

Utilisation de la base de données BDETM pour obtenir des valeurs de références locales en Éléments Traces Métalliques.

Cas de la région Centre

N. Duigou_(1,2), D. Baize₍₁₎ et A. Bispo₍₃₎

- 1) INRA, UR0272 Science du Sol, Centre d'Orléans, CS 40001 Ardon, F-45075 Orléans cedex 2, France
- 2) INRA, US1106 InfoSol, Centre d'Orléans, CS 40001 Ardon, F-45075 Orléans cedex 2, France
- 3) ADEME, 20, avenue du Grésillé, BP 90406, 49004 Angers cedex 01, France

RÉSUMÉ

Dans le cadre des études de sites et sols pollués et de l'interprétation de l'état des milieux (IEM), les bureaux d'études et les services déconcentrés de l'État sont demandeurs de valeurs de référence locales pour les teneurs en éléments traces métalliques: le but étant de comparer le sol d'étude avec des sols naturels situés à proximité et pédologiquement similaires. La BDETM 2009, fruit de la deuxième collecte nationale des analyses en éléments traces métalliques, rassemble des résultats pour plus de 73000 échantillons et peut, dans une certaine mesure, répondre à ces attentes. Mais différentes questions préalables se posent: sur quels territoires faut-il établir des statistiques, où et comment fixer des seuils? Ces réponses seront forcément locales car une teneur élevée mesurée dans un sol peut être naturelle pour ce sol et résulter d'une pollution pour un autre. La région Centre (analyses collectées pour 5913 horizons labourés) a été utilisée dans cette étude pour illustrer la démarche qui consiste en l'établissement de statistiques par régions agricoles (à condition que le nombre d'analyses disponibles soit jugé suffisant). Ces territoires paraissent être les plus pertinents au point de vue de leur homogénéité géologique et pédologique et ils peuvent donc servir de territoires de référence. Par la suite, afin de savoir si les valeurs mesurées sur le site étudié sont d'origine naturelle ou anthropique (ce qui implique *a priori* des dangers différents), une étude géologique et pédologique locale ainsi que l'historique des sources de pollution potentielles viendront affiner le diagnostic.

Mots clés

Éléments en trace, sols, IEM, valeurs de référence, région Centre.

SUMMARY

USE OF A NATIONWIDE DATABASE FOR THE ASSESSMENT OF LOCAL REFERENCE VALUES OF TRACE METALS :

Application to a French region

New French legislation for the management of potentially polluted sites requires that "the state of the environment" (i.e. of the soils and waters of the industrial site under study) be compared to the state of neighbouring natural environments or to regulatory management values established by public authorities. Within the framework of urban planning projects or conversion of former industrial sites, many studies are daily carried out in order to assess the risk to the population. Departments responsible for public health are recipients of these and must put forward an opinion. In the absence of statutory values, everyone tries to find local or regional data relating to trace metal concentrations in the soil (often called 'background values'), to use as points of comparison and thereby estimate the contamination level of the soil under study. Unfortunately, in such an industrial or urban context, it is very difficult to find "natural soils" located in the vicinity, which are similar enough from a pedological standpoint. More often than not, these assessments can at best be carried out with reference to soils considered to be relatively little-contaminated, namely the closest agricultural soils.

In France, a large data collection was carried out on a national scale (known as BDETM 2009). These data were provided by analyses, undertaken mainly within the framework of sewage sludge spreading plans and of some research programmes. The samples were taken from surface horizons of ploughed soils. These analyses only involved Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn and were taken from more than 73,000 sites throughout France. These are the only data available in large numbers.

Due to their origins, (topsoil analyses from agricultural soils of various types), these analyses very largely correspond to "usual agricultural contents" i.e. natural pedogeochemical concentration + local additional contamination by farming practices and diffuse atmospheric deposition. These "usual agricultural contents" correspond to the lowest concentrations that it is possible to measure in an urban or peri-urban soil, close to an industrial site. Beforehand different questions arise: on which territories statistics must be established, where and how thresholds must be fixed? The answers are to be given necessarily at the local level because the same high concentration observed in a soil could be natural in one particular case and anthropogenic in another.

The data collected on the area of the region Centre for 5913 sites have been processed and stratified according to "agricultural districts", territories much less heterogeneous from geological and pedological standpoints than administrative subdivisions. The usual measures of position (percentiles) and of dispersion (upper whiskers) have been determined for each agricultural district. This collection provides objective points of comparison for any institution or consultancy office wishing to confront the results of an analysis with various statistical indicators to decide whether the measure is anomalous or not. If the available data are sufficiently numerous, these statistics generated stratifying by agricultural districts are the most pertinent.

Finally, the diagnosis as to whether a value is truly natural or anthropogenic (hence different risk levels) will have to be based on a pedologically and geologically thorough point study of the site, without forgetting a historical inventory of possible sources of pollution.

Key-words

Trace elements, soils, reference values, region Centre (France).

RESUMEN

UTILIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS BDETM PARA OBTENER VALORES DE REFERENCIAS LOCALES EN ELEMENTOS TRAZA METÁLICOS: Caso de la región Centro

En el cuadro de los estudios de sitios y suelos contaminados y de la interpretación del estado de los medios (IEM), las oficinas de estudios y los servicios desconcentrados del estado piden valores de referencias locales para los contenidos en elementos traza metálicos: el objetivo está comparar el suelo de estudio con los suelos naturales situados a proximidad y pedológicamente similares. La BDETM 2009, fruto de la segunda colecta nacional de los análisis en elementos traza metálicos, reunió resultados para más de 73000 muestras y puede, en cierta medida, responder a estas demandas. Pero se plantean diferentes preguntas previas: ¿sobre cuales territorios se puede establecer estadísticas, donde y como fijar umbrales? Estas repuestas estarán inevitablemente locales ya que un contenido elevado medido en un suelo puede ser natural para este suelo y resultar de una contaminación para otro. Se utilizó la región centro (análisis colectados para 5913 horizontes arados) en este estudio para ilustrar el enfoque que consiste en el establecimiento de estadísticas por regiones agrícolas (con condición que el numero de análisis disponibles estará jugado suficiente). Estos territorios parecen estar los más pertinentes del punto de vista de su homogeneidad geológica y pedológica y pueden entonces servir de territorios de referencia. Después, afín de saber si los valores medidos en el sitio estudiado están de origen natural o antrópico (lo que implica a priori peligros diferentes), un estudio geológico y pedológico local así que los antecedentes de las fuentes de contaminación potenciales vendrán afinar el diagnostico.

Palabras clave

Elementos traza, suelos, IEM, valores de referencia, región Centro.

En février 2007, le Ministère en charge de l'écologie a modifié sa politique de gestion des sites et sols potentiellement pollués. Les lignes directrices comportent désormais la démarche d'interprétation de l'état des milieux (IEM). Afin de « *distinguer les situations qui ne posent pas de problème particulier de celles qui sont susceptibles d'en poser et donc de faire l'objet de mesures de gestion appropriées* », cette démarche nécessite de comparer « *l'état des milieux (c'est-à-dire l'état des sols et des eaux du site industriel faisant l'objet de l'étude) à l'état des milieux naturels voisins de la zone d'investigation...* ». Malheureusement, en contexte industriel ou péri-urbain, il est bien difficile de trouver des « sols naturels » situés à proximité et pédologiquement similaires. D'où, le plus souvent, la tendance à se référer à des sols considérés comme relativement peu contaminés: les sols agricoles les plus proches.

Dans ce nouveau cadre, les bureaux d'études cherchent donc à se procurer des données relatives aux concentrations en éléments traces mesurées dans les sols qu'ils appellent soit « fond géochimique » soit « valeurs de bruit de fond ». Ces informations sont recherchées afin de servir de valeurs de référence locales. Par ailleurs, les services santé-environnement des Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS) sont souvent sollicités à propos de la reconversion d'anciens sites industriels en projets d'aménagements urbains (écoles, lotissements). La gestion de ces projets passe par un diagnostic de l'état de contamination du site, notamment par les éléments en traces métalliques (ETM) et non métalliques (par ex. l'arsenic) et la comparaison des concentrations mesurées dans ces sols à des valeurs de référence. En France, en l'absence d'études locales approfondies, tous les experts s'accordent sur la nécessité d'établir des référentiels à partir des concentrations usuelles dans les sols, appelées communément « bruit de fond »¹.

A la demande de la Cellule Interrégionale d'Épidémiologie d'Île de France, un premier travail a été réalisé à partir des données d'une première collecte nationale réalisée en 1998, pour les 4 grands départements agricoles franciliens (1031 sites analysés) et pour les 6 départements de la région Centre (1358 sites analysés). Les résultats ont fait l'objet d'un article (Mathieu *et al.*, 2008) qui fait le point sur la démarche utilisée mais présente surtout de façon détaillée des recommandations pour l'utilisation de ces « seuils de sélection de substances » dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires comme dans celui de l'« interprétation de l'état des milieux ».

Dans ce premier article, était déjà envisagée la possibilité de stratifier les données disponibles par régions agricoles et non par départements ou régions administratives, afin de constituer des référentiels locaux plus précis.

Quoique recouvrant encore des types de sols variés, développés dans des matériaux parentaux divers, les « régions agricoles » (RA) sont des territoires beaucoup plus homogènes aux plans géologique et pédologique que les découpages administratifs que sont les départements et les régions. A partir du moment où l'on dispose d'un nombre suffisant de sites analysés, ces RA peuvent constituer un cadre privilégié pour établir des statistiques utilisables.

Le présent article s'appuie sur le traitement de données numériques récoltées lors de la 2^e collecte nationale financée par l'ADEME et menée au cours de l'année 2009 (Duigou et Baize, 2010). Il a comme objectif général de montrer comment on peut utiliser ces données de manière très simple afin de fournir des valeurs de référence locales de concentrations en ETM. Il fournit également des éléments de réponse à des questions comme « j'ai dosé 80 mg de plomb par kilogramme dans un échantillon de sol. Celui-ci est-il pollué ? ».

