

Détection de valeurs anormales d'éléments traces métalliques dans les sols à l'aide du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols

E. Villanneau⁽¹⁾, C. Perry-Giraud⁽¹⁾, N. Saby⁽¹⁾, C. Jolivet⁽¹⁾, F. Marot⁽²⁾, D. Maton⁽³⁾,
A. Floch-Barneaud⁽⁴⁾, V. Antoni⁽⁵⁾ et D. Arrouays⁽¹⁾

- 1) INRA, unité INFOSOL, 2163 avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 Ardon, 45075 Orléans Cedex 2
- 2) ADEME, département Sites et Sols pollués, 20 avenue du Grésillé, BP 90406, 49004 Angers Cedex 01
- 3) BRGM, service Environnement industriel et Procédés Innovants, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2
- 4) NERIS, unité Déchets et Sites Pollués, Parc technologique ALATA, BP 2, 60550 Verneuil en Halatte
- 5) IFEN, 5 route d'Olivet, BP 16105, 45061 Orléans Cedex 2

RÉSUMÉ

Les éléments traces dans les sols peuvent avoir deux origines : naturelle ou anthropique. À défaut de pouvoir strictement déterminer, dans la plupart des cas, l'une ou l'autre des origines, il est possible de déterminer le cumul du fond pédogéochimique et d'une éventuelle contamination diffuse communément appelé « bruit de fond » et nommé ici de manière plus appropriée « teneurs habituelles ». La limite supérieure de ces teneurs habituelles est établie à l'aide de vibrisses calculées localement et permettant de déterminer des anomalies ponctuelles. Les données du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols ont servi de base au calcul de la vibrisse de Tukey. Dans le cas des quatre éléments principalement présentés dans ce travail (plomb, zinc, cuivre, cadmium totaux et extractibles), les fortes vibrisses témoignent soit de valeurs naturellement fortes (cadmium dans les calcaires jurassiques), soit de contaminations diffuses d'origine anthropique (plomb et zinc autour des grandes agglomérations). Les vibrisses permettent d'établir un indicateur détectant une teneur en un élément trace ayant une valeur suspecte tout en tenant compte du contexte local.

Mots clés

Vibrisse, bruit de fond, teneur habituelle, fond pédogéochimique, éléments traces, anomalie.

SUMMARY**DETECTING OUTLIERS IN TRACE ELEMENT CONTENTS IN SOIL WITH THE FRENCH SOIL QUALITY MONITORING NETWORK**

Trace elements (TE) in soil may have an anthropogenic or a natural origin. In most cases, it is not possible to discriminate whether amounts in TE are due to one or to the other origin. In this paper, we took into account both natural pedogeochemical background and diffuse contamination to quantify background levels, named here more suitably "usual TE contents", by using robust statistics (Tukey's whisker). The data were extracted from the database of the French Soil Quality Monitoring Network (namely the RMQS /- Réseau de Mesure de la Qualité des Sols/). Whiskers were calculated for each RMQS site using at least 10 neighbour sites within a 50 km circle. High background contents for four elements (lead, zinc, copper and total and extractable cadmium) point out either high natural contents (e.g. cadmium in jurassic limestone) or anthropogenic diffuse contamination (e.g., lead and zinc around large urban areas). Finally, our method allowed to calculate an indicator able to detect a suspicious trace element amount while taking into account local context.

Key-words

Whiskers, background, natural pedogeochemical background, trace elements, anomaly

RESUMEN**DETECCIÓN DE VALORES ANORMALES DE ELEMENTOS TRAZAS METÁLICOS EN LOS SUELOS CON AYUDA DE LA RED DE MEDIDA DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS**

Los elementos trazas metálicos en los suelos pueden tener dos orígenes: natural y antrópico. A falta de poder estrictamente determinar, en la mayoría de los casos, uno u otro de los orígenes, se estableció un ruido de fondo que reúna fondo geoquímica y contaminación difusa con ayuda de vibrisas calculadas localmente y que permite determinar anomalías puntuales. Los datos de la Red de Medida de la Calidad de los Suelos sirvieron de base de cálculo de la vibrisa de Tukey. En el caso de los cuatro elementos presentados (plomo, zinc, cobre, cadmio totales y extractables), las fuertes vibrisas dan prueba sea de valores naturalmente fuertes (cadmio en las calizas jurasicas), sea de contaminaciones difusas de origen antrópico (plomo y zinc alrededores de grandes aglomeraciones). Las vibrisas permiten establecer un indicador que detecta un contenido en elemento traza que tiene un valor sospechoso y tomando en cuenta el contexto local.

Palabras clave

Vibrisa, ruido de fondo, fondo geoquímico, elementos trazas

La prise de décision pour déterminer qu'un sol est contaminé par les éléments traces métalliques (ETM) peut nécessiter la connaissance du fond pédogéochimique local (Baize *et al.*, 2002, Baize et Sterckeman, 2004). Cette connaissance permet de déterminer le degré de contamination susceptible d'être attribué à des activités anthropiques par comparaison à la valeur de ce fond pédogéochimique. Ce fond dépend essentiellement des facteurs de la pédogenèse indépendamment de l'activité humaine : matériau parental, apports aériens, lessivage, cycles biogéochimiques... Les décideurs du milieu de l'environnement et de la gestion des sites et sols pollués (au sens de « terrains pollués ») sont souvent confrontés à un manque de « valeurs guides » (Darmendrail *et al.*, 2000) en ce qui concerne les teneurs en ETM dans les sols pour qualifier une contamination anthropique d'un sol.

