187	742	3186
min	0,027	0,020	13,7	8,8	3,9	3,3	4,5	2,5	13,0	7,6	24,2	10,2
P10	0,250	0,270	29,7	20,6	8,8	10,0	11,3	12,8	21,2	15,4	50,0	49,0
P25-Q1	0,324	0,320	40,8	27,4	11,3	12,1	16,5	15,6	25,0	18,5	60,5	55,0
médiane	0,434	0,400	49,6	36,1	14,2	14,6	21,2	18,6	31,6	23,0	72,0	63,9
P75-Q3	0,712	0,530	58,9	43,6	17,6	17,8	26,7	22,3	45,2	29,6	96,3	75,3
P90	1,370	0,680	69,7	51,0	23,1	21,9	32,1	26,7	81,7	40,9	180,9	88,4
vibrise sup.	1,294	0,845	86,1	67,9	27,0	26,4	41,9	32,4	75,5	46,3	150,0	105,8
maxi	121,9	8,62	199,8	84,7	1280	98,2	84,4	56,3	8136	908,7	22440	313,3

	Hg	Se	As
	div.	div.	INRA
Nb	3432	1758	323
min	0,01	0,04	1,40
P10	0,03	0,13	4,30
P25-Q1	0,04	0,17	6,20
médiane	0,05	0,21	8,30
P75-Q3	0,07	0,27	10,85
P90	0,10	0,36	15,14
vibrise sup.	0,12	0,42	17,83
maxi	13,59	3,9	110,20

vibrise sup < P90! donc plus de 10 % de valeurs anormales!

	Bi	Co	In	Mo	Sb	Sn	Tl	V	Mn	Al	Fe
	HF	HF	HF	HF	HF	HF	HF	HF	HF	HF	HF
Nb	275	324	271	318	271	271	315	271	322	332	332
min	0,07	1,8	0,01	0,11	0,05	0,92	0,14	17,3	51	10,7	4,0
P10	0,10	4,7	0,02	0,29	0,48	1,24	0,26	32,8	218	20,7	10,9
P25-Q1	0,13	6,6	0,03	0,43	0,59	1,69	0,34	44,1	320	28,9	15,9
médiane	0,17	9,0	0,04	0,54	0,71	2,10	0,43	58,5	521	39,5	20,7
P75-Q3	0,21	11,5	0,05	0,66	0,87	2,62	0,50	80,2	695	45,4	26,3
P90	0,26	14,6	0,05	0,93	1,14	3,22	0,57	102,3	926	52,6	32,6
vibrise sup.	0,33	19,0	0,08	1,01	1,29	4,02	0,74	134,3	1258	70,0	41,9
maxi	0,71	47,9	0,11	3,31	3,48	8,57	1,12	369,8	2575	78,1	101,5

Cadmium (HF + ER) (figure 11a)

La carte obtenue montre dans la partie centrale de la région des teneurs en Cd supérieures à 0,5 mg/kg, voire à 1 mg/kg. Elles correspondent aux secteurs affectés par les activités métallurgiques (Noyelles-Godault, Aubry, Mortagne-du-Nord). Il est perçu vers l'ouest une influence du bassin minier et vers le nord, de la conurbation lilloise.

Plomb (HF + ER) (figure 11b)

Cette carte est un bon exemple de lissage des valeurs extrêmes lié au krigeage et à l'exclusion de 20 valeurs > 260 mg/kg (tableau 3). En effet, les concentrations en Pb supérieures à 200 mg/kg semblent absentes de tout le territoire régional. Or il est connu par ailleurs que tout un secteur centré sur Noyelles-Godault et Aubry est fortement impacté par du plomb, ce que montrent d'ailleurs huit points du cartogramme de la figure 4 qui excèdent ce seuil. La superficie où les teneurs en plomb dépassent 200 mg/kg couvre 2700 hectares (Douay *et al.*, 2001) qui pourraient être représentés à l'échelle du document.

On constate par ailleurs un net effet de l'agglomération de Lille-Roubaix-Tourcoing sur les teneurs en plomb. Enfin une zone contaminée est axée sur la vallée de la Sambre laquelle arrose Hautmont, Maubeuge et Jeumont, trois villes dont l'industrialisation précoce au XIX^e siècle a probablement laissé un impact notable sur l'environnement.

Zinc (HF + ER) (figure 11c)

Les impacts des trois sites critiques s'expriment également pour le zinc mais pas celui de l'agglomération lilloise.

Cuivre (HF + ER) (figure 11d)

La carte krigée du cuivre fait apparaître deux secteurs dont les sols sont pauvres en ce métal (Cu < 10 mg/kg), correspondant sensiblement aux plaines maritimes des Wateringues et des Bas Champs picards. En revanche, une zone dont les teneurs sont comprises entre 20 et 50 mg/kg se distingue clairement, correspondant à la Plaine de la Lys et à la Région de Lille. Dans le premier cas, il est difficile de séparer une origine naturelle (sols assez argileux en surface) et une origine agricole (culture de pommes de terre). En ce qui concerne la région de Lille, une pollution diffuse péri-urbaine ne peut pas être écartée.

Chrome (HF) et Chrome (ER) (figures 11e et 11f)

La figure 11e montre que, à l'exception d'un petit secteur de Thiérache, la totalité de la surface régionale présente des teneurs totales en chrome comprises entre 25 et 75 mg/kg. La figure 11f (qui cartographie des teneurs pseudo-totales) montre un spectaculaire décalage vers des valeurs plus basses, presque toujours inférieures à 50 mg/kg.

Nickel (HF) et Nickel (ER) (figures 11g et 11h)

La teinte verte (teneurs comprises entre 15 et 30 mg/kg) domine largement sur les deux cartes. On note un décalage vers des teneurs plus faibles (figurées en bleu - teneurs inférieures à 15 mg/kg) en Flandre intérieure, Plaine maritime des Waterin-

gues, Pévèle et Plaine de la Scarpe sur la figure 11h où il s'agit de teneurs pseudo-totales (mise en solution à l'eau régale).

Mercure (figure 11i)

Les teneurs en mercure sont le plus souvent comprises entre 0,05 et 0,10 mg/kg. Quelques petits secteurs avec des teneurs comprises entre 0,15 et 0,25 mg/kg apparaissent à proximité de Lille, de Noyelles Godault et d'Arques. Ces secteurs montrent une contamination certaine. En effet, une précédente étude menée sur 2149 échantillons dans le centre du Bassin parisien, donc dans un contexte pédo-géologique comparable (Baize *et al.*, 2001), avait montré que toutes les valeurs supérieures à 0,10 mg/kg devaient être considérées comme d'importantes anomalies d'origine anthropique.