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Géologie de la région Centre

La composition chimique initiale d'un sol est héritée du matériau parental duquel il est issu. Une connaissance de la géologie locale est de ce fait indispensable. La région Centre est assez variée au point de vue lithologique (*figure 1*) et donc pédologique. Y sont observés des affleurements :

- de roches métamorphiques (gneiss, micaschistes, amphibolites) et granites en ce qui concerne les marges nord du Massif central lesquelles constituent une partie du Boischaud du Sud ;
- de roches sédimentaires marines (marnes, calcaires, craies, tuffeau), lacustres (calcaire de Beauce, mollasse du Gâtinais) ou détritiques sablo-argileuses (Trias du Boischaud du Sud, Éocène de Brenne, épandages burdigaliens de Sologne et de la forêt d'Orléans) ;
- de limons éoliens quaternaires des plateaux (Boischaud du Nord, Gâtine Tourangelle, Beauce, Faux Perche) ;
- et des dépôts fluviaux : alluvions modernes, terrasses de la Loire, etc.

A la différence de la région Ile-de-France (Mathieu *et al.*, 2008), il existe des anomalies pédogéochimiques, localisées pour la plupart au contact entre roches magmatiques et métamorphiques du Massif central et couches sédimentaires du Trias et du Jurassique inférieur, dans la région de La Châtre, au sud des départements de l'Indre et du Cher (Baize et Tomassone, 2003). Peuvent être citées des minéralisations en Zn, Pb, Cd, As dans des micaschistes, d'autres en lien avec des calcaires hettangiens et d'autres enfin jalonnant le tracé de failles. Une autre anomalie naturelle et couvrant de vastes superficies, a été repérée depuis longtemps en Champagne berrichonne, associée à certains niveaux des calcaires jurassiques oxfor-

¹ Malheureusement, cette notion de « bruit de fond » n'est pas claire (Baize, 2009).

diens et relative uniquement au cadmium (Baize *et al.*, 1999; Baize *et al.*, 2006b).

Données analytiques disponibles - Origine, nombre et répartition

La nouvelle collecte nationale de 2009 (Duigou et Baize, 2010) a permis de rassembler des teneurs totales ou pseudo-totales en sept éléments traces métalliques (cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc) pour 5913 sites. Il s'agit d'analyses faites, pour la plupart, dans le cadre de plans d'épandages de boues d'épuration, sur des échantillons prélevés dans l'horizon de surface de sols destinés à recevoir des épandages. En outre, plus d'une centaine d'analyses ont été empruntées à une étude scientifique réalisée dans la région de La Châtre dans le cadre du programme Gessol I (Itard *et al.*, 2003; Baize et Tomassone, 2003). Ces 133 sites analysés sont tous situés dans la partie sud-est du Boischaud du Sud.

Rappelons que deux méthodes normalisées sont couramment utilisées dans les laboratoires français pour mettre en solution les éléments traces métalliques avant leur dosage :

- la première alliant l'acide fluorhydrique (HF) à l'acide perchlorique (HClO_4) selon la norme NF X 31147 de juillet 1996 = teneurs totales;
- la seconde, dite « à l'eau régale » (ER), associant l'acide nitrique (HNO_3) à l'acide chlorhydrique (HCl), suivant la norme NF ISO 11466 de juin 1995 = teneurs pseudo-totales.

Dans la base de données utilisée pour la région Centre, il y a 3688 sites pour lesquels l'eau régale a été utilisée et 1724 sites dont on sait que l'acide fluorhydrique a été employé. Un doute subsiste pour les 501 autres sites. Dans un premier temps, par souci de simplification, toutes ces données ont été traitées ensemble: il n'y a eu aucune distinction ni traitements séparés. Dans un deuxième temps, nous nous sommes interrogés sur la pertinence de cette option et avons étudié l'influence de la méthode de mise en solution sur les valeurs des indicateurs statistiques (voir ci-après).

Ce jeu de données n'a pas bénéficié d'une véritable stratégie d'échantillonnage unifiée car il résulte d'une collecte de résultats d'analyses correspondant à des échantillons prélevés par de nombreux opérateurs différents. En outre, il est clair que cet échantillonnage ne représente pas fidèlement l'ensemble des sols du territoire régional. En effet, de nombreuses parcelles ont été d'emblée écartées d'un éventuel épandage pour des raisons de situation (pentes trop fortes, vallées) ou d'occupation des sols (forêts, prairies) ou bien pour des raisons pédologiques (sols jugés inaptés à l'épandage de boues). Mais les échantillons ainsi collectés représentent probablement assez bien les sols de grandes cultures des secteurs où ils ont été prélevés.

De manière générale, les sites analysés ne proviennent pas de zones fortement urbanisées ou de secteurs industriels.

Enfin, aucun tri n'a pu être opéré par rapport au caractère « habituel » (cf. notion de « teneur agricole habituelle ») ou au contraire « anormale » (notion d'anomalie naturelle forte) ou nettement contaminé, des teneurs mesurées.

Cette base de données a déjà été traitée de manière à éliminer les doublons, supprimer les erreurs les plus évidentes et prendre en compte un certain nombre de valeurs exprimées par le laboratoire d'analyse sous la forme « inférieur au seuil de quantification ». De telles valeurs ont été remplacées par une valeur numérique de façon à pouvoir être prises en compte dans les traitements.

Par exemple: Cd < 0,10 mg/kg a été remplacé par 0,09 mg/kg. Ces valeurs étant très inférieures aux médianes nationales (0,28 mg/kg) et régionales (0,22 mg/kg), ces remplacements ne changent rien au calcul des médianes, des quartiles et des centiles P90 et P95.

En revanche, Cd < 0,30 ou Cd < 0,50 mg/kg constituaient des informations inutilisables, de même que Hg < 0,30 mg/kg. De telles informations ont été considérées comme des valeurs manquantes.

La localisation d'une grande majorité de sites (n = 4461) est connue avec précision grâce à leurs coordonnées géographiques. Pour d'autres (n = 1432), nous ne connaissons que la commune où ils se situent. Enfin vingt sites ne sont localisés que par leur département. Tous ces sites ont été utilisés pour établir des statistiques régionales (tableau 2) mais seuls ceux positionnés avec précision figurent sur les cartes des figures 3A à 3F. À noter que la répartition géographique des sites analysés demeure irrégulière comme on peut le voir sur la figure 2.

Indice de densité du recueil de l'information (IDRI)

L'IDRI est un ratio permettant d'évaluer la densité d'information disponible sur un territoire. Les quantités d'information de deux territoires dont la superficie et le nombre de sites collectés sont très différents peuvent ainsi être comparés.

IDRI = nombre de sites analysés / surface du territoire en $\text{km}^2 \times 100$

Nous obtenons ainsi un nombre moyen de sites pour 100 km^2 du territoire étudié.

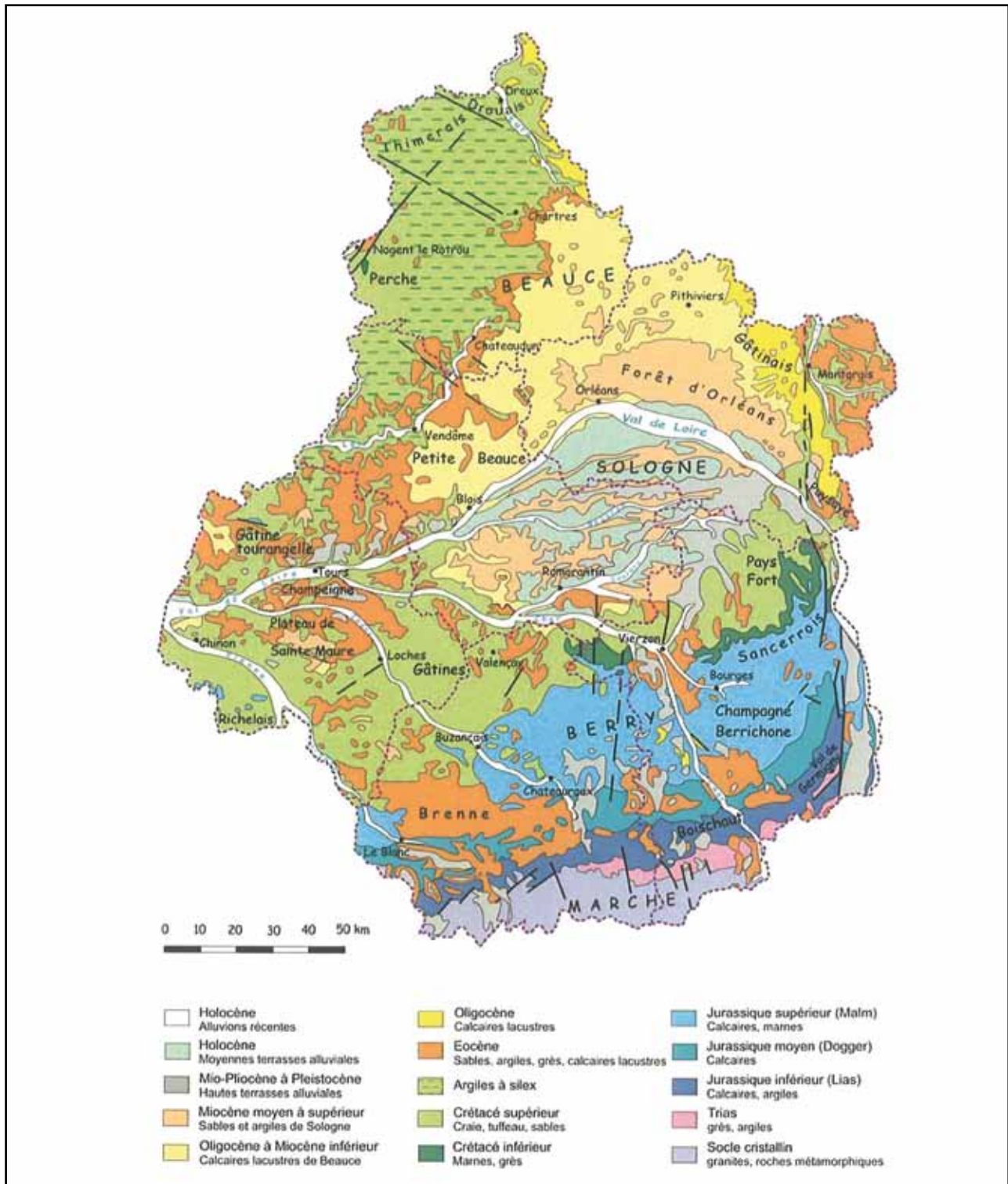
Indicateurs statistiques - Recherche des anomalies - Notion d'outlier

Différents outils de statistiques descriptives ont été utilisés afin de mieux connaître la structure des populations de concentrations en ETM étudiées. Les indicateurs statistiques suivants ont été déterminés systématiquement :

La médiane est un indicateur statistique très robuste, complètement insensible à l'existence d'un nombre limité de valeurs anormales très élevées soit naturelles soit liées à des hot spots de pollution, ou bien encore correspondant à des erreurs grossières. Elle reste toujours utilisable lorsque un certain

Figure 1: Esquisse géologique simplifiée de la région Centre (D. Vaslet, BRGM, 2001).