Il n'existe pas aujourd'hui de seuils réglementaires en éléments-traces pour déterminer qu'un sol est contaminé car il est insensé de déterminer un tel seuil au niveau national. *Ceux issus de l'arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées*, seuils eux-mêmes repris tels quels de la Norme Afnor NF U44-041 datant de juillet 1985, ne sont applicables que dans le cadre particulier de l'épandage de boues de station d'épuration sur sols agricoles. Par ailleurs, à la différence d'autres états de l'Union Européenne, il n'y a pas de loi spécifique concernant la dépollution des sols en France. Elle est traitée par la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Le ministère chargé de l'environnement est intéressé par les données disponibles sur le fond géochimique naturel des sols en France. En effet, dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués, pour la réalisation d'un diagnostic, d'un plan de gestion, pour fixer des objectifs de réhabilitation, pour évaluer des risques résiduels ou encore pour interpréter l'état des milieux, le recours à des valeurs guides permettant de replacer dans leur contexte les valeurs mesurées ou calculées, est essentiel. Une étude réalisée en 2000 a permis de dresser un état des connaissances et des données disponibles (Darmendrail *et al.*, 2000) pour tenter de définir des valeurs guides dans les environnements industriels et agricoles. Elle conclut sur « une distorsion entre les données disponibles permettant de définir un fond géochimique naturel, et des fonds pédo-géochimiques naturels, et les principaux territoires nécessitant cette information ».

En 2007, le ministère chargé de l'environnement a mis en place de nouveaux outils de gestion et de réaménagement des sites pollués. La note aux préfets datée du 8 février 2007 (MEEDDAT, 2007) fait référence dans son annexe 2 au recours à la comparaison aux milieux naturels. Dans ce contexte, le MEEDDAT a sollicité le Groupement d'Intérêt scientifique Sol (Gis Sol) qui, pour répondre à cette demande, a réalisé des cartes de détection de valeurs anormales des teneurs en ETM des sols couvrant l'ensemble du territoire. Les valeurs de vibrisses qui figurent sur les cartes sont

destinées à servir de valeurs seuils d'anomalie aux gestionnaires institutionnels (Directions Régionales de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement - DRIRE, grandes agglomérations) ou aux privés (bureaux d'étude, professionnels de la dépollution des sols et de la réhabilitation des friches industrielles, établissements publics fonciers). Cependant, ces vibrisses pourront également servir de seuil de détection d'anomalie aux gestionnaires des espaces naturels et agricoles, comme par exemple lors de la demande d'implantation d'une porcherie, ou à l'occasion de l'établissement de préconisations de pratiques agricoles, lors de la rédaction ou de la révision des chartes des parcs naturels, etc. Mathieu *et al.* (2008) ont déjà abordé ce sujet mais à une échelle régionale (Ile de France et Centre) avec des bases de données différentes (Aspitet et Anademe) et avec une méthode différente (percentile 95).

Tous les sols ont subi l'influence des activités humaines et ce depuis longtemps. Les teneurs en ETM en surface des sols sont influencées par les apports issus de l'agriculture, du trafic routier, des activités industrielles et domestiques, mais aussi par l'exportation des cultures et l'érosion des sols. Cette dynamique complexe des ETM dans les sols rend très difficile la détermination du fond pédo-géochimique pour les horizons superficiels. Aussi, pour des applications pratiques, cette notion est souvent remplacée par celle de « bruit de fond » mais ce terme étant trop imprécis, le terme de « teneur habituelle » sera utilisé dans cette étude. Cette teneur habituelle, rappelant la teneur agricole habituelle utilisée par Baize (2008b), est utilisée au sens de teneur fréquemment observée, induisant la notion statistique de fréquence, qui inclut fond pédogéochimique et contamination diffuse. Si cette teneur habituelle peut être déterminée, alors toute valeur en ETM très largement supérieure à cette teneur pourra être considérée comme anormale, et suspectée soit de contamination locale d'origine anthropique, soit d'une teneur d'origine naturelle anormalement élevée à cause de son contexte pédogéologique ponctuel, soit de l'addition des deux causes naturelle et anthropique.

Cette étude se propose d'utiliser une approche statistique pour déterminer localement (c'est à dire à l'échelle d'un cercle de 50 km de rayon) un seuil d'anomalie des teneurs en ETM dans les sols français. Pour ce faire, nous nous fondons sur le dispositif du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS). En utilisant comme seuil d'anomalie, la vibrisse supérieure de Tukey (1977) calculée sur une population locale à partir des 1^{er} et 3^e quartiles, nous souhaitons obtenir un seuil local révélant des valeurs anormales en fonction de la distribution des teneurs en ETM mesurées localement.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le jeu de données: le RMQS

Pour utiliser ce type de statistique à l'échelle du territoire, nous avons besoin d'un nombre suffisant de données sur les teneurs en ETM dans les sols, échantillonnées de manière systématique et régulière sur l'ensemble de la France. Le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, géré par l'unité InfoSol de l'INRA d'Orléans, possède les caractéristiques désirées: 2200 sites de mesure répartis sur l'ensemble du territoire national selon une maille carrée régulière de 16 km par 16 km. En chaque site, sont mesurées les teneurs totales (extraction HF + HClO₄, selon la norme Afnor NF ISO 14689-1) en cadmium (Cd), cobalt (Co), chrome (Cr), cuivre (Cu), molybdène (Mo), nickel (Ni), plomb (Pb), thallium (Tl) et zinc (Zn) et les teneurs extractibles (extraction à l'acide éthylène-diamine-tétraacétique EDTA, méthode INRA) en Cd, Cu, Ni, Pb et Zn. L'utilisation de HF + HClO₄ suppose l'extraction de toutes les formes de l'élément, y compris celles intégrées dans les réseaux cristallins des minéraux du sol, alors que l'utilisation de l'EDTA suppose l'extraction des formes de l'élément liées aux matières organiques et aux oxyhydroxides (Juste, 1989). Les analyses sont conduites sur deux profondeurs d'échantillonnage: surface 0-30 cm et sub-surface 30-50 cm. Les sites sont localisés sous sol naturel ou cultivé (forêt, site agricole, prairie...) (Jolivet *et al.*, 2006a et b). Notre étude prend en compte les 1422 analyses de la couche 0-30 cm et les 1270 analyses de la couche 30-50 cm des sites du RMQS échantillonnés et analysés en France métropolitaine à la date de février 2008 (*tableau 1 et figure 1*). Il manque parfois quelques analyses en ETM, c'est pourquoi le nombre de données peut être variable d'un élément à un autre.