Sélénium (figure 11j)

Une dizaine de zones nettement plus riches en sélénium se détachent sur un fond vert (couleur verte = teneurs comprises entre 0,15 et 0,30 mg/kg). Parmi elles, quatre dépassent largement 0,60 mg/kg et correspondent aussi bien à des sols agricoles qu'à des sols péri-urbains ou forestiers. Le caractère volatile de certaines formes de Se pourraient expliquer ces variations de teneurs qui semblent aléatoires quoique curieusement alignées.

Arsenic (figure 11k)

Nous ne disposons des analyses de l'arsenic que sur 323 sites. Pourtant, ce métalloïde, absent des études préalables aux épandages de boues d'épuration, intéresse toutes sortes d'utilisateurs potentiels. C'est pourquoi nous en présentons une carte krigée. À noter qu'il n'a pas été établi de classes nationales pour l'arsenic (tableau 7).

Vision multi-élémentaire - Indicateur de charge multi-métallique

Nous avons calculé l'indice de charge multi-métallique (ICMM) (Duigou et Baize, 2010) pour les 3715 sites pour lesquels cet indice était quantifiable. Il s'agit d'un indice très facile à calculer, que chacun peut utiliser localement et dont les résultats numériques peuvent être valablement confrontés à ceux obtenus à l'échelon national. Pour cela, chaque concentration en un ETM a été classée selon 6 classes définies « à dire d'expert » pour l'ensemble du territoire national (dites « classes nationales », cf. tableau 7 - Baize, 1997).

Ces classes sont numérotées de 1 (pour les valeurs les plus faibles) à 6 (pour les valeurs les plus élevées). On notera que les classes 6 de Cd, Cr, Cu et Zn correspondent exactement aux valeurs qui excèdent les seuils réglementaires pour l'épandage des boues (dites « valeurs excédentaires » - Baize *et al.*, 2007). En revanche, pour Pb, la classe 5 comprend la valeur seuil de 100 mg/kg. Pour le nickel, les classes 4 - 5 et 6 correspondent à des valeurs excédentaires d'ampleurs croissantes.

Figure 11 - Cartes des teneurs en éléments traces dans les horizons de surface (en mg/kg).

Figure 11 - Maps of trace element contents of surface horizons (as mg/kg).

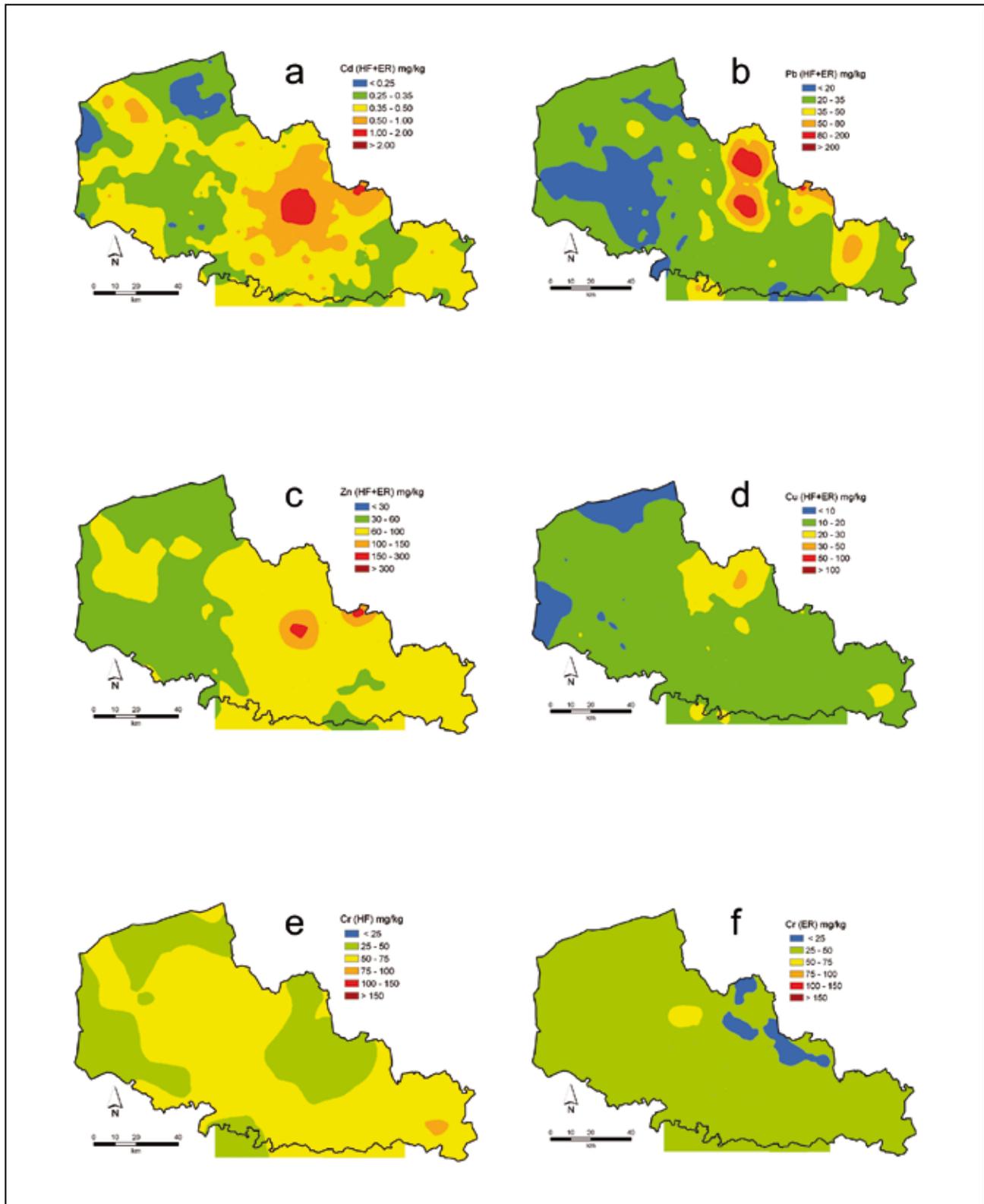


Figure 11 (suite) - Cartes des teneurs en éléments traces dans les horizons de surface (en mg/kg).
Figure 11 (continuation) - Maps of trace element contents of surface horizons (as mg/kg).