Figure 1: Geological sketch of the region Centre.



1 ^{er} décile	(P 10)) distance interquartile (DIQ) (cet intervalle comprend 50 % des valeurs)
1 ^{er} quartile	(P 25)	
Médiane	(P 50)	
3 ^e quartile	(P 75)	
9 ^e décile	(P 90)	
Centile 95	(P 95)	

nombre de dosages se trouvent inférieurs au seuil de quantification, ce qui n'est pas le cas de la moyenne.

Définition des anomalies - les valeurs outliers

La méthode *Exploratory Data Analysis* selon Tukey (1977) a été utilisée. Elle est très simple et ne repose pas sur des hy-

pothèses de normalité mais uniquement sur la structure inhérente des données traitées. Elle présente plusieurs avantages majeurs, par exemple la description claire de l'étendue et de la dissymétrie des données et une identification objective des valeurs anormales. La distance interquartile (DIQ) est définie comme la différence arithmétique entre valeurs des 1^{er} et 3^e quartiles.

En ajoutant 1,5 fois la DIQ à la valeur du 3^e quartile, on définit la vibrisse supérieure (*upper whisker*)². Toutes les valeurs supérieures à la vibrisse supérieure sont définies comme *outliers* supérieurs (*upper outliers*).

Un *outlier* est donc une valeur définie statistiquement comme « anormale » par rapport à une certaine population et uniquement par rapport à la structure de cette population. Ainsi, une valeur qui s'avère *outlier* par rapport à la population

Tableau 1 : Présentation des 32 régions agricoles de la région Centre.

Dans ce tableau sont indiqués successivement : - le numéro national INSEE ; - la présence dans un ou plusieurs des six départements ; - le nombre de sites analysés ; - la superficie en km² ; - la valeur de l'IDRI.

Table 1: The 32 « agricultural districts » of the region Centre.

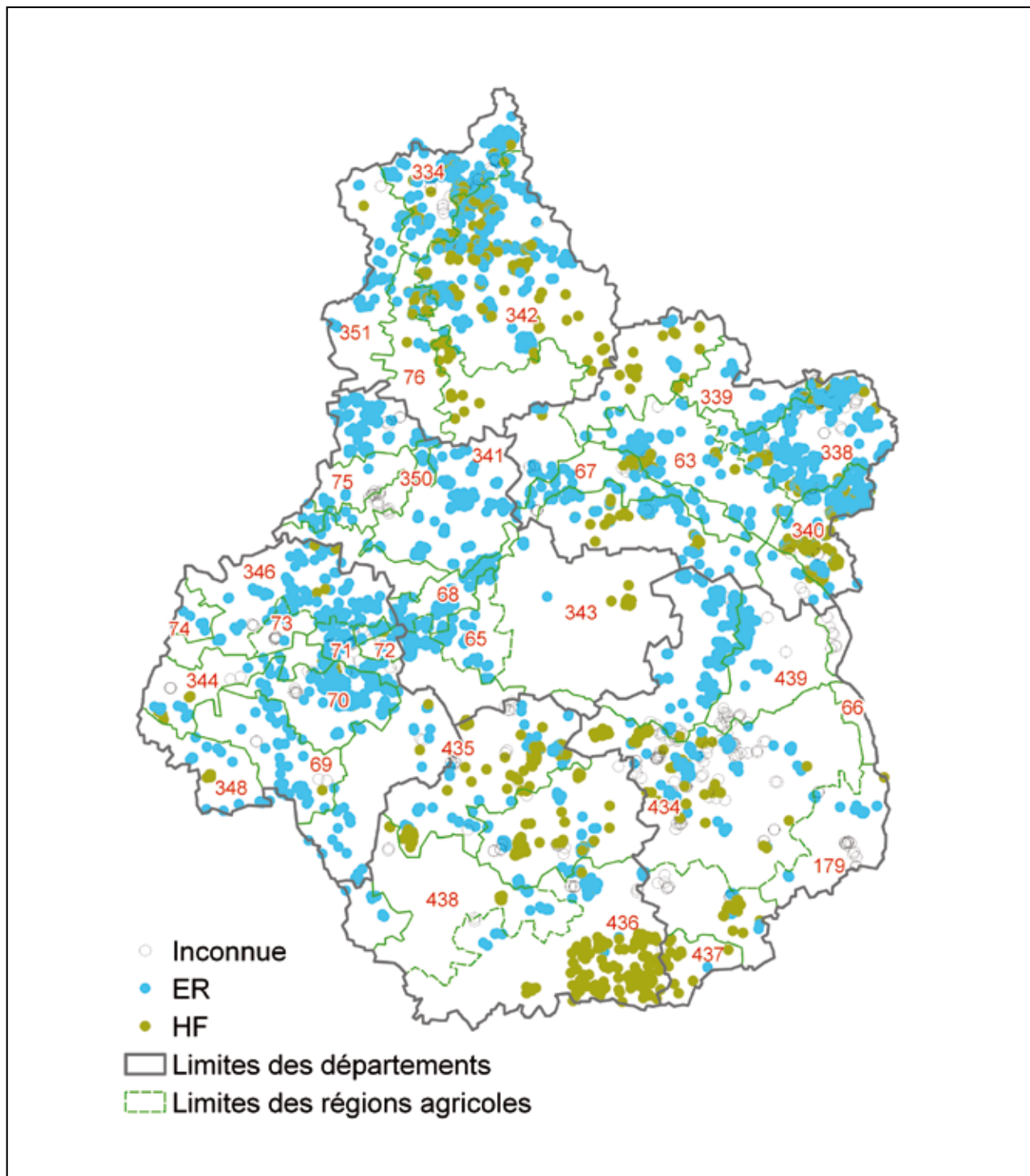
In this table, are indicated successively : - an identification number according to INSEE ; - the presence in one or several among the six « départements » ; - the number of analyzed sites ; - the area in km² ; - the value of IDRI.

	N°	18	28	36	37	41	45	Nb sites	Surf. Km ²	IDRI	Statistiques ?
BAS BERRY	437	x						18	343	5,2	Non
BASSIN de SAVIGNÉ	74				x			6	164	3,7	Non
BEAUCE	342		x				x	924	3455	26,7	
BEAUCE DUNOISE	341		x			x	x	167	2481	6,7	
BOISCHAUT du NORD	435			x	x	x		316	3538	8,9	
BOISCHAUT du SUD	436	x		x				259	3028	8,6	
BRANDES et BRENNÉ	438			x				31	1473	2,1	Non
CHAMPAGNE BERRICHONNE	434	x		x		x		408	4468	9,1	
CHAMPEIGNE	70				x			393	777	50,6	
DROUAIS	334		x					399	911	43,8	
FAUX PERCHE	76		x					73	704	10,4	
FORET D'AMBOISE	72				x			11	97	11,3	Non
GÂTINAIS PAUVRE	338						x	437	1217	35,9	
GÂTINAIS RICHE	339						x	42	541	7,8	
GÂTINE TOURANGELLE	346				x	x		360	1734	20,8	
ORLÉANAIS	63						x	135	1114	12,1	
PERCHE	351		x			x		161	1412	11,4	
PERCHE VENDOMOIS	75					x		9	357	2,5	Non
PLAINE de LOUDUN, RICHELIEU et CHATELL.	348				x			20	542	3,7	Non
PLATEAU de METTRAY	73				x			22	182	12,1	
PUISAYE	340						x	649	633	102,5	
RÉGION de SAINTE-MAURE	69				x			56	865	6,5	
RÉGION VITICOLE à l'EST de TOURS	71				x			83	232	35,8	
SANCERROIS	439	x					x	116	1268	9,1	
SOLOGNE	343	x				x	x	390	4481	8,7	
SOLOGNE VITICOLE	65					x		51	419	12,2	
VAL de LOIRE (Anjou et Touraine)	344				x			77	692	11,1	
VAL de LOIRE (Cher)	66	x						7	254	2,8	Non
VAL de LOIRE (Loiret)	67						x	77	627	12,3	
VALLÉE de GERMIGNY	179	x						41	859	4,8	
VALLÉE du LOIR	350					x		31	321	9,7	
VALLÉE et COTEAUX de la LOIRE	68					x		123	358	34,4	

² Il existe également une vibrisse supérieure calculée avec 3 fois la distance interquartile. La définition de valeurs outliers de cette façon a été testée notamment par Villanneau et al., 2008

Figure 2: Répartition des sites par rapport aux régions agricoles et aux départements. La couleur des points précise la méthode de mise en solution (HF ou ER). Les numéros sont ceux de la numérotation nationale INSEE. La correspondance entre ces numéros et le nom des régions agricoles figure au tableau 1.

Figure 2: Site distribution in relation to agricultural districts and «départements». The colour of the points indicates the digestion method used (HF or ER = aqua regia). The numbers are those of the numbering by INSEE. The correspondence between these numbers and the names of «agricultural districts» is given at table 1.



des valeurs obtenues dans un département, n'est pas forcément *outlier* par rapport à la population constituée par l'ensemble des données collectées au plan national.

Valeurs excédentaires (VE)

Est dite « valeur excédentaire », toute concentration en ETM excédant les valeurs limites « sols » de la réglementation française sur l'épandage des boues d'épuration sur les sols agricoles (arrêté du 8 janvier 1998). Par exemple, une teneur en cadmium > 2,0 mg/kg ou une teneur en zinc > 300 mg/kg. Ces valeurs limites, purement réglementaires, ont souvent été utilisées comme « valeurs de référence » nationales (faute d'autre chose) mais, en réalité, elles ne constituent en aucune manière des seuils permettant de distinguer un sol pollué d'un sol non pollué.