Définition des vibrisses

La boîte à moustache, « *box and whiskers plot* », inventée par John W. Tukey en 1977, permet de représenter schématiquement la distribution d'une population donnée. Sont disposés selon un axe représentant le paramètre étudié, les 1^{er} et 3^e quartiles aux deux extrémités de la boîte et la médiane à l'intérieur de celle-ci (*figure 2*). Les vibrisses (« *whiskers* ») partent horizontalement, de part et d'autre des 1^{er} et 3^e quartiles. Les « *whiskers* » au sens strict du terme correspondent à la valeur supérieure adjacente à la vibrisse théorique inférieure à gauche, et à la valeur inférieure adjacente à la vibrisse théorique supérieure à droite. Les vibrisses théoriques inférieure et supérieure correspondent respectivement, selon Tukey, à la valeur équivalente à ces deux équations:

$$VS = Q3 + \alpha \text{ DIQ}; \quad VI = Q1 - \alpha \text{ DIQ}$$

VI: vibrisse inférieure Q1: premier quartile
 VS: vibrisse supérieure Q3: troisième quartile
 α : coefficient de vibrisse

$$\text{DIQ: Distance Inter Quartile DIQ} = Q3 - Q1$$

Tableau 1 - Nombre de sites RMQS échantillonnés et analysés à la date de février 2008 pour les deux couches.

Table 1 - Number of RMQS sites sampled and analysed in February 2008 for both layers.

	couche 0-30 cm	couche 30-50 cm
Cd total	1418	1266
Cd extractible	1422	1270
Cr total	1418	1266
Co total	1418	1266
Cu total	1418	1266
Cu extractible	1422	1270
Mo total	1377	1224
Ni total	1418	1266
Ni extractible	1422	1270
Pb total	1418	1266
Pb extractible	1422	1270
Tl total	1418	1266
Zn total	1418	1266
Zn extractible	1422	1270

Les valeurs situées au-delà des vibrisses théoriques sont considérées comme étant anormales par rapport à la population considérée. Nous appellerons par la suite vibrisse, la vibrisse théorique et non la valeur adjacente de cette vibrisse théorique (*figure 3*).

Le coefficient $\alpha = 1,5$ défini par Tukey en 1977 permet, si la distribution de la population suit une loi normale, de déterminer 0,7 % des teneurs observées comme anormales (0,35 % supérieur, 0,35 % inférieur). Tukey définit une vibrisse interne à un coefficient $\alpha = 1,5$ et une vibrisse externe à un coefficient $\alpha = 3,0$. Les anomalies relevées au-delà de la vibrisse externe seront appelées anomalies extrêmes.

La particularité des vibrisses de Tukey est de définir un seuil d'anomalie n'étant pas influencé par les valeurs extrêmes de la population mais uniquement basé sur le rang des individus. Les vibrisses de Tukey ne requièrent théoriquement pas la normalité des données. Cependant une dissymétrie ou une pluri-modalité de la distribution influencent directement le nombre d'anomalies.

A titre d'exemple, la notion de vibrisse a été utilisée par Baize *et al.* (2006b) à l'échelle du territoire national français et en utilisant une autre base de données avec un coefficient $\alpha = 1,5$. Nous avons également effectué une approche nationale afin d'étudier l'influence du coefficient de vibrisse α sur le nombre de valeurs anormales. Pour ce faire, nous avons calculé le nombre d'anomalies pour les vibrisses dont le coefficient α varie entre 1 et 7 avec un pas de 0,25. Comme le montrent les exemples sur les *figures 5 et 6*, le nombre

Figure 1 - Répartition des sites RMQS échantillonnés et analysés à la date de février 2008 pour la couche 0-30 cm (en vert) et pour la couche 30-50 cm (en bleu)

Figure 1 - Distribution of the RMQS sites sampled and analysed in February 2008 for layer 0-30 cm (green) and layer 30-50 cm (blue)