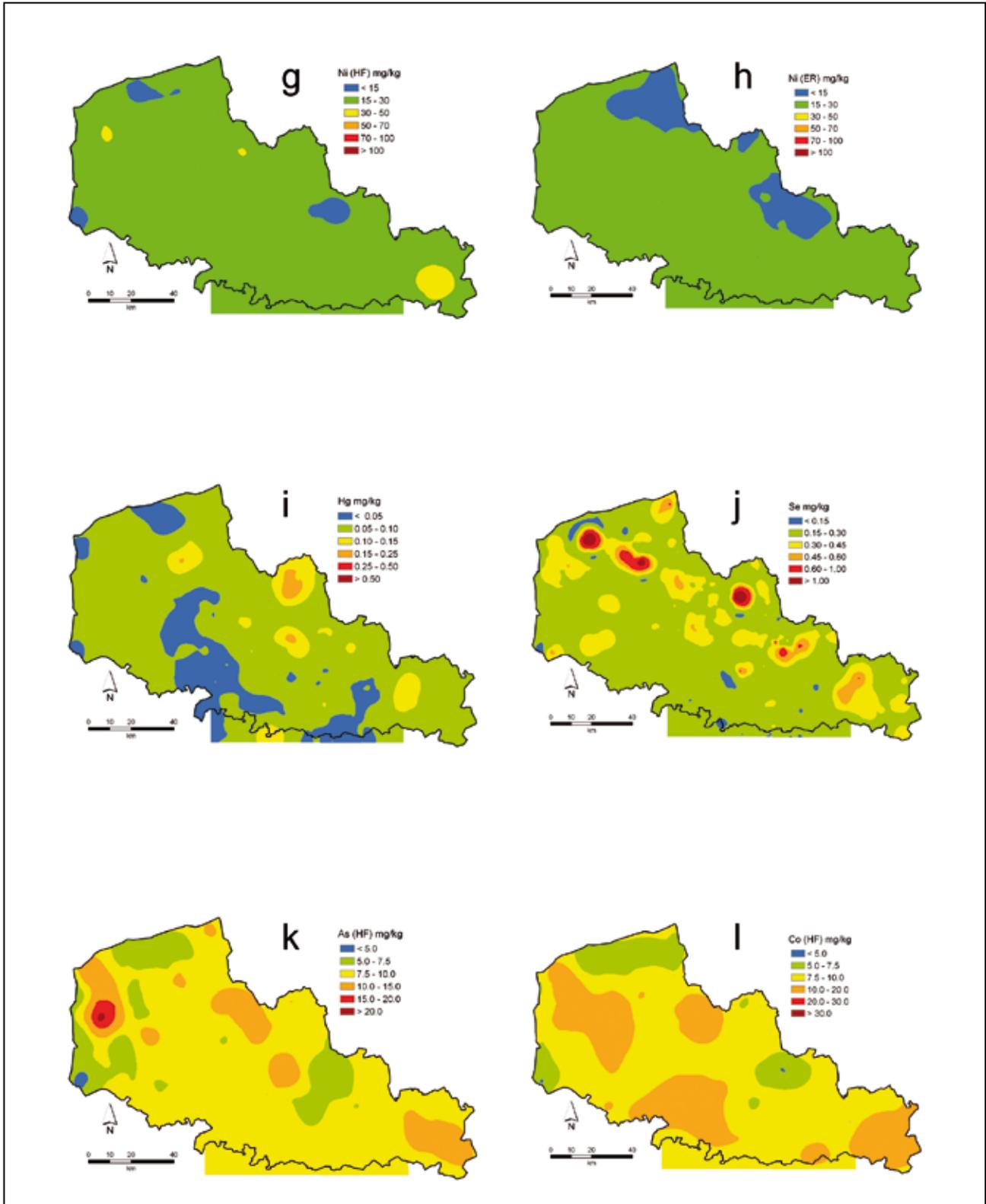


Tableau 5 - Comparaison entre indicateurs statistiques régionaux et nationaux (nouvelle collecte 2009). Valeurs mises entre parenthèses quand « reste de la France » > Nord - Pas de Calais - Valeurs surlignées en gris quand Nord - Pas de Calais > « reste de la France ».

Table 5 - Comparison between region-wide and nation-wide statistical indicators. Values put in brackets when all other French regions > Nord - Pas de Calais - Values highlighted in grey when Nord - Pas de Calais > all other French regions.

Populations HF							
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Nombre	reste de la France	14 941	14 869	14 944	14 941	14 945	14 961 0
	NPC	740	586	732	574	741	742
P10	reste de la France	0,14	22,7	6,7	9,3	14,7	35,5
	NPC	0,25	29,7	8,8	11,3	21,2	50,0
Médiane P50	reste de la France	0,29	44,3	12,3	19,1	24,2	55,5
	NPC	0,43	49,6	14,2	21,2	31,6	72,0
P90	reste de la France	0,63	70,6	22,4	(36,2)	39,6	90,0
	NPC	1,37	69,7	23,1	(32,1)	81,7	180,9

Populations ER							
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Nombre	reste de la France	36 909	37 626	37 607	37 715	37 573	37 529
	NPC	3 142	3 187	3 187	3 187	3 187	3 186
P10	reste de la France	0,11	17,9	6,3	8,3	12,4	30,0
	NPC	0,27	20,6	10,0	12,8	15,4	49,0
Médiane P50	reste de la France	0,25	35,7	13,0	19,6	19,5	53,3
	NPC	0,40	36,1	14,6	18,6	23,0	63,9
P90	reste de la France	0,55	(63,4)	(28,1)	(37,4)	35,0	(94,3)
	NPC	0,68	(51,0)	(21,9)	(26,7)	40,9	(88,4)

L'ICMM est défini comme la somme des numéros de classes pour Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn. C'est donc un nombre entier qui ne peut être inférieur à 6 ni excéder 36.