Découpages territoriaux possibles Intérêt des régions agricoles

Indépendamment du découpage de l'espace en territoires purement administratifs (départements, régions), il existe d'autres modes de découpage de l'espace selon différents critères, eux-mêmes liés à d'autres préoccupations : les régions agricoles, les régions forestières départementales (IFN, 2002), les petites régions naturelles...

Les régions agricoles (RA) servent de base aux statistiques agricoles (INSEE et SCEES, 1983). Elles sont censées constituer des zones homogènes tant par la « nature des sols » que pour les conditions climatiques et la vocation dominante des exploitations agricoles. L'hétérogénéité de la géologie et des sols pour chaque RA peut être encore assez grande mais beaucoup moins qu'au sein d'un département, et, *a fortiori*, d'une région administrative. On notera qu'elles sont souvent trans-départementales, c'est-à-dire qu'elles peuvent s'étendre sur deux voire trois ou quatre départements.

Même si leur délimitation peut être contestée ici ou là (par exemple le Boischaud du Sud de l'Indre qui est vraiment fort hétérogène en ce qui concerne le milieu physique - Moulin *et al.*, 1998), les RA présentent l'avantage de respecter les limites communales. Il en résulte que si l'on sait dans quelle commune un prélèvement se situe, on peut l'affecter automatiquement à une RA et à une seule. Cette particularité ne se retrouve ni pour les régions forestières, ni pour les petites régions naturelles.

Les régions agricoles de la région Centre - Sélection en fonction de l'IDRI

La région Centre contient ou recoupe 32 régions agricoles (*tableau 1*). On notera en effet que certaines d'entre elles se prolongent plus ou moins largement en dehors des limites de la région administrative. C'est le cas, par exemple, de la

Beauce, des deux Gâtinais, du Perche, de la Puisaye, etc. Nous n'avons pris en compte que les sites localisés à l'intérieur des frontières de la région administrative Centre.

Pour six régions agricoles, nous disposons de moins de 21 sites analysés, ce qui nous a paru insuffisant pour réaliser des statistiques utilisables. Une autre région agricole (Brandes et Brenne) a été également éliminée des traitements parce que son IDRI était égal à 2,1 sites en moyenne pour 100 km², densité qui nous a semblé également insuffisante. Les sept régions agricoles éliminées sur ces critères sont surlignées en gris.

RÉSULTATS

Statistiques sommaires pour l'ensemble de la région

Le *tableau 2* présente les résultats obtenus sur l'ensemble de la région.

Les indicateurs statistiques régionaux (P10 - P25 - médianes - P75 et P 90) sont inférieurs ou très inférieurs à leurs équivalents nationaux sauf pour le plomb où ils sont identiques ou très proches (Duigou et Baize, 2010). Les valeurs des vibrisses supérieures sont, elles aussi, inférieures ou très inférieures aux valeurs des vibrisses nationales. Ceci indique que, dans son ensemble, la région Centre est un territoire où les fonds pédogéochimiques naturels sont de bas niveaux et/ou les contaminations anthropiques sont absentes ou peu fréquentes.

La valeur P95 régionale est supérieure à la vibrisse régionale pour Cd, Cu, Hg ce qui veut dire qu'il y a plus de 5 % de valeurs outliers sur cette population.

En revanche, il y a peu de « valeurs excédentaires » : de 6 à 30 selon le métal, soit beaucoup moins de 1 % des valeurs disponibles.

Statistiques sommaires pour les six départements

Ces statistiques ont été faites pour les six départements de la région Centre selon les mêmes principes que pour la région prise dans son ensemble (*cf. tableau 2*).

Les résultats (non présentés dans leur totalité) montrent qu'il y a des différences entre les départements. Quelques unes apparaissent au *tableau 3*, par exemple la valeur P95 de l'Indre pour le plomb qui est plus de deux fois supérieure au P95 du Loir-et-Cher ou de l'Eure-et-Loir.

Tableau 2: Indicateurs statistiques pour la région Centre. Concentrations exprimées en mg/kg.**Table 2:** Statistical indicators for the region Centre. Concentrations expressed as mg/kg.

Région Centre	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Nombre de valeurs	5528	5850	5850	4795	5835	5893	5887

P10	0,10	15,1	4,2	0,02	5,4	12,9	20,0
1 ^{er} quartile	0,15	24,3	6,3	0,03	8,9	16,8	29,7
Médiane	0,22	35,0	9,1	0,04	14,4	22,0	40,5
3 ^e quartile	0,31	46,0	12,6	0,06	22,2	27,6	52,4
P90	0,44	58,9	16,9	0,08	29,4	34,4	68,2
P95	0,59	70,0	23,8	0,12	34,2	39,3	84,3
Maximum	8,90	2262,0	436,4	11,60	1333,4	1750,0	828,3
Distance interquartile	0,16	21,7	6,4	0,03	13,3	10,8	22,7
Vibrisse supérieure	0,55	78,6	22,2	0,10	42,1	43,8	86,5
Nb d'outliers supérieurs	313	167	339	300	93	176	255
	5,7%	2,9%	5,8%	6,3%	1,7%	3,0%	4,4%

Seuils réglementation *	2	150	100	1	50	100	300
Nb valeurs excédentaires	13	12	30	6	35	24	17
	0,2%	0,2%	0,5%	0,1%	0,6%	0,4%	0,3%

* Seuils de la réglementation relative à l'épandage des boues d'épuration sur les sols agricoles (arrêté du 8 janvier 1998).

Tableau 3: Comparaison des P 90 - P 95 et vibrisses supérieures du plomb et du cadmium pour différents territoires. Concentrations exprimées en mg/kg.**Table 3:** Comparison of P 90 - P 95 and upper whiskers for lead and cadmium in different territories. Concentrations expressed as mg/kg.

Pb	Cd		
	P 90	P 95	VS
Région Centre	34,4	39,3	43,8
Cher	34,7	39,9	54,0
Eure et Loir	27,5	31,0	34,5
Indre	45,9	72,9	51,7
Indre et Loire	34,8	40,9	42,0
Loir et Cher	28,6	33,4	37,4
Loiret	35,2	38,9	50,6
Beauce	28,6	33,0	36,1
Sologne	30,7	35,8	40,3
Puisaye	35,4	37,8	51,0
Drouais	28,0	31,7	33,4
Boischaut du nord	30,6	33,8	41,5
Champagne berrichonne	38,3	41,1	47,8
Boischaut du sud	80,0	151,0	79,5

Cd	Pb		
	P 90	P 95	VS
Région Centre	0,44	0,59	0,55
Cher	0,66	0,89	0,74
Eure et Loir	0,42	0,49	0,49
Indre	0,65	0,81	0,75
Indre et Loire	0,42	0,58	0,52
Loir et Cher	0,36	0,40	0,56
Loiret	0,38	0,46	0,52
Beauce	0,37	0,44	0,45
Sologne	0,20	0,29	0,21
Puisaye	0,33	0,41	0,39
Drouais	0,49	0,63	0,66
Boischaut du nord	0,30	0,37	0,36
Champagne berrichonne	0,81	0,95	1,20
Boischaut du sud	0,70	0,98	0,63

Figure 3A: Localisation des valeurs outliers régionales - Cadmium.
Figure 3A: Location of outlier values at regional scale - Cadmium.

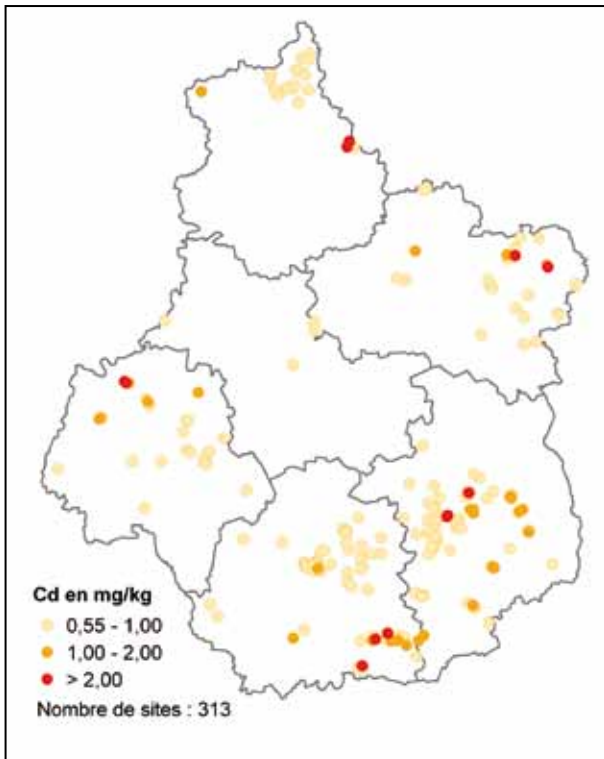
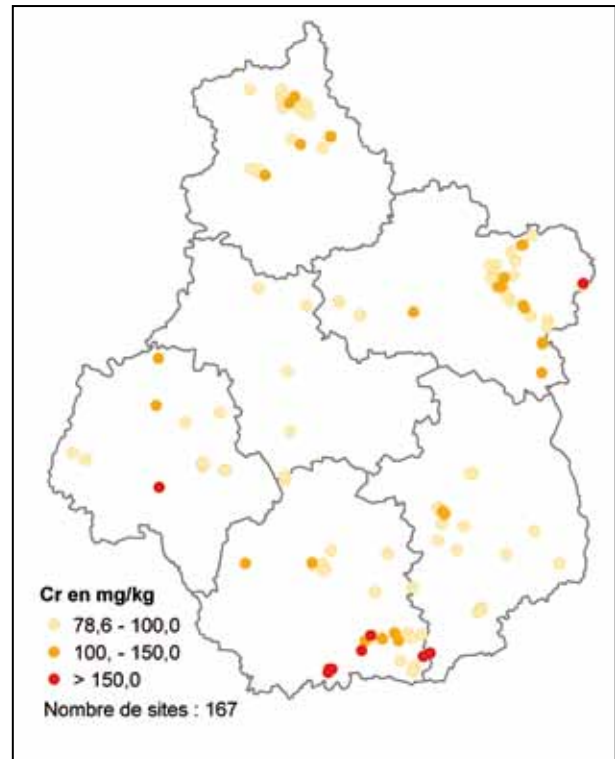


Figure 3B: Localisation des valeurs outliers régionales - Chrome.
Figure 3B: Location of outlier values at regional scale - Chromium.