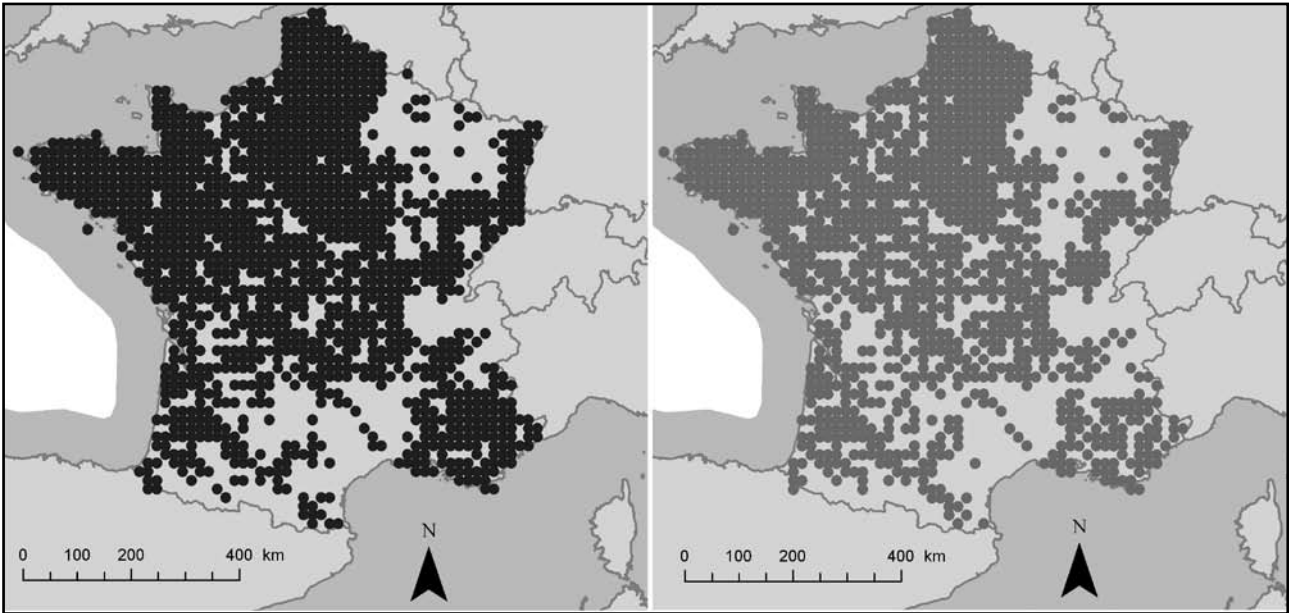


Figure 2 - Définition de la vibrisse pour une distribution normale (loi de Gauss)

Figure 2 - Definition of the whiskers for a normal distribution (Gauss law)

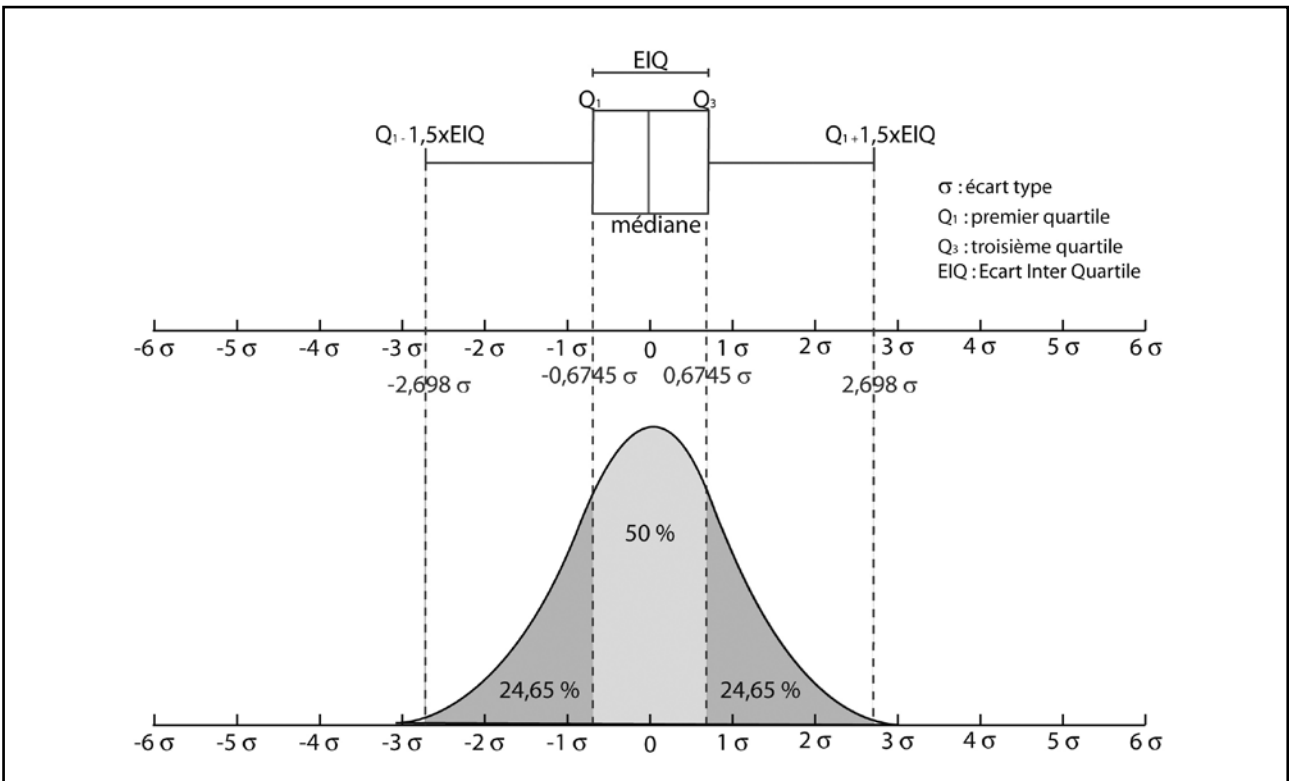
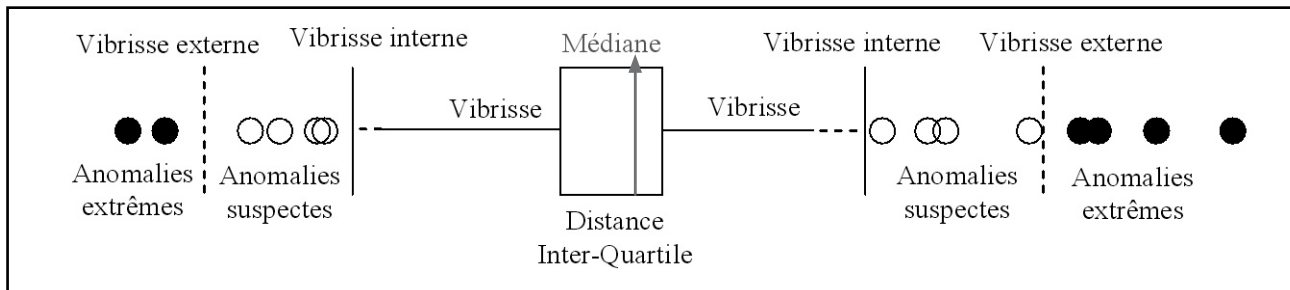
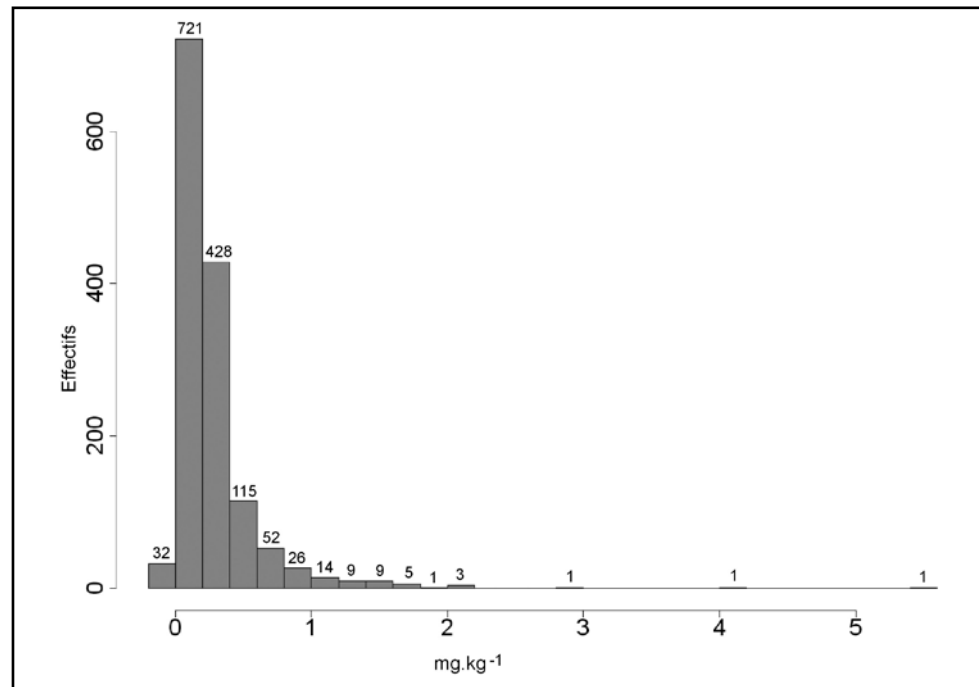