La figure 12 présente l'histogramme des ICMM. La médiane vaut 14 et le maximum se limite à 28 (un seul site). Pour la population nationale étudiée lors de la nouvelle collecte de 2009 (Duigou et Baize, 2010) et pour plus de 72 000 sites analysés, l'ICMM varie de 6 à 34 avec une médiane de 12. La médiane pour la région Nord-Pas-de-Calais est donc supérieure à celle observée pour la France entière, mais les 51 sites pour lesquels l'indice est supérieur ou égal à 20 ne représentent que 1,4 % des sites analysés contre 3,5 % pour la population nationale. Ces 51 sites s'éparpillent sur le territoire (figure 13), avec une concentration des valeurs les plus élevées dans le centre de la région, à proximité l'agglomération de Lille et des deux sites critiques de Noyelles-Godault et d'Auby. Celui de Mortagne-du-Nord n'ap-

paraît pas car quatre éléments traces seulement étaient analysés autour de l'ancienne zinguerie, ce qui n'a pas permis de calculer valablement les ICMM (cf. tableau 1).

DISCUSSION - UTILITÉ

Outre une vision spatiale des teneurs en les principaux éléments traces, le traitement de cette base de données a permis d'avoir une connaissance statistique des teneurs usuelles en stratifiant par matériaux parentaux et par petites régions naturelles (cf. ci-dessous). Ces teneurs usuelles ou teneurs agricoles habituelles (TAH) sont aisément fournies en considérant les gammes de valeurs fréquentes (GVF). Ces dernières sont les valeurs comprises entre le percentile 10 et le percentile 90; elles représentent donc 80 % des valeurs mesurées et sont peu

Figure 12 - Distribution des indices de charge multi-métallique (ICMM). Voir le texte pour le calcul de cet indice.

Figure 12 - Distribution of the "multi-metal load indices".

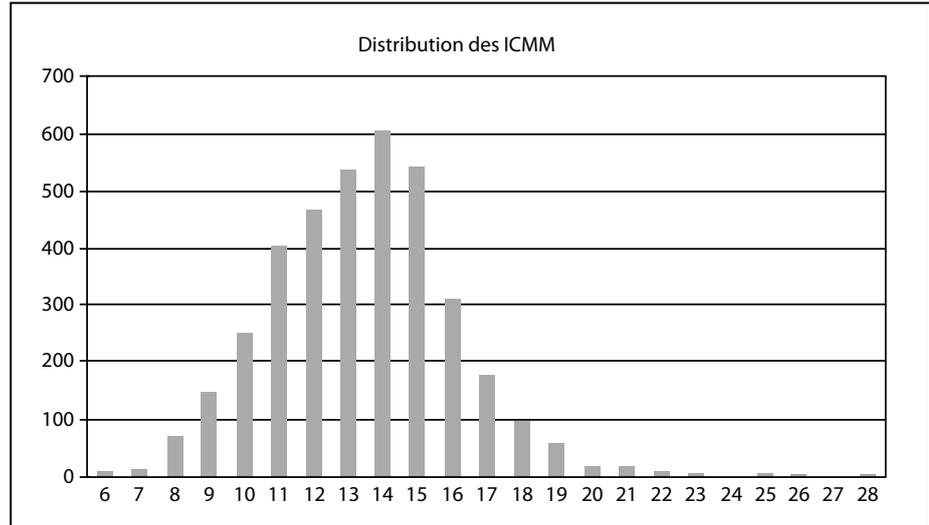
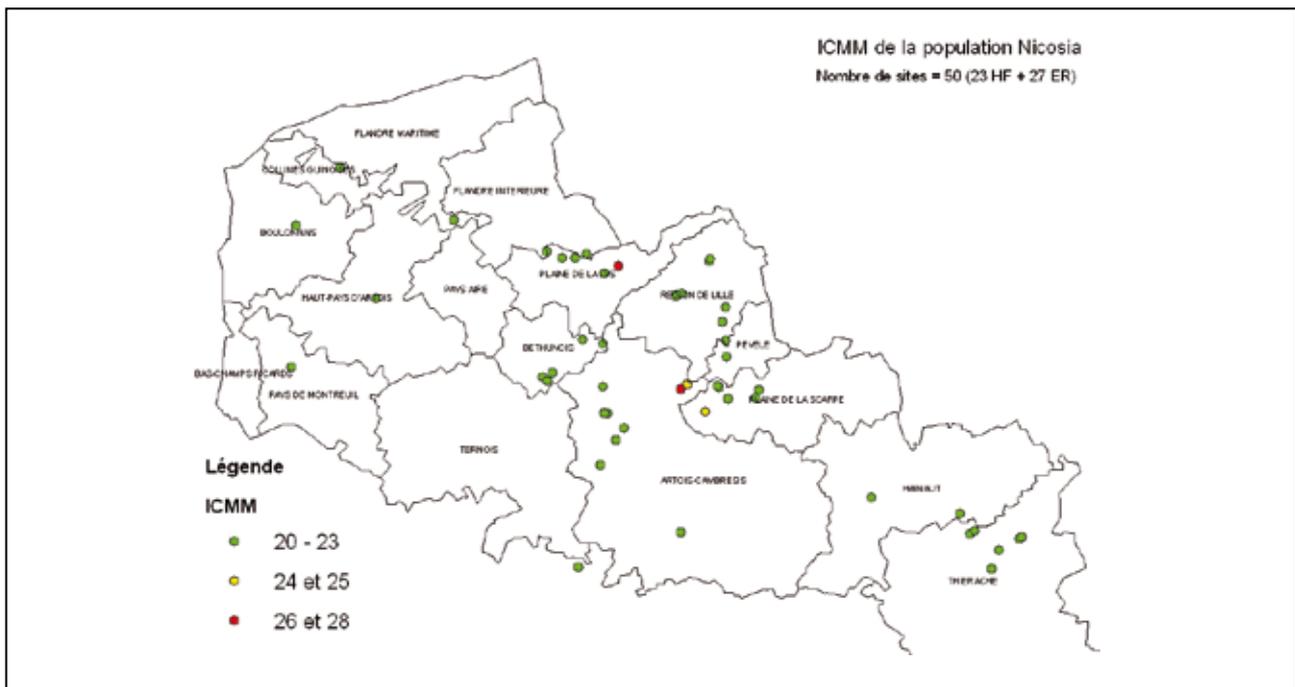


Figure 13 - Localisation des sites dont l'indice de charge multi-métallique (ICMM) est égal ou supérieur à 20. Voir le texte pour le calcul de cet indice.

Figure 13 - Location of the sites with a "multi-metal load index" equal to 20 or higher.



sensibles à l'existence de quelques valeurs extrêmes pouvant résulter d'erreurs de saisie ou de fortes pollutions avérées. E_{GVF} est l'étendue de cette gamme, soit [P90 - P10].