Statistiques sommaires pour les 25 régions agricoles retenues

Les indicateurs statistiques des 25 régions agricoles retenues (présentés partiellement au tableau 4) suscitent de notre part les remarques suivantes.

Certaines régions agricoles montrent des indicateurs statistiques toujours beaucoup plus faibles que les autres, notamment les médianes et les quartiles. Il s'agit de régions :

- aux sols sableux (au moins en surface) : Sologne, Sancerrois ;
- aux sols majoritairement limoneux (au moins en surface) : Boischaud du Nord, Faux Perche, Gâtine Tourangelle... ;

-... mais aussi du Perche, de la Puisaye, de l'Orléanais où affleurent largement des sédiments marins argileux ou sableux.

Inversement, quelques RA se singularisent par des indicateurs statistiques (médianes - P75 - P 90 et P 95) beaucoup plus élevés que pour les autres et plus élevés que leurs correspondants à l'échelon régional :

- la Champagne Berrichonne pour le cadmium, le chrome et le zinc ;
- le Boischaud du Sud pour le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb et le zinc ;

- la Sologne Viticole, la Région viticole à l'est de Tours, la Vallée et coteaux de la Loire, la Vallée du Loir pour le cuivre, mais seulement pour les valeurs de P90 et P95 ; ces centiles élevés sont sans nul doute à relier à l'existence de vignobles et/ou à une ancienne activité d'arboriculture fruitière (Baize *et al.*, 2006a).

Les contrastes entre régions agricoles sont surtout nets pour le chrome et le nickel, deux métaux traces d'origine exclusivement naturelle. Pour ces deux métaux, les valeurs les plus élevées (tableau 4) sont liées à la nature des sols dont les horizons de surface sont argilo-limoneux, argileux voire argileux lourds (Champagne berrichonne, Gâtinais riche). Le cas du Boischaud du Sud est un cas particulier qui sera évoqué ci-après.

Localisation des outliers régionaux

Les outliers régionaux pour un métal donné sont les teneurs en ce métal supérieures à la vibrisse supérieure régionale. Leur identification et leur localisation apportent une vision spatiale des zones anomaliques au niveau régional, que ces anomalies aient une origine anthropique ou naturelle.

Les cartogrammes des figures 3A à 3F présentent la localisation des outliers régionaux pour les six principaux métaux.

Figure 3C: Localisation des valeurs outliers régionales - Cuivre.
Figure 3C: Location of outlier values at regional scale - Copper.

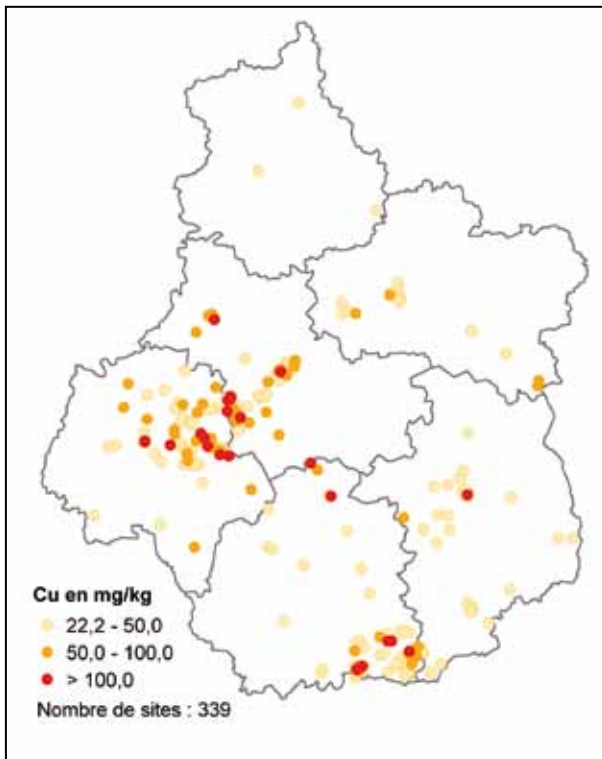
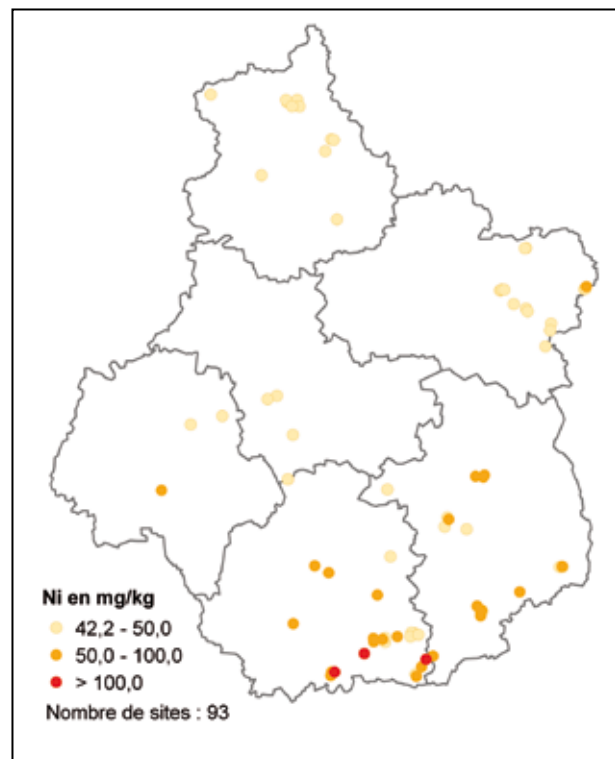


Figure 3D: Localisation des valeurs outliers régionales - Nickel.
Figure 3D: Location of outlier values at regional scale - Nickel.



Remarque: un certain nombre de sites sont connus uniquement par la commune où ils se localisent et non par leurs coordonnées précises. Les valeurs de ces sites ne figurent donc pas sur les cartogrammes.

Autre remarque: les niveaux de valeur des vibrisses supérieures ne sont pas très élevés en valeur absolue. En d'autres termes, certaines valeurs outliers sont encore relativement basses: par exemple Cd = 0,58 mg/kg, Cr = 80 mg/kg, Pb = 45 mg/kg ou Zn = 90 mg/kg.

La *figure 3A* montre que 124 sur les 313 valeurs outliers du cadmium (Cd > 0,55 mg/kg) se localisent sur l'ensemble de la Champagne berrichonne. En outre, un certain nombre d'entre elles sont observées dans une partie du Boischaud du Sud (n = 34) correspondant surtout à la zone d'affleurement des sédiments liasiques (Baize et Tomassone, 2003). Une cinquantaine de valeurs outliers (toutes < 1 mg/kg) se localisent dans le nord de l'Eure et Loir (Drouais et Beauce). Ces valeurs pourraient résulter d'épandages anciens de boues d'épuration car on ne se trouve pas bien loin de la station d'Achères qui traite longtemps de la totalité des eaux usées de l'agglomération parisienne.

Les 167 valeurs outliers pour le chrome (Cr > 78,6 mg/kg) se concentrent dans quatre secteurs (*figure 3B*): - en Beauce

entre Chartres et Dreux (raison inconnue); - selon une bande courbe, à l'est du Loiret; - en Champagne berrichonne (Indre et Cher) où les sols sont le plus souvent argileux, rougeâtres et riches en fer; - dans certaines parties du Boischaud du Sud, correspondant à des sols issus d'amphibolites et à certains sols développés sur roches liasiques (Baize et Tomassone, 2003).

La répartition des 339 outliers pour le cuivre (Cu > 22,2 mg/kg) n'est pas aléatoire (*figure 3C*). Plus d'une centaine jalonnent le tracé du val de Loire (au sens large) et de ses coteaux depuis Orléans jusqu'en aval de Tours. Toute une série de valeurs outliers correspondent également à deux secteurs du Boischaud du Sud: la zone de roches métamorphiques (où existent des sols issus d'amphibolites) et des sols développés à partir de roches liasiques minéralisées (Baize et Tomassone, 2003).

Les outliers pour le nickel (Ni > 42,1 mg/kg) s'éparpillent un peu partout et rares sont les valeurs excédant le seuil réglementaire de 50 mg/kg (*figure 3D*). 26 valeurs outliers se trouvent en Boischaud du Sud, correspondant soit à des sols issus d'amphibolites soit à des sols riches en fer développés sur des roches liasiques (Baize et Tomassone, 2003).

Sur la *figure 3E* on voit que 70 parmi les 176 outliers pour le plomb (Pb > 43,8 mg/kg) se concentrent sur l'ensemble du ter-

Figure 3E: Localisation des valeurs outliers régionales - Plomb
Figure 3E: Location of outlier values at regional scale - Lead.