Figure 3 - Position des anomalies suspectes et des anomalies extrêmes**Figure 3** - Position of suspect and extreme outliers' values**Figure 4** - Histogramme de répartition des valeurs en Cd total de la couche 0-30 cm**Figure 4** - Histogram of total Cd total contents in the 0 to 30 cm layer

d'anomalies diminue de façon exponentielle avec l'augmentation du coefficient α .

Détail de la technique du calcul de la vibrisse

La plupart des étapes des calculs localisés des vibrisses sont réalisées à l'aide de scripts exécutés dans le logiciel R (R Development Core Team, 2007) afin d'automatiser les calculs.

La première étape est de calculer la distance entre les sites à l'aide d'un logiciel de système d'information géographique afin de ne pas effectuer cette étape à chaque itération.

Les étapes suivantes sont réalisées par ETM et par couche à l'aide d'un seul script R:

- extraction, depuis la base de données, des concentrations en ETM pour chaque site,

- sélection, pour chaque site, des concentrations en ETM des sites voisins situés à une distance inférieure à 50 km,
- décompte du nombre de concentrations en ETM sélectionnées par site et non-calcul de vibrisse lorsque ce décompte est inférieur à 10,
- calcul, pour chaque site, de la vibrisse par la fonction VS avec un coefficient $\alpha = 3,0$.

Nous avons généré un script de ce type pour chaque ETM et pour chaque couche. Il suffit d'exécuter un groupe de commandes pour que les calculs s'actualisent directement à partir des tables de la base de données du RMQS.

Valeurs anomaliqes locales en ETM

L'approche que nous proposons vise à donner une dimension locale aux vibrisses en réduisant la surface géographique considérée

(un cercle d'un rayon de 50 km) sur la base d'un nombre suffisant de points pour permettre un calcul robuste. Nous souhaitons prendre en compte la variation locale des teneurs en ETM provenant soit de teneurs plus élevées liées au fond pédogéochimique, à l'image du Cd dans les sols issus des calcaires jurassiques (Baize *et al.*, 1999), soit liées à une contamination anthropique diffuse, à l'image des teneurs élevées en Zn et Pb dans les régions à forte densité industrielle (Nord-Pas-de-Calais, Ile-de-France) ou en Cu dans les vignobles bordelais. Notre but étant de déterminer des anomalies ponctuelles dans la limite de résolution de notre maille de 16 km, nous avons calculé en chaque point (site de prélèvement) une vibrisse locale à partir de la population de points situés dans un rayon de 50 km maximum, avec un minimum de 10 points considérés (soit un maximum de 29 points par site). Ces critères, distance de 50 km et minimum de 10 points, sont nécessaires pour calculer des vibrisses qui prennent en compte à la fois suffisamment de points pour être statistiquement valables et des points suffisamment proches pour pouvoir être considérés comme représentatifs d'une population locale. Ces restrictions expliquent pourquoi les cartes n'ont pu être établies sur les départements d'outre-mer déjà couverts par le RMQS (Guadeloupe et Martinique) car ils comprennent trop peu de sites. La vibrisse inférieure n'ayant pas de sens pour déterminer une éventuelle contamination en ETM, seule la vibrisse supérieure a été calculée dans cet objectif. Avec les données disponibles à la

date de février 2008, 1 794 vibrisses ont été calculées pour la couche 0-30 cm et 1 716 pour la couche 30-50 cm sur l'ensemble du territoire. Le nombre de vibrisses diffère du nombre de sites utilisés car il est possible de calculer une vibrisse sur un site qui n'a pas été prélevé à partir du moment où il répond aux conditions du calcul de la vibrisse (soit un minimum de 10 points autour de ce site dans un rayon de 50 km).