De telles statistiques peuvent fournir des valeurs de référence plus affinées que de simples statistiques régionales ou départementales, tout particulièrement dans le cadre de l'interprétation de l'état des milieux (IEM) (MEEDDAT, 2007) ou pour

proposer à tous les services locaux ou régionaux en charge de la santé des valeurs seuils de sélection pour prendre en compte tel ou tel élément trace dans une évaluation des risques sanitaires (Mathieu *et al.*, 2008; Villanneau *et al.* 2008).

Tableau 6 - Localisation des valeurs anomaliques et origine probable.**Table 6** - Location of outlier values and their likely origin.

	Nombre de valeurs anomaliques	localisées à quelques secteurs ou épars ?	liées aux 3 grandes sources ?	liées aux pollutions diffuses locales ?	origine probable naturelle ou anthropique ?
Cd HF	79	localisés	oui	oui	anthropique
Cd ER	106	plutôt localisés	oui	oui	anthropique
Cr HF	21	oui (Thiérache)	non	non	naturelle
Cr ER	20	épars	non	non	naturelle
Cu HF	53	épars	oui (Mortagne)	oui	anthropique
Cu ER	112	localisées	non	oui	anthropique
Ni HF	17	épars	non	non	naturelle
Ni ER	83	épars	non	non	naturelle
Pb HF	85	localisées	oui	non	anthropique
Pb ER	223	localisées	oui	oui	anthropique
Zn HF	92	localisés	oui	non	anthropique
Zn ER	100	localisés	non	oui	anthropique
As	19	oui (Boulonnais)	non	non	naturelle
Hg	251	épars	non	oui	anthropique
Se	94	épars	non	??	??
Bi	12	épars	non	non	naturelle
Co	12	localisés	non	non	naturelle
In	4	épars	non	non	naturelle
Mn	9	localisés	non	non	naturelle
Mo	26	épars	non	non	naturelle
Sb	24	épars	non	non	naturelle
Sn	10	épars	non	non	naturelle
Tl	9	localisés	non	non	naturelle
V	4	localisés	non	non	naturelle
Al	5	localisés	non	non	naturelle
Fe	12	localisés	non	non	naturelle

Stratification par matériaux parentaux

Un certain nombre de sites analysés ont pu être rattachés avec une quasi-certitude à un matériau parental. Nous avons donc tenté d'établir des statistiques en stratifiant sur ce critère. Toutefois seuls six matériaux sont caractérisés par un nombre suffisant d'analyses pour nous permettre d'établir des statistiques fiables

(tableau 8). Evidemment, puisqu'il s'agit d'horizons de surface, l'héritage géochimique en provenance du matériau parental est plus ou moins brouillé par les processus pédogénétiques (encore peu intenses dans la région) et surtout par les contaminations d'origines diverses, dont l'ampleur dépend plutôt de la localisation par rapport aux principales sources urbaines ou industrielles.

Tableau 7 - Classes nationales de teneurs en ETM (Baize, 1997 - teneurs exprimées en mg/kg). Remarques :

- les valeurs qui excèdent les seuils de la réglementation française sur l'épandage des boues d'épuration en agriculture sont présentées sur un fond gris ;

- la classe 5 du plomb est « à cheval » sur le seuil réglementaire pour ce métal (100 mg/kg).

Table 7 - Nationwide classes of trace metal concentrations (expressed as mg/kg). Remarks :

- values exceeding the thresholds of the French regulation relative to sewage sludge application in agriculture are displayed on a grey background ;

- class 5 for lead straddles the legal threshold for this metal (100 mg/kg).

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Cadmium	< 0,25	0,25 - 0,35	0,35 - 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 2,00	> 2,00
Chrome	< 25	25 - 50	50 - 75	75 - 100	100 - 150	> 150
Cuivre	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 50	50 - 100	> 100
Nickel	< 15	15 - 30	30 - 50	50 - 70	70 - 100	> 100
Plomb	< 20	20 - 35	35 - 50	50 - 80	80 - 200	> 200
Zinc	< 30	30 - 60	60 - 100	100 - 150	150 - 300	> 300

couleur	bleu	vert	jaune	orange	rouge	rouge foncé
						ou violet

Ces réserves importantes étant faites, peu de différences pédogéochimiques apparaissent. Les sols issus de craie semblent assez nettement plus riches en cadmium que les autres. Une telle anomalie spécifique a déjà été décrite pour les sols crayeux de cette même région (Sterckeman *et al.*, 2006) comme dans d'autres (Baize *et al.*, 1999; Baize *et al.* 2006). Quant aux sols de la Plaine de la Lys, ils apparaissent nettement plus riches en chrome parce qu'argileux (Sterckeman *et al.*, 2002b).

Stratification par petites régions naturelles (PRN)

La délimitation des petites régions repose sur une connaissance approfondie des sols et du milieu naturel régional. Des statistiques ont alors été réalisées pour chaque PRN et chaque élément pour lesquels nous disposons d'au moins 100 analyses ainsi que pour le Boulonnais (nb = seulement 62), petite région naturelle intéressante à la fois par son hétérogénéité géo-pédologique (plus de 8 types de matériaux parentaux représentés) et par l'existence d'anomalies naturelles (*tableau 9*). Pour les analyses après mise en solution par HF et pour l'arsenic, le nombre de 100 analyses par PRN est loin d'être atteint. Les données relatives à l'arsenic sont cependant présentées ici car il s'agit d'un élément d'intérêt particulier en ce qui concerne les problèmes de santé publique, et qui est de plus rarement mesuré dans les sols.

La comparaison des valeurs P50 (médiane) et P90 peut permettre de mettre en évidence, soit des différences pédogéolo-

giques entre PRN, soit des degrés différents de contamination diffuse. Ainsi, en ce qui concerne le cadmium, un certain nombre de valeurs de médianes et de P90 élevées sont significatives d'un haut niveau de contamination diffuse : 0,69 et 0,95 mg/kg pour la Pèvèle, 0,68 et 2,41 mg/kg pour la Plaine de la Scarpe ; 0,50 et 0,82 mg/kg pour la région de Lille.