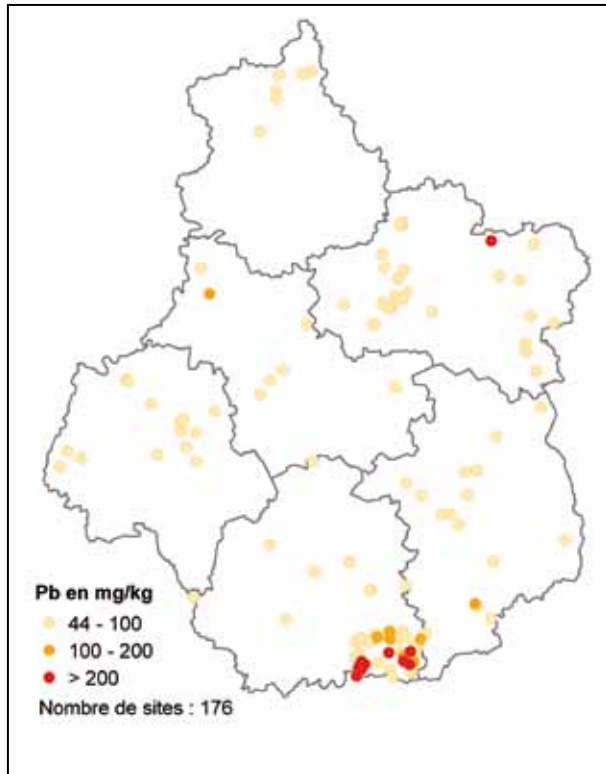
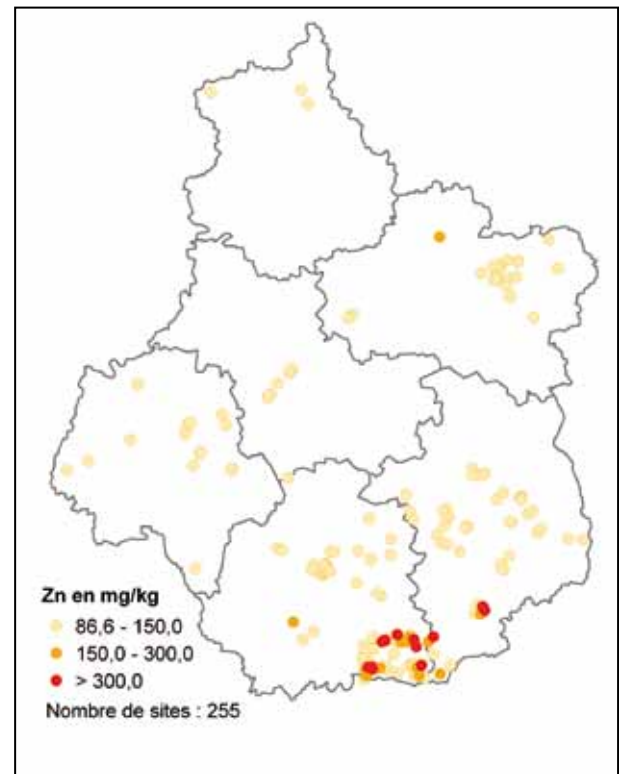


Figure 3F: Localisation des valeurs outliers régionales - Zinc
Figure 3F: Location of outlier values at regional scale - Zinc.



ritoire de la feuille à 1/50000 de l'IGN La Châtre, qu'il s'agisse de la zone de roches métamorphiques et des granites, de la zone d'affleurements de Trias détritique ou de la zone des roches sédimentaires du Lias. Au nord d'Orléans, 4 valeurs outliers très rapprochées correspondent à l'impact d'une usine retraitant du plomb (Baize, 2002).

Les 255 outliers du zinc ($Zn > 86,5$ mg/kg) se concentrent essentiellement dans deux secteurs (*figure 3F*): - sur tout le territoire de la Champagne berrichonne, (76 d'entre eux); - sur le secteur étudié dans le cadre du programme Gessol I (Itard *et al.*, 2003; Baize et Tomassone, 2003), en l'occurrence les environs de La Châtre, quel que soit le type de roche. C'est dans ce secteur que l'on observe les concentrations en zinc les plus élevées, supérieures à 150 mg/kg, voire supérieures à 300 mg/kg.

Sur quels territoires travailler?

Les statistiques départementales montrent quelques différences qui transparaissent à travers les indicateurs statistiques, mais les RA sont beaucoup plus contrastées les unes par rapport aux autres. Ces contrastes résultent principalement de la lithologie des roches et de l'histoire géologique,

puis pédogénétique (Baize, 2008). Localement, elles peuvent être fonction d'activités industrielles ou de pratiques agricoles (épandage de boues d'épuration).

C'est pourquoi il paraît plus pertinent de travailler par régions agricoles, territoires que nous considérons comme plus homogènes que les entités administratives et qui s'avèrent plus typés en ce qui concerne les teneurs en ETM.

UTILISATION DES INDICATEURS STATISTIQUES COMME VALEURS DE RÉFÉRENCE

Il existe de nombreux estimateurs utilisés pour déterminer un seuil dans une distribution statistique de concentration d'éléments dans les sols.

Dans l'étude réalisée en 2007 (Mathieu *et al.*, 2008), l'objectif était de choisir « objectivement » un seuil de concentration pour chaque métal au-delà duquel on a tout lieu de croire que le site a subi un impact anthropique important. En conséquence de quoi, l'élément chimique en question est pris en compte dans l'estimation d'un risque sanitaire pour les rive-

Tableau 4: Indicateurs statistiques du cadmium et du chrome pour les 25 régions agricoles. Concentrations exprimées en mg/kg.
Table 4: Statistical indicators of cadmium and chromium for the 25 «agricultural districts». Concentrations expressed as mg/kg.

Région Agricole	Cd					Cr								
	Nb valeurs disp	P25	Mediane	P75	P90	P95	VS	Nb valeurs disp	P25	Mediane	P75	P90	P95	VS
RÉGION CENTRE		0,15	0,22	0,31	0,44	0,59	0,55		24,3	35,0	46,0	59,0	70,0	78,6
BEAUCE	923	0,23	0,28	0,32	0,37	0,44	0,45	902	33,5	42,0	49,9	58,6	65,0	74,4
BEAUCE DUNOISE	160	0,20	0,26	0,31	0,37	0,41	0,48	167	34,3	39,7	45,1	49,0	55,5	61,4
BOISCHAUT DU NORD	261	0,11	0,17	0,21	0,30	0,37	0,36	314	22,4	31,0	38,2	46,9	54,3	61,9
BOISCHAUT DU SUD	239	0,18	0,25	0,36	0,70	0,98	0,63	259	25,1	37,6	58,9	80,0	96,0	109,7
CHAMPAGNE BERRICHONNE	397	0,23	0,40	0,62	0,81	0,95	1,20	394	34,2	48,5	62,3	73,9	81,6	104,5
CHAMPEIGNE	354	0,18	0,26	0,36	0,50	0,60	0,63	391	30,9	39,9	50,7	60,6	67,7	80,3
DROUAIS	398	0,23	0,30	0,40	0,49	0,63	0,66	397	32,4	40,8	49,5	56,8	69,3	75,2
FAUX PERCHE	73	0,19	0,23	0,26	0,30	0,32	0,37	73	30,0	39,1	45,3	53,5	58,0	68,3
GATINAIS PAUVRE	431	0,20	0,26	0,33	0,40	0,50	0,53	437	24,3	34,7	47,2	68,8	79,1	81,6
GATINAIS RICHE	42	0,21	0,26	0,36	0,40	0,41	0,59	42	34,4	42,4	65,5	78,3	81,9	112,0
GATINE TOURANGELLE	284	0,14	0,18	0,23	0,30	0,62	0,37	360	29,0	35,1	40,3	45,7	51,8	57,4
ORLEANAIS	113	0,09	0,14	0,22	0,39	0,50	0,42	135	9,6	14,7	26,0	47,9	56,5	50,7
PERCHE	161	0,11	0,13	0,17	0,23	0,30	0,26	161	22,9	27,7	34,9	41,7	47,5	53,0
PLATEAU DE METTRAY														
PUISAYE	626	0,14	0,18	0,24	0,33	0,41	0,39	22	24,6	39,3	42,5	50,5	52,0	69,4
REGION DE SAINTE-MAURE	56	0,15	0,20	0,24	0,35	0,46	0,39	649	21,1	28,5	38,7	48,5	55,7	65,2
REGION VITICOLE A L'EST DE TOURS	76	0,17	0,21	0,27	0,43	0,52	0,42	56	18,3	28,7	42,6	59,8	64,5	79,1
SANCERROIS	116	0,08	0,10	0,14	0,23	0,32	0,23	83	28,5	34,7	44,5	50,1	59,8	68,5
SOLOGNE	365	0,06	0,10	0,12	0,20	0,29	0,21	116	15,1	18,4	28,3	50,4	69,7	48,0
SOLOGNE VITICOLE	43	0,10	0,20	0,28	0,30	0,40	0,53	371	6,7	11,6	21,1	31,6	41,8	42,7
VAL DE LOIRE (ANJOU ET TOURAINE)	71	0,15	0,20	0,30	0,40	0,49	0,51	51	14,8	27,6	41,2	59,1	75,0	80,9
VAL DE LOIRE (LOIRET)	54	0,15	0,21	0,30	0,31	0,40	0,52	77	29,4	42,9	56,9	71,7	75,7	98,2
VALLÉE DE GERMIGNY	39	0,10	0,20	0,37	0,76	0,99	0,77	77	16,7	32,8	48,0	60,6	64,5	95,0
VALLÉE DU LOIR	31	0,10	0,16	0,20	0,30	0,35	0,35	41	26,4	43,1	54,2	68,5	74,3	96,0
VALLÉE ET COTEAUX DE LA LOIRE	77	0,17	0,23	0,30	0,40	0,40	0,50	31	24,8	28,1	30,2	36,7	37,6	38,1
								123	21,6	31,3	42,7	54,4	62,9	74,4

rains. C'est le centile 95 qui a été utilisé comme seuil dans le cadre de l'étude de 2007 mais ce choix ne reposait sur aucune justification scientifique et constituait plutôt un arrangement commode pour une gestion au quotidien.

De la même façon, pour obtenir des valeurs de référence régionales ou locales, on pourrait se positionner par rapport à un indicateur statistique simple. Nous avons le choix entre les P90, les P95, les P99 et les vibrisses supérieures. Pourquoi préférer l'un plutôt qu'un autre ? La vibrisse supérieure ne tient elle pas mieux compte de la vraie structure de la population étudiée, notamment de l'étalement de la distance interquartile alors qu'opter pour le centile 90 ou 95 signifie qu'on admet automatiquement 10 % ou 5 % de valeurs considérées comme anormales ? Nous laisserons les maîtres d'œuvre ou les institutions confronter leurs mesures aux indicateurs statistiques calculés par RA et choisir le seuil qu'ils jugeront le plus approprié en fonction de leurs préoccupations et de leur expertise.

L'étude des données stratifiées par RA permet d'identifier des valeurs de référence appropriées au cas considéré. Deux cas concrets sont présentés ci-dessous : il s'agit de savoir si deux teneurs relativement élevées en plomb et en cadmium doivent être considérées comme une pollution très probable ou si l'hypothèse d'une anomalie naturelle doit aussi être retenue.

Une concentration en plomb de 80 mg/kg a été mesurée dans un sol. On constate que cette valeur est très supérieure aux P95 et aux vibrisses supérieures de la région prise dans son ensemble ou des six départements considérés séparément (*tableau 3*). Cette concentration est également très supérieure aux P95 et aux vibrisses supérieures de presque toutes les régions agricoles. La seule exception est constituée par le Boischaut du Sud, région dont le P90 vaut justement 80 mg/kg et le P95 égale 151 mg/kg. Sur 259 sites analysés en Boischaut du Sud, 26 mesures (soit 10 %) excèdent 80 mg de Pb par kg et 13 excèdent 151 mg/kg.