RÉSULTATS

Calcul des vibrisses nationales

La population nationale des concentrations en ETM issues du RMQS suit une distribution fortement dissymétrique présentant un étalement vers les teneurs fortes (voir l'exemple du Cd en *figure 4*). Ces teneurs sont utilisées pour calculer les vibrisses. Ces mêmes données sont comparées aux vibrisses calculées. Ainsi, nous avons évalué la proportion de valeurs anormales pour chaque ETM et leur localisation. Cette proportion varie de 3 à 9 % selon l'ETM considéré pour des anomalies dites suspectes (vibrisse calculée avec $\alpha = 1,5$) et de 1 à 5 % pour les anomalies dites extrêmes (vibrisse calculée avec $\alpha = 3,0$) (*tableau 2*). La

Tableau 2 - Pourcentages de valeurs anormales suspectes ($\alpha = 1,5$) et extrêmes $\alpha = 3,0$ pour les 14 variables étudiées par comparaison aux vibrisses calculées sur la population nationale.

Table 2 - Percentage of suspect ($\alpha = 1.5$) and extreme outliers ($\alpha = 3.0$) values for the 14 studied variables in comparison with whiskers computed for the national population.

	Pourcentage d'anomalies en %				Valeur de la vibrisse en mg kg ⁻¹			
	Couche 0-30 cm		Couche 30-50 cm		Couche 0-30 cm		Couche 30-50 cm	
	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 3,0$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 3,0$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 3,0$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 3,0$
Cd total	9,4	4,6	7,1	3,4	0,63	0,94	0,40	0,60
Cd extractible	8,6	4,9	6,5	3,1	0,33	0,48	0,16	0,25
Co total	4,1	1,7	4,2	1,5	25,22	37,23	26,09	38,19
Cr total	2,9	1,1	2,9	0,9	111,00	158,40	111,88	158,06
Cu total	6,8	3,4	5,1	2,1	40,18	59,48	35,93	53,06
Cu extractible	8,7	5,4	6,8	4,3	7,79	11,82	4,67	7,13
Mo total	9,0	3,7	7,2	3,7	1,57	2,26	1,36	1,93
Ni total	3,9	1,1	4,2	1,3	56,80	84,70	56,75	83,60
Ni extractible	6,7	3,3	7,0	3,4	2,74	4,13	1,93	2,94
Pb total	5,2	2,0	4,7	1,7	62,30	86,90	51,65	72,20
Pb extractible	6,7	2,9	5,5	2,1	15,67	22,84	8,89	13,02
Tl total	7,9	2,6	7,2	2,6	1,36	1,94	1,37	1,95
Zn total	4,4	1,5	3,5	1,1	157,45	227,50	144,00	206,10
Zn extractible	7,1	3,4	6,3	2,8	6,4	9,53	2,46	3,68

Tableau 3 - Comparaison du pourcentage de valeurs anormales et des valeurs de vibrisses nationales (vibrisse interne) de l'étude de Baize *et al.* (2007) et de la présente étude pour la couche 0-30 cm

Table 3 - Comparison of the percentage of outliers and the national whisker values (inner fence) of Baize *et al.* (2007) and of the present study for the 0-30 cm layer

	% de valeurs anormales		Vibrisse interne en mg kg ⁻¹ ($\alpha = 1,5$)		Nombre de données utilisées	
	Baize <i>et al.</i>	la présente étude	Baize <i>et al.</i>	la présente étude	Baize <i>et al.</i>	la présente étude
Cd	6,9	9,4	0,80	0,63	10634	1418
Cr	3,7	2,9	91,8	111,0	11117	1418
Cu	6,9	6,8	33,3	40,2	11118	1418
Ni	5,8	3,9	50,3	56,8	11275	1418
Pb	5,7	5,2	52,4	62,3	11150	1418
Zn	5,7	4,4	122,5	157,5	11161	1418

distribution des valeurs explique clairement le pourcentage élevé d'anomalies (voir figure 5). Rappelons que la proportion d'anomalies relevées est directement dépendante du calcul de la vibrisse et plus précisément du coefficient de vibrisse α . Ainsi nous avons étudié le comportement de la proportion d'anomalies face à ce coefficient α que l'on a fait varier (figures 6 et 7). On observe une décroissance générale exponentielle de la proportion d'anomalies par rapport au coefficient de vibrisse α , avec toutefois l'existence de paliers peu marqués. La vibrisse calculée avec un coefficient $\alpha = 1,5$ permettrait de détecter les « anomalies suspectes » alors que celle calculée avec un coefficient $\alpha = 3,0$ détecterait les « anomalies extrêmes », autrement dit les valeurs réellement anormales (Tukey, 1977). Dans le cas d'une distribution fortement dissymétrique, la vibrisse externe (coefficient $\alpha = 3,0$) serait plus appropriée pour le calcul de vibrisse pour déterminer les anomalies avec plus de certitude.