CONCLUSION

Ce travail montre l'intérêt de réunir différentes sources de données, pour constituer des bases de données régionales dotées d'un grand nombre d'échantillons, avec une bonne répartition spatiale. Aux données de différents programmes de recherche régionaux (RPG, RMQS régional, PRC...) ont été ajoutés des résultats analytiques provenant de plans d'épandages, ce qui a permis de rassembler des analyses pour plus de 3900 sites, couvrant assez bien le territoire régional. Les différentes stratégies d'échantillonnage se sont assez bien complétées et ont permis une bonne couverture des diverses causes de contaminations anthropiques, liées aussi bien aux retombées diffuses qu'à des sources ponctuelles. Le traitement de l'ensemble de ces informations a abouti à une image spatialisée probablement assez exacte de l'état actuel des teneurs en ETM des sols agricoles du Nord -Pas-de-Calais.

La réunion de données issues de programmes différents pose toutefois un certain nombre de problèmes et nécessite des précautions et des vérifications quant à la validité de leur fusion.

Tableau 8 - Indicateurs statistiques des teneurs ER en ETM des horizons de surface, stratifiés selon 6 matériaux parentaux.

E_{GVF} = largeur de la « gamme de valeurs fréquentes » = écart entre les valeurs P10 et P90.

Table 8 - Statistical indicators of trace metal contents (digestion by aqua regia) for surface horizons, according to six parent materials.

E_{GVF} = width of the « frequent values range » = difference between P10 and P90 values.

Matériau parental		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
		ER	ER	ER	ER	ER	ER	
CVBV	P10	0,26	29,0	10,7	15,3	16,0	50	0,03
	P50	0,42	41,8	14,6	20,2	23,1	62	0,05
	P90	0,68	51,8	19,9	26,7	35,5	85	0,09
	E_{GVF}	0,42	22,8	9,2	11,4	19,5	35	0,06
LL	P10	0,25	20,8	10,0	13,7	14,2	48	0,03
	P50	0,39	36,5	14,1	17,7	22,3	61	0,05
	P90	0,65	48,3	20,8	23,9	45,1	83	0,09
	E_{GVF}	0,40	27,5	10,8	10,2	30,9	35	0,06
LSL	P10	0,21	16,8	8,1	7,7	16,0	42	0,04
	P50	0,44	24,5	12,2	11,9	23,9	68	0,06
	P90	0,64	34,0	21,1	16,5	32,7	94	0,15
	E_{GVF}	0,43	17,2	13,0	8,8	16,7	52	0,11
MCPB	P10	0,34	17,6	8,2	5,6	18,0	50	0,04
	P50	0,51	27,5	11,7	10,0	25,4	69	0,06
	P90	0,81	40,7	16,6	18,5	32,9	103	0,08
	E_{GVF}	0,47	23,1	8,4	12,9	14,9	53	0,04
CCS	P10	0,49	21,8	11,0	13,9	18,6	65	0,04
	P50	0,62	28,6	16,4	18,8	27,9	80	0,08
	P90	0,86	41,4	22,5	27,5	38,5	104	0,12
	E_{GVF}	0,37	19,6	11,5	13,6	19,9	39	0,08
ATG	P10	0,30	24,4	15,1	17,0	19,4	60	0,04
	P50	0,38	44,1	20,6	23,1	24,6	72	0,06
	P90	0,50	58,2	27,1	28,8	41,5	90	0,09
	E_{GVF}	0,20	33,8	12,0	11,8	22,1	30	0,05

CVBV: colluvions de vallons et de bas de versants (n = 342)

LSL: limons sableux loessiques (n = 96)

CCS: craies du Crétacé supérieur (n = 77)

LL: limons loessiques (n = 849)

MCPB: matériaux complexes des plaines basses (n = 91)

ATG: alluvions tardi-glaciaires (n = 191)

Parmi ces difficultés, il y a la profondeur des prélèvements (liée souvent à l'occupation des sols prélevés) mais surtout le problème, récurrent en France et qui complique tous les traitements de données, de l'utilisation par les laboratoires de 2 méthodes de mise en solution (HF vs ER). Or le débat est toujours ouvert pour savoir si ces deux techniques donnent des résultats suffisamment similaires pour qu'on puisse les traiter ensemble.

En introduction, nous avons déjà évoqué les différentes

bases de données traitant des analyses d'ETM dans les sols du territoire français. Il est évident que les programmes nationaux ou européens (RMQS, FOREGS), du fait de la densité des prélèvements adaptée à une spatialisation à petite échelle, ne peuvent pas fournir une image suffisamment précise de la qualité des sols à l'échelon régional.

Insistons pour finir sur le fait que le programme régional intitulé Référentiel Pédologie-Géochimie a apporté des connais-

sances relatives à des éléments traces très rarement étudiés par ailleurs (As, Bi, Co, In, Mo, Sb, Sn, Ti, V).

Cet article est le premier volet d'un diptyque portant sur la distribution des éléments en traces dans les sols agricoles du Nord-Pas-de-Calais. Un second article sera consacré aux calculs de facteurs d'enrichissement et à leur utilisation pour quantifier et cartographier les apports en ETM liés aux activités humaines.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'ADEME pour son co-financement dans le cadre du programme « Spatialisation des éléments traces dans les sols en région Nord-Pas-de-Calais - Identification de leurs origines naturelles et anthropiques » (dit aussi NICOSIA) et au SATEGE du Pas-de-Calais pour nous avoir fourni de nombreuses données analytiques.