De même, une concentration en cadmium de 0,80 mg/kg s'avère très supérieure aux P95 et aux vibrisses supérieures de la région prise dans son ensemble ou des six départements considérés séparément, à l'exception des P95 du Cher et de l'Indre (*tableau 3*). Elle est également largement supérieure aux P95 et aux vibrisses supérieures de la quasi-totalité des régions agricoles, à l'exception de la Champagne berrichonne et du Boischaut du Sud.

Donc, si on s'interroge sur une mesure faite dans un sol du Boischaut du Sud, une concentration en plomb de 80 mg/kg ou en cadmium de 0,80 mg/kg peut correspondre aussi bien à une anomalie naturelle qu'à une contamination notable. Pour trancher, une étude pédo-géologique, plus ou moins détaillée, s'impose. Il faut s'efforcer de savoir à partir de quel matériau parental le sol en cause s'est développé et si une anomalie naturelle, même de niveau élevé, est vraisemblable. La consultation de la carte géologique à 1/50 000 est un premier pas

incontournable, mais n'est pas suffisant, de nombreuses formations superficielles pouvant exister qui constituent la véritable roche-mère des sols et qui ne figurent pas toujours sur les cartes géologiques, surtout les plus anciennes.

En Champagne berrichonne, sur 397 valeurs mesurées, 10 valeurs égalent cette valeur de 0,80 mg de cadmium par kg et 41 la dépassent. L'origine de ces valeurs élevées doit être recherchée dans des anomalies géochimiques qui affectent certains bancs de l'Oxfordien (Jurassique supérieur), dont beaucoup de sols de Champagne berrichonne dérivent. Ces anomalies en cadmium se retrouvent aussi bien dans le Jura (Baize et Sterckeman, 2001 ; Prudente *et al.* 2002) qu'en Bourgogne (Rambeau *et al.*, 2010). Leur étude à l'échelle européenne a constitué la thèse de Rambeau (2006).

Dans toutes les autres régions agricoles, ces deux mêmes concentrations peuvent être interprétées comme de très probables contaminations anthropiques. Mais, dans chaque cas, une connaissance plus précise de la nature géologique du site ne sera pas inutile.

On pourra nous objecter que ce n'est pas parce qu'une concentration élevée en ETM est très probablement d'origine naturelle, qu'elle est forcément sans danger. Les ETM d'origine pédo-géochimique, même anormalement abondants, ne représentent généralement pas de danger car les teneurs observées aujourd'hui dans les sols correspondent à un équilibre géochimique acquis sur des milliers, voire des centaines de milliers d'années. Les formes les plus mobiles (par ex. les formes solubles et échangeables du cadmium) ont été lixiviées depuis longtemps. Les formes qui sont restées, sont fortement adsorbées ou co-précipitées et ne sont donc pas ou très peu biodisponibles.

De toutes façons, en cas de doute, il est toujours possible et utile de réaliser des études simples consistant en des extractions partielles sur échantillons de sols qui permettent d'estimer aisément ces dangers (ADEME et APCA, 2005 ; Massoura *et al.*, 2004 ; Cornu et Clozel, 2000).

DISCUSSION - LIMITES DE LA MÉTHODE

La démarche proposée dans cet article est simple à mettre en œuvre mais elle n'est pas à l'abri des critiques.

Les imperfections de la collecte

Parmi d'autres, on peut citer la sous-représentation de certaines situations : pas de sols forestiers, pas de sols en pente, etc. Il demeure aussi une incertitude sur les profondeurs des prélèvements (20 - 25 - 30 cm ?). On peut seulement espérer que les préleveurs n'ont pas outrepassé la profondeur du labour.

Juxtaposition dans une même base de données d'analyses HF et d'analyses ER - Quelles conséquences sur les valeurs des indicateurs utilisés ?

Nous avons souvent affirmé que « quoique normalisées l'une et l'autre, ces deux méthodes de mise en solution ne conduisent généralement pas aux mêmes résultats lorsqu'elles sont appliquées au même échantillon de sol ».

Par ailleurs, des essais inter-laboratoires du circuit européen BIPEA menés récemment 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.

Est-il donc pertinent de maintenir dans la même base de données des analyses réalisées par les deux méthodes ?

Nous avons testé cet effet « méthode » en comparant les indicateurs statistiques obtenus par l'acide fluorhydrique et par l'eau régale dans trois régions agricoles pour lesquelles nous disposons d'un grand nombre d'analyses et, surtout, où les sites analysés par HF et ceux analysés par ER semblent répartis d'une manière similairement aléatoire (*figure 2*). À l'examen du *tableau 5* il apparaît que les indicateurs statistiques relatifs aux mesures du plomb par HF sont systématiquement plus élevés que ceux de la population ER. Il en va de même pour Zn mais, en revanche, il n'apparaît pas de différences nettes pour Cd, Cr, Cu et Ni.

Le Boischaud du Sud constitue un cas très particulier. Nous avons déjà signalé le caractère hétérogène de cette région agricole où l'on peut distinguer au moins cinq grands domaines géologiques et pédologiques se succédant du nord vers le sud (Moulin *et al.*, 1998; Baize et Tomassone, 2003).

Le *tableau 6* est structuré de la même manière que le *tableau 5*. On constate que tous les centiles retenus comme indicateurs sont systématiquement beaucoup plus élevés pour la population HF que pour la population ER, et ce pour au moins 5 des 6 métaux. Ces différences, très spectaculaires, résultent peut-être de la différence de méthode de mise en solution mais surtout de la localisation des prélèvements par rapport aux structures et formations géologiques. La population HF est localisée au sud de la région agricole (feuille de La Châtre, principalement) (*figure 2*) dans des secteurs fortement affectés par des minéralisations, tandis que la population ER (à l'effectif plus réduit) se localise plutôt vers le nord, dans des secteurs de roches sédimentaires « ordinaires ».

En conclusion, il semble possible de garder les deux populations HF et ER mélangées sauf pour le Boischaud du Sud où il y faudrait, en outre, distinguer au moins deux sous-populations, sur des critères pédo-géochimiques.

L'utilisation des RA comme territoires de référence

N'aurait-il pas mieux valu utiliser des unités cartographiques (UC) d'une carte de sols, par définition plus homogène au double point de vue géologique et pédologique qu'une région agricole ?

Les esquisses pédologiques à 1/250 000, lorsqu'elles existent, ne sont pas faciles à se procurer sous une forme informatisée. En région Centre, seul le Loiret est véritablement disponible (encore faut-il signer une convention). En outre, à cette échelle graphique, les UCS demeurent généralement des associations de multiples unités typologiques plus ou moins contrastées.

Enfin, les points de mesures localisés uniquement par la commune ($n = 1\,432$) peuvent être affectés automatiquement à une RA alors qu'il n'est pas facile d'affecter ces points à une UC car les UC ne respectent pas les limites communales.

CONCLUSION

Grâce à la nouvelle collecte de 2009, des analyses d'horizons de surface sont désormais disponibles pour plus de 73 000 sites relativement bien répartis sur le territoire de la France métropolitaine. Ces concentrations ont été mesurées dans les couches labourées qui ont reçu des retombées atmosphériques diffuses et divers apports liés aux pratiques agricoles usuelles. Elles sont nommées « teneurs agricoles habituelles » (TAH - Baize, 2009). De telles concentrations correspondent au minimum que l'on puisse mesurer dans un sol urbain ou péri-urbain, proche d'une installation industrielle.

Cette collecte de données fournit des éléments objectifs de comparaison pour tout organisme désirant confronter un résultat d'analyse à différents indicateurs statistiques pour juger du caractère anormal ou non de sa mesure. Le présent article a montré que, si les données disponibles sont suffisamment nombreuses, ce sont les statistiques établies par régions agricoles qui sont les plus pertinentes et les plus faciles à établir.

Si la méthode de mise en solution des données de référence est connue, confronter ses propres teneurs aux statistiques établies séparément selon la méthode de mise en solution (analyses totales HF vs analyses pseudo-totales ER) permettra d'affiner encore le jugement.

Finalement, le diagnostic pour savoir si une valeur est vraisemblablement naturelle ou au contraire anthropique, devra s'appuyer sur une étude géologique et pédologique ponctuelle, sans oublier, évidemment, l'étude historique des sources possibles de pollution.

Le travail qui a été fait pour la région Centre (dont l'essentiel est présenté ici) pourra être fait pour toutes les régions,

Tableau 5: Comparaison pour trois régions agricoles des indicateurs statistiques obtenus sur les populations HF et ER séparées. Sont surlignées en gris les valeurs nettement plus élevées. VS: vibrisse supérieure.

Table 5: Comparison for three «agricultural districts» of the statistical indicators obtained by separating the HF and ER (aqua regia) populations. The much higher values are highlighted in grey. VS: upper whisker.