L'ensemble des courbes montrant les relations entre le pourcentage de valeurs anormales et le coefficient de vibrisse α est asymptotique. Il s'agit de courbes ajustées sur les points calculés. L'équation de la courbe se présente comme suit :

$$f(x) = C_2 + (C_1 - C_2) \times \frac{\exp(-b\alpha) - \exp(-100b)}{1 - \exp(-100b)}$$

Les allures des courbes diffèrent un peu selon les éléments : Ni, Co et Zn atteignent rapidement un pourcentage de valeurs anormales bas (moins de 2 %) que ce soit en surface ou en profondeur. Le Cu extractible se comporte de la même manière, mais le pourcentage d'anomalies est plus élevé et semble moins stabilisé que pour les autres éléments. Les autres éléments ont un comportement intermédiaire entre ces deux extrêmes : le pourcentage de valeurs anormales tend à se stabiliser en-dessous de 2 %. Ces observations tendent à confirmer l'utilisation de la vibrisse externe (coefficient $\alpha = 3,0$) de Tukey afin de caractériser les valeurs

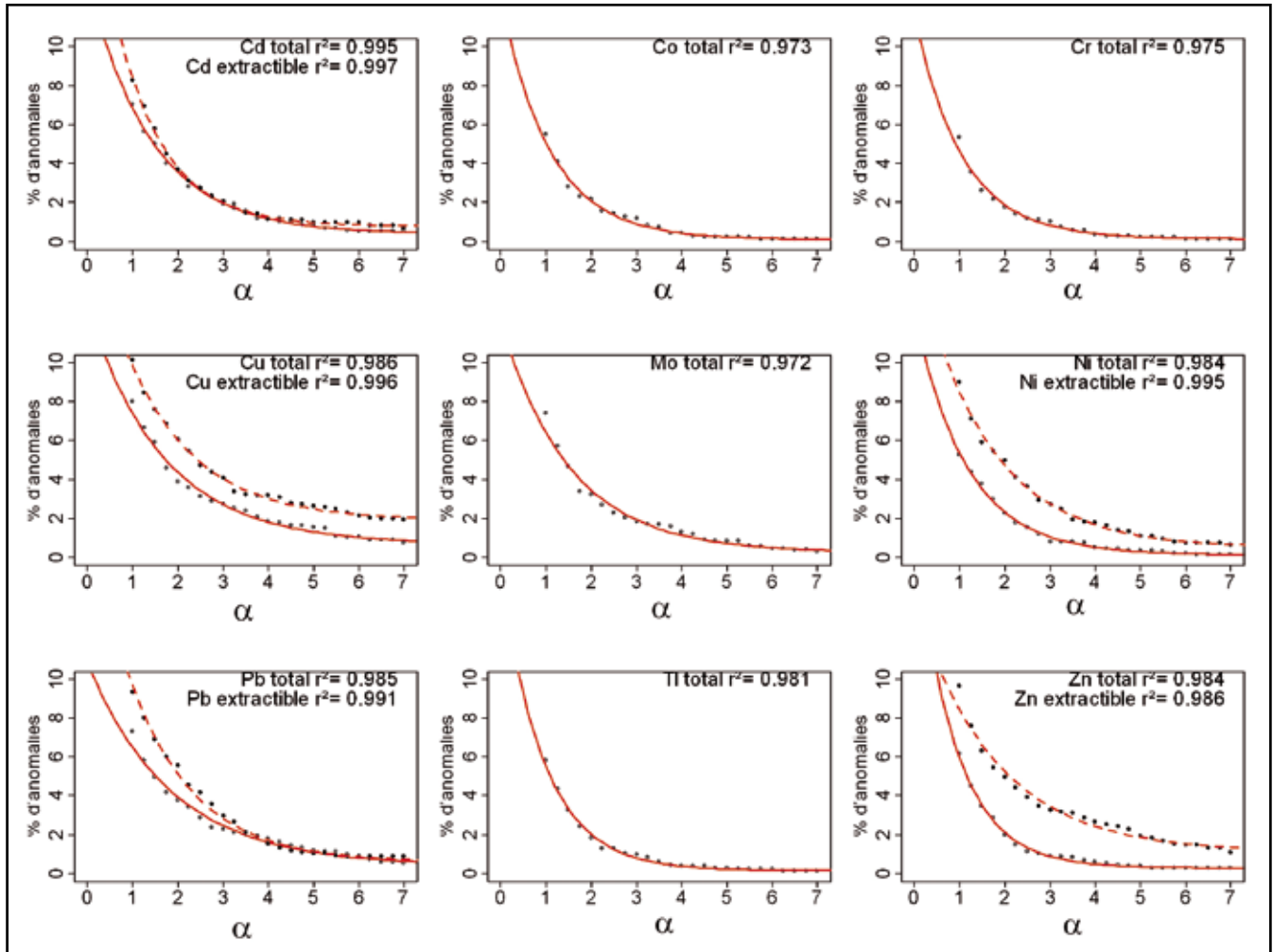
Tableau 4 - Pourcentages de valeurs anormales suspectes et extrêmes pour les 14 variables étudiées par comparaison aux vibrisses locales

Table 4 - Percentage of suspect and extreme outliers values for the 14 studied variables in comparison with local whiskers

	Pourcentage de valeurs anormales			
	Couche 0-30 cm		Couche 30-50 cm	
	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 3,0$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 3,0$
Cd total	5,0	1,9	4,9	2,3
Cd extractible	5,8	2,1	6,1	2,2
Co total	4,2	2,6	6,7	3,0
Cr total	2,6	1,0	5,0	1,0
Cu total	5,9	2,8	3,6	1,2
Cu extractible	7,6	4,1	3,6	1,8
Mo total	4,7	1,8	5,5	1,9
Ni total	3,9	0,9	5,0	1,9
Ni extractible	5,9	2,7	4,0	2,1
Pb total	5,0	2,3	4,1	2,0
Pb extractible	6,9	3,0	6,1	3,2
Tl total	3,3	1,0	4,1	0,9
Zn total	3,5	0,9	3,1	0,9
Zn extractible	6,3	3,3	1,3	0,9