Merci également à N. Duigou pour des traitements de données spécifiques et aux deux relecteurs qui, par leurs remarques et suggestions, nous ont permis d'améliorer ce manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Ratié C., Saby N. et Grolleau E., 2003 - Le réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) de France. *Étude et Gestion des Sols*, 10, 4, pp. 241-250.
- Baize D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.
- Baize D., Deslais W. et Gaiffe M., 1999 - Anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 2, pp. 85-104.
- Baize D., Deslais W., Bourennane H. et Lestel L., 2001 - Cartographie du mercure dans l'horizon de surface des sols agricoles dans le centre du Bassin parisien. Détection, localisation et origine des contaminations. *Étude et Gestion des Sols*, 3, pp. 167-180.
- Baize D., Saby N., Deslais W., Bispo A. et Feix I., 2006 - Analyses totales et pseudo-totales d'éléments en traces dans les sols - Principaux résultats et enseignements d'une collecte nationale. *Étude et Gestion des Sols*, 2, pp. 181-200.
- Baize D., Deslais W. et Saby N., 2007 - Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France. Résultats d'une collecte de données à l'échelon national. Rapport simplifié. Janvier 2007. ADEME. Convention 0375 C0035. 84 p. http://www.gissol.fr/programme/bdetm/_rapport_anademe/rapport/contents.php
- Bargagli R., 1998 - Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to monitoring and biorecovery. Springer, 324 p.
- Chen M., Ma L. Q. and Harris W., 1999 - Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils. *Journal of Environmental Quality*, 28, pp. 1173-1181.
- Cordier L., 1999 - Les éléments en traces dans les limons du Nord -Pas-de-Calais (France). Contribution à l'établissement d'un référentiel pédogéochimique. Mém. fin d'étude d'ing. agro., Fac. Univ. Sc. Agronomiques de Gembloux, 74 p.
- Deraisme J. et Bobbia M., 2003 - L'apport de la géostatistique à l'étude des risques liés à la pollution atmosphérique. *Environnement, Risques & Santé*, vol 2, n°3, pp. 168-175.
- De Temmerman L., Vanongeval L., Boon, W., Hoening M. and Geypens M., 2003 - Heavy metal content of arable soils in Northern Belgium. *Water Air and Soil Pollution*, 148, pp. 61-76.
- Douay F., Sterckeman T., Proix N. et Fourrier H., 2001 - Evaluation et comparaison de la contamination des sols cultivés autour des sites métallurgiques de Noyelles-Godault et d'Auby. Programme de Recherches Concertées « Sites et Sols Pollués ». 17 p.
- Douay F., Fourrier H., Pruvot C., Schwartz C., Deram A. et Descamps M., 2005 - Programme complémentaire au Réseau de Mesures de la Qualité des Sols dans la Région Nord-Pas-de-Calais. Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais, ADEME, Agence de l'Eau Artois Picardie, DIREN. 49 p., annexes.
- Duigou N. et Baize D., 2010 - Nouvelle collecte nationale d'analyses d'éléments en traces dans les sols (horizons de surface) - (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn). Contrat ADEME. 284 p.
- Fourrier H., Douay F., 2008 - Les sols du Nord-Pas-de-Calais : typologie et clés de détermination - Application au logiciel AZOFERT. 126 p., 37 fig., 24 tabl.
- Jolivet C., Arrouays D., Boulonne L., Ratié C. et Saby N., 2006 - Le réseau de mesures de la qualité des sols de France (RMQS). État d'avancement et premiers résultats. *Étude et Gestion des Sols*, 13, 3, pp. 149-164.
- Karczewska A., 1996 - Metal species distribution in top- and sub-soil in an area affected by copper smelter emissions. *Applied Geochemistry*, 11, pp. 35-42.
- Kim K.-H., and Kim S.-H., 1999 - Heavy metal pollution of agricultural soils in central regions of Korea. *Water, Air, and Soil Pollution*, 111, pp. 109-122.
- Mathieu A., Baize D., Raoul C. et Daniau C. 2008 - Proposition de référentiels régionaux en éléments traces métalliques dans les sols : leur utilisation dans les évaluations des risques sanitaires. *Environnement, Risques & Santé*, vol 7, 2, pp. 112-122.
- McGrath S.P. and Loveland P.J. 1992 - The soil geochemical atlas of England and Wales. Blackie Academic & Professional. 101 p. + 40 cartes.
- MEEDDAT 2007 - Outils méthodologiques. La démarche d'interprétation de l'état des milieux. 8 février 2007. 41 p.
- Pierce F. J., Dowdy R. H., and Grigal D. F., 1982 - Concentrations of six trace metals in some major Minnesota soil series. *Journal of Environmental Quality*, 11, pp. 416-422.
- Prasad M. N. V., and Hagemeyer F., 1999 - Heavy Metal Stress in Plants: From Molecules to Ecosystems, Springer.
- Rodríguez Lado L., Hengl T. and Reuter H.J., 2008 - Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*, 148, pp. 149-199.
- Sterckeman T., Douay F., Proix N. et Fourrier H., 1996 - Programme de Recherches Concertées. Étude d'un secteur pollué par des métaux. Typologie et cartographie des sols, inventaire des polluants minéraux, étude de la migration verticale de Cd, Cu, Pb et Zn. 29 p. Rapport Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais. Secrétariat d'état à la Recherche. - ISA - INRA, Lille.
- Sterckeman T., Douay F., Proix N. et Fourrier H., 2002a - Contamination des sols vers la profondeur à Noyelles-Godault et Auby. In: « Les Éléments traces métalliques dans les sols - Approches fonctionnelles et spatiales » D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. pp. 237-254 ?
- Sterckeman T., Douay F., Fourrier H. et Proix N. 2002b - Référentiel Pédogéochimique du Nord-Pas-de-Calais. Rapport final (130 p) et Annexes (306 p).
- Sterckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Proix N., Schwartz C., 2006 - Trace elements in soils developed in sedimentary materials from Northern France. *Geoderma*, 136 (3-4), pp. 912-929.)
- Sterckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Proix N. et Schwartz C., 2007 - Référentiel pédogéochimique du Nord-Pas-de-Calais. Méthode et

Tableau 9 - Indicateurs statistiques stratifiés par petites régions naturelles (PRN)

Analyses totales (HF) et pseudo-totales (ER) traitées ensemble pour Cd, Pb, Cu, Zn

Analyses pseudo-totales (ER) seulement pour Cr et Ni.

Ne sont présentées que les PRN pour lesquelles le nombre de valeurs est > 100 (à l'exception du Boulonnais).

Les valeurs les plus élevées sont présentées sur un fond gris.

Les valeurs les plus faibles sont présentées en italiques et entre parenthèses.

Table 9 - Statistical indicators according to "petites régions naturelles" (PRN).

Total (HF) and pseudo-total (ER) analyses processed together for Cd, Pb, Cu, Zn.

Only pseudo-total analyses (ER) of Cr and Ni.

Are only displayed PRN with a number of values > 100 (apart from Boulonnais).

The highest values are displayed on a grey background.

The lowest values are italicized and put in brackets.