Beauce	<i>Nb</i>	P50	P75	P90	P95	VS
Nickel HF	286	21,5	25,9	29,4	31,1	38,2
<i>Nickel ER</i>	612	20,2	25,5	30,8	33,3	38,9
Chrome HF	285	47,6	53,0	58,8	61,4	67,0
<i>Chrome ER</i>	612	36,5	46,0	58,2	68,5	68,3
Cadmium HF	307	0,29	0,34	0,40	0,45	0,47
<i>Cadmium ER</i>	612	0,27	0,31	0,36	0,43	0,43
Plomb HF	307	24,4	27,2	32,8	37,8	34,4
<i>Plomb ER</i>	612	18,3	21,3	25,6	28,9	29,4
Cuivre HF	296	12,0	13,9	15,6	16,5	19,4
<i>Cuivre ER</i>	612	10,9	13,0	15,6	16,9	18,8
Zinc HF	307	52,7	59,0	64,1	69,0	77,6
<i>Zinc ER</i>	611	45,4	51,6	58,3	62,2	68,1

Champagne berrichonne	<i>Nb</i>	P50	P75	P90	P95	VS
Nickel HF	141	22,3	31,6	35,2	38,6	59,2
<i>Nickel ER</i>	164	23,1	30,6	37,7	41,2	52,2
Chrome HF	137	51,8	65,8	76,9	80,3	105,9
<i>Chrome ER</i>	166	43,9	60,9	75,6	85,0	104,0
Cadmium HF	141	0,39	0,62	0,83	0,93	1,23
<i>Cadmium ER</i>	163	0,45	0,67	0,83	1,04	1,20
Plomb HF	141	30,7	34,5	39,7	41,6	46,7
<i>Plomb ER</i>	164	24,0	27,6	32,9	34,7	37,5
Cuivre HF	137	10,8	14,0	15,8	16,7	23,5
<i>Cuivre ER</i>	164	12,9	16,6	21,3	23,7	27,9
Zinc HF	137	62,3	86,0	103,9	108,8	156,5
<i>Zinc ER</i>	164	60,4	76,9	96,6	114,8	122,5

Gâtine tourangelle	<i>Nb</i>	P50	P75	P90	P95	VS
Nickel HF	132	10,4	12,2	15,0	20,6	16,7
<i>Nickel ER</i>	145	10,0	12,5	16,2	20,0	20,3
Chrome HF	132	37,6	41,6	45,8	51,2	53,2
<i>Chrome ER</i>	145	30,5	36,0	45,2	52,0	54,8
Cadmium HF	132	0,18	0,22	0,27	0,36	0,34
<i>Cadmium ER</i>	144	0,17	0,22	0,31	0,89	0,36
Plomb HF	132	24,6	28,0	32,9	35,3	36,5
<i>Plomb ER</i>	145	18,0	21,5	25,4	31,0	31,7
Cuivre HF	132	7,8	9,6	16,6	25,9	14,2
<i>Cuivre ER</i>	145	7,0	8,8	12,3	23,0	13,8
Zinc HF	132	36,9	42,2	51,2	56,6	56,6
<i>Zinc ER</i>	145	29,4	36,9	44,1	49,3	56,3

Tableau 6 : Comparaison pour le Boischaut du Sud des indicateurs statistiques obtenus sur les populations HF et ER séparées. Sont surlignées en gris les valeurs nettement plus élevées. VS: vibrisse supérieure.

Table 6: Comparison for Boischaut du Sud of the statistical indicators obtained by separating the HF and ER (aqua regia) populations. The much higher values are highlighted in grey. VS: upper whisker.

Boischaut du Sud	Nb	P50	P75	P90	P95	VS
Nickel HF	158	22,7	36,2	48,5	57,5	70,4
Nickel ER	82	9,0	12,3	16,0	21,6	19,5
Chrome HF	159	52,9	67,0	93,6	114,6	123,1
Chrome ER	83	30,2	35,0	42,8	63,6	53,1
Cadmium HF	159	0,25	0,35	0,77	1,11	0,61
Cadmium ER	63	0,26	0,35	0,46	0,62	0,60
Plomb HF	159	38,9	63,8	132,7	238,7	116,4
Plomb ER	83	24,3	29,2	37,3	41,1	42,0
Cuivre HF	159	17,1	29,5	47,6	57,0	55,7
Cuivre ER	82	5,2	6,8	8,5	10,1	11,6
Zinc HF	159	81,5	136,2	294,1	375,7	263,3
Zinc ER	83	34,2	42,1	59,8	87,1	69,1

départements ou régions agricoles pour lesquels nous disposons d'un nombre suffisant de sites analysés. Ces données de la collecte BDETM 2009 appartiennent à l'ADEME et seront gérées par l'unité InfoSol (INRA Orléans) à laquelle il faudra s'adresser, sachant que les résultats de cette deuxième collecte seront disponibles à moyen terme sur le site internet du GIS Sol. <http://www.gissol.fr>

La seule région de France où les informations disponibles sont plus complètes que celles collectées dans BDETM 2009 est la région Nord-Pas de Calais. En effet, pour cette région, nous disposons de connaissances plus approfondies :

- grâce à des analyses d'horizons profonds, ce qui permet de mieux approcher les fonds pédo-géochimiques naturels (FPGN) et d'en déduire les niveaux de contamination des sols ;
- et grâce au dosage systématique de 18 éléments en traces et pas seulement des 7 métaux habituels (Sterckeman *et al.*, 2002 ; Sterckeman *et al.*, 2007).

REMERCIEMENTS

À l'ADEME pour le financement de la nouvelle collecte BDETM 2009.

Nous remercions également les Chambres d'agriculture et les bureaux d'étude, grands ou petits, pour leur collaboration irremplaçable pour la collecte et la transmission des données.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME et APCA, 2005 - Dérogations relatives à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. Comment formuler une demande pour les sols à teneurs naturelles élevées en éléments traces métalliques? Guide technique. J. Béraud et A. Bispo (Coordinateurs). D. Baize, T. Sterckeman, A. Piquet, H. Ciesielski, J. Béraud et A. Bispo (Auteurs). 147 pages.
- Baize D., 2002 - Impact de trois établissements industriels sur les sols cultivés environnants. pp. 351-374. « Les Éléments traces métalliques dans les sols - Approches fonctionnelles et spatiales » D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. 570 p.
- Baize D., 2008 - Éléments traces dans les sols: ne plus parler de « bruit de fond ». Environnement & Technique, Novembre 2008, n° 281, pp. 25-30.
- Baize D., 2009 - Éléments traces dans les sols - Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles - Définitions et utilisations. 2^{es} Renc. Nat. de la Recherche sur les sites et sols pollués. ADEME, Paris, 9 p.
- Baize D. and Sterckeman T., 2001 - Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. The Science of the Total Environment, 264, pp. 127-139.
- 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. et Tomassone R., 2003 - Modélisation empirique du transfert du cadmium et du zinc des sols vers les grains de blé tendre. Étude et Gestion des Sols, 4, pp. 219-238
- Baize D., Saby N. et Walter C., 2006a - Le cuivre extrait à l'EDTA dans les sols de France. Probabilités de carences et de toxicités selon la BDAT. Étude et Gestion des Sols, 13, 4
- Baize D., Saby N., Deslais W, Bispo A. et Feix I., 2006b - 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.
- Cornu S. et Clozel B., 2000 - Extractions séquentielles et spéciation des éléments traces métalliques dans les sols naturels. Analyse critique. Étude et gestion des Sols, 3, pp. 179-189.

- 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). Rapport de contrat ADEME.
- IFN, 2002 - Régions forestières départementales. Inventaire Forestier national. Insee et SCEES (Ministère de l'Agriculture), 1983 - Code et nomenclature des régions agricoles de la France au 1^{er} janvier 1980.
- Itard Y., Baize D., King D., Salpeteur I., Mouvet C., Bideau L., Cornu S., Tomassone R., Couturier A., Salvador S., 2003 - Éléments traces métalliques dans les sols: méthodes d'évaluation spatialisée et transferts vers les plantes. Zone de La Châtre (Indre). Rapport final. BRGM/ RP-52313-FR. 135 p.
- Massoura S., Echevarria G. et Morel J.L., 2004 - Caractérisation de la biodisponibilité du nickel dans les sols de Haute Savoie. Rapport de fin de contrat pour la MISE de Haute Savoie, 24 p.
- 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.
- Moulin J., Pelissier P. et Paquereau H., 1998 - Carte des sols de la région Centre à 1/50000. Feuille La Châtre Aigurande. Notice explicative. 284 p.
- Prudente D., Baize D. et Dubois J.-P., 2002 - Le cadmium naturel dans une forêt du haut Jura français. pp. 53-70. In: « Les Éléments traces métalliques dans les sols - Approches fonctionnelles et spatiales » D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris. 570 p.
- Rambeau C., 2006 - Cadmium anomalies in Jurassic carbonates (Bajocian, Oxfordian) in western and southern Europe. Thèse. Université de Neuchâtel.
- Rambeau C., Baize D., Saby N., Matera V., Adatte T., Föllmi K.B., 2010 - High cadmium concentrations in Jurassic limestone as the cause for elevated cadmium levels in deriving soils: a case study in Lower Burgundy, France. *Environmental Earth Sciences*, 61, pp. 1573-1585.
- Sterckeman T., Douay F., Fourrier H. et Proix N., 2002 - 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. et Schwartz C., 2007 - Référentiel pédogéochimique du Nord-Pas de Calais. Méthode et principaux résultats. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 14, 2, pp. 153-168.
- Tukey J. W., 1977 - *Exploratory Data Analysis*. Addison Wesley, Reading, Massachusetts.
- Vaslet D., 2001 - Esquisse géologique simplifiée de la région Centre. BRGM.
- 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.

LEXIQUE

Amphibolite

Roche métamorphique, de couleur foncée, constituée d'amphiboles et de feldspaths plagioclases. Les amphiboles sont des silicates vert foncé, souvent riches en fer et magnésium et, par voie de conséquence en nickel, chrome et cuivre.

Éléments en traces métalliques (ETM)

Pour les géochimistes, les **éléments traces** (ou **éléments en traces**) sont les 80 éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total, alors que les 12 **éléments majeurs** représentent tout le reste soit 99,4 %.

Fond pédogéochimique naturel (FPGN)

C'est la concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant uniquement de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique. D'un point à un autre d'un territoire, ce FPGN peut varier très largement, en fonction de la nature du matériau parental (héritage) et du type de sol qui s'y est développé (types de processus pédogénétiques et durée d'action de ces processus). Dans cet article, la notion de FPGN doit être comprise au sens de fond pédogéochimique **local** (correspondant à un solum ou à une série de sols) et par opposition aux contaminations anthropiques.

« Teneurs Agricoles Habituelles » (TAH)

Tous les horizons de surface des sols cultivés ont reçu des apports d'éléments traces liés à des pratiques agricoles classiques (fertilisants, chaulages, fumiers, traitements phytosanitaires, apports d'oligo-éléments) ou à des épandages d'effluents ou de déchets (lisiers, composts, gadoues, boues de stations d'épuration). Ces horizons ont également reçu des retombées atmosphériques d'origine proche ou lointaine, naturelles ou liées aux activités humaines, en quantité variable. En conséquence, une étude statistique des teneurs en ETM des horizons de surface labourés d'un territoire ne peut pas permettre de déterminer le fond pédogéochimique naturel mais seulement une sorte d'état « normal » ou « le plus fréquent » pour les horizons de surface de ce territoire. Ces valeurs sont nommées « **teneurs agricoles habituelles** ».