MÉTAUX ANTHROPOGÈNES (contaminations)

Cadmium HF+ER

Région naturelle	nb valeurs	P10	P50 (médiane)	P90
Plaine de la Lys	273	0,30	0,39	0,54
Boulonnais	62	(0,15)	(0,28)	0,50
Plaine de la Scarpe	364	0,40	0,68	2,41
Région de Lille	188	0,36	0,50	0,82
Pévèle	154	0,51	0,69	0,95
Artois	901	0,35	0,50	0,72
(Flandre intérieure)	149	(0,19)	(0,26)	(0,37)
Hainaut	158	0,26	0,34	0,44
Cambrésis	373	0,27	0,39	0,58
Haut Pays d'Artois	131	0,22	0,32	0,46
Ternois	550	0,24	0,33	0,74

Cuivre HF+ER

Région naturelle	nb valeurs	P10	P50 (médiane)	P90
Plaine de la Lys	273	15,5	21,3	29,1
(Boulonnais)	62	(7,0)	(11,7)	(15,7)
Plaine de la Scarpe	355	8,4	12,1	21,6
Région de Lille	188	14,8	19,9	31,7
Pévèle	154	11,1	14,3	18,9
Artois	901	12,2	15,9	22,0
Flandre intérieure	164	9,0	13,5	19,8
Hainaut	158	10,3	12,6	(15,9)
Cambrésis	373	10,7	13,7	17,1
(Haut Pays d'Artois)	145	(8,0)	(11,2)	16,0
Ternois	557	9,3	13,1	17,7

Plomb HF+ER

Région naturelle	nb valeurs	P10	P50 (médiane)	P90
Plaine de la Lys	273	19,7	26,9	49,3
Boulonnais	62	15,0	24,3	36,7
Plaine de la Scarpe	365	22,0	33,4	103,3
Région de Lille	188	20,8	36,4	132,2
Pévèle	154	23,2	33,4	50,5
Artois	901	19,6	27,5	43,3
(Flandre intérieure)	164	(14,0)	(20,1)	34,5
Hainaut	158	17,3	21,3	30,8
Cambrésis	373	15,9	21,4	32,0
(Haut Pays d'Artois)	145	(12,4)	(17,0)	(25,8)
(Ternois)	557	(14,0)	(18,9)	(27,0)

Mercure

Région naturelle	nb valeurs	P10	P50 (médiane)	P90
Plaine de la Lys	270	0,04	0,07	0,12
Plaine de la Scarpe	206	0,04	0,06	0,11
Région de Lille	186	0,04	0,07	0,15
Pévèle	154	0,04	0,06	0,12
Artois	897	0,04	0,06	0,10
Flandre intérieure	83	-	-	-
Hainaut	158	0,03	0,05	(0,07)
(Cambrésis)	371	0,03	(0,04)	(0,08)
Haut Pays d'Artois	58	-	-	-
Ternois	470	0,03	0,05	(0,08)

Zinc HF+ER

Région naturelle	nb valeurs	P10	P50 (médiane)	P90
Plaine de la Lys	273	57,8	73,6	91,6
Boulonnais	62	38,0	59,2	86,7
Plaine de la Scarpe	365	55,4	91,2	303,3
Région de Lille	187	58,1	72,7	93,6
Pévèle	154	64,3	85,8	114,0
Artois	901	56,0	69,8	93,3
(Flandre intérieure)	164	(42,0)	(53,0)	72,3
Hainaut	158	49,9	57,8	69,0
Cambrésis	373	50,0	61,1	76,8
(Haut Pays d'Artois)	145	(44,0)	(52,3)	74,6
Ternois	557	46,9	55,6	73,7

MÉTAUX NON ANTHROPOGÈNES

(= «naturels »)

Nickel ER

Région naturelle	nb valeurs	P10	P50 (médiane)	P90
Plaine de la Lys	240	15,5	22,8	28,9
(Plaine de la Scarpe)	183	(5,6)	(9,8)	(17,3)
Région de Lille	178	12,6	16,9	21,8
(Pévèle)	139	(8,8)	(13,7)	(18,7)
Artois	842	14,8	19,8	26,7
Flandre intérieure	130	11,0	15,0	19,2
Hainaut	146	14,2	18,2	24,6
Cambrésis	356	15,0	19,8	27,9
Haut Pays d'Artois	116	14,0	17,9	27,5
Ternois	533	14,6	18,6	27,9

Chrome ER

Région naturelle	nb valeurs	P10	P50 (médiane)	P90
Plaine de la Lys	240	22,7	41,9	58,3
(Plaine de la Scarpe)	183	(17,1)	(24,6)	(39,1)
(Région de Lille)	178	(16,1)	(24,9)	(40,3)
(Pévèle)	139	(16,7)	(24,9)	43,4
Artois	842	24,3	38,8	49,8
Flandre intérieure	130	20,9	30,3	42,9
Hainaut	146	22,4	41,4	51,9
Cambrésis	356	28,6	42,2	53,1
Haut Pays d'Artois	116	28,0	37,4	48,1
Ternois	533	25,3	38,3	51,5

ARSENIC**Arsenic**

Région naturelle	nb valeurs	P10	P50 (médiane)	P90
Plaine de la Lys	32	7,1	10,9	15,2
Boulonnais	42	4,6	13,3	45,2
(Plaine de la Scarpe)	23	(3,4)	(6,2)	(8,6)
(Plaine maritime)	23	(3,3)	(5,4)	(10,8)
Artois	29	5,6	8,4	11,8
Flandre intérieure	24	6,8	9,0	14,1
Thiérache	26	8,4	10,4	15,1
(Haut Pays d'Artois)	24	(3,6)	(7,9)	(10,1)

Pour l'arsenic, ne sont présentées que les PRN pour lesquelles le nombre de valeurs est > 22.

- principaux résultats. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 14, 2, pp. 153-168.
- Tukey J. W., 1977 - *Exploratory Data Analysis*. Addison Wesley, Reading, Massachusetts.
- van Oort F., Gaultier J.-P., Hardy R. et Bourennane H., 2002 - Contaminations d'origine industrielle - Mortagne-du-Nord. Distributions spatiales et stratégies d'échantillonnage. *In*: "Les Éléments traces métalliques dans les sols - Approches fonctionnelles et spatiales" D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. 570 p.
- Villanneau E., Perry-Giraud C., Saby N., Jolivet C., Marot F., Maton D., Floch-Barneaud A., Antoni V., et Arrouays D., 2008 - Détection de valeurs anormales d'éléments traces métalliques dans les sols à l'aide du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols. *Étude et Gestion des Sols*, 15, 3, pp. 183-200.
- Wilcke W., Muller S., Kanchanakool N., and Zech W., 1998 - Urban soil contamination in Bangkok: Heavy metal and aluminium partitioning in topsoils. *Geoderma*, 86, pp. 211-228.