Figure 5 - Relation entre le pourcentage de valeurs anomaliques et le coefficient de vibrisse α utilisé pour les éléments de la couche 0-30 cm (lignes pleines pour les éléments totaux, lignes pointillées pour les éléments extractibles)

Figure 5 - Relationship between the percentage of outlier values and the coefficient used to calculate the whisker α for each element in the upper layer (plain lines for total elements, dotted lines for extractable elements)



anomaliques. La valeur de la vibrisse évolue de manière linéaire en fonction du coefficient α (figure 7). La variation de la valeur de la vibrisse entre le coefficient $\alpha=1,5$ et le coefficient $\alpha=3$ est souvent non négligeable, aussi bien pour la couche 0-30 cm que pour la couche 30-50 cm. C'est pourquoi il faut choisir le coefficient α avec soin et se baser sur la stabilisation du pourcentage d'anomalies pour le déterminer (figure 5 et 6).

Par comparaison avec les résultats de la collecte nationale ANADEME (Baize *et al.*, 2007), les valeurs de vibrisses internes (coefficient $\alpha=1,5$) sont légèrement plus élevées dans cette étude sauf dans le cas du Cd (tableau 3). Malgré des bases de données différentes, les tendances sont les mêmes et plus la vibrisse est élevée, moins il y a d'anomalies, excepté dans le cas du Cu dont l'essentiel des anomalies est situé en Languedoc-Roussillon (Baize

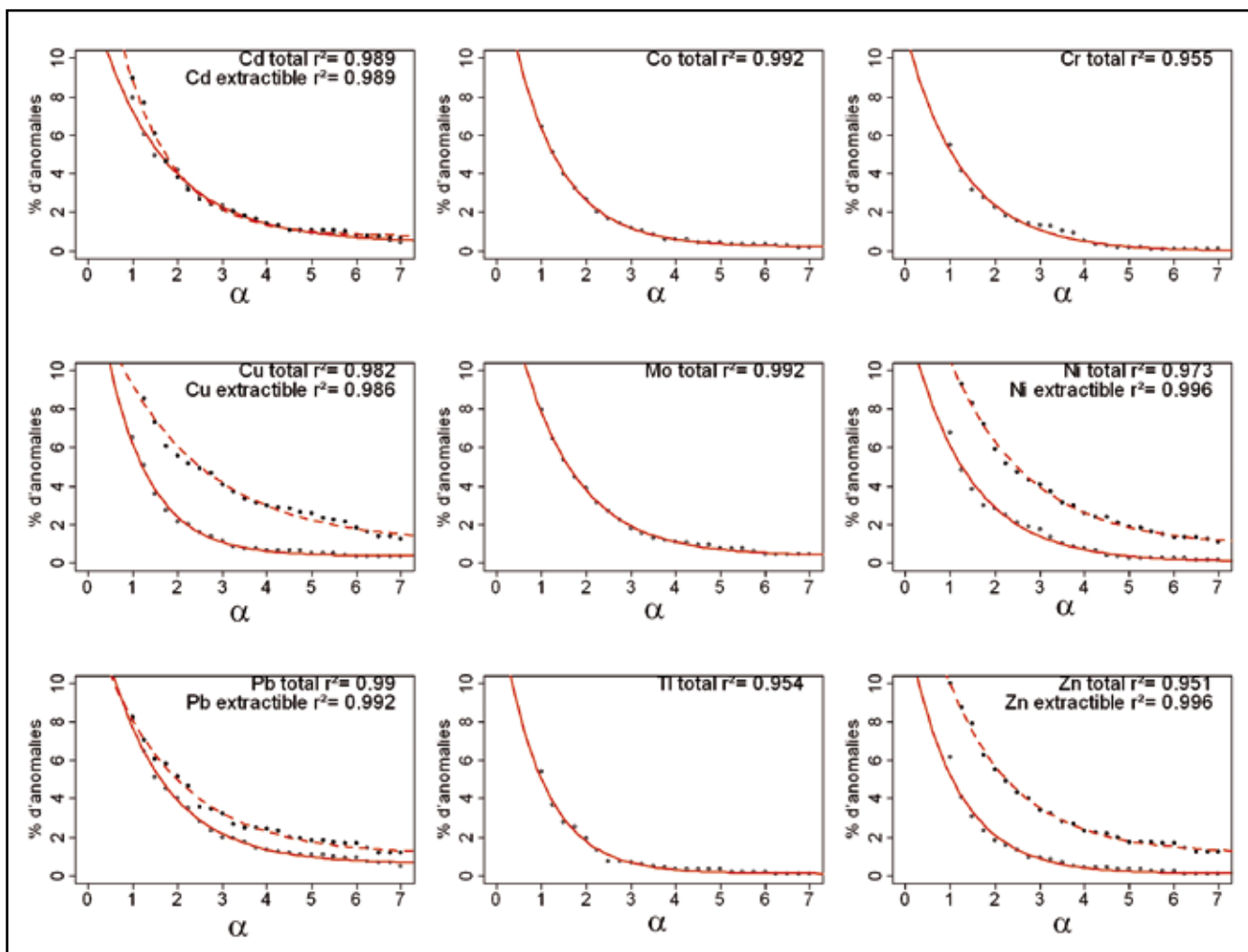
et al., 2007) alors que cette région n'a pas encore été échantillonnée et analysée dans le cadre du RMQS à la date de février 2008.

Calcul localisé des vibrisses

La valeur de la vibrisse permet d'avoir une vision globale d'une variable. Dans le cas des éléments traces, les secteurs qui présentent des valeurs de vibrisses élevées sont des secteurs où les sites présentent une teneur en éléments traces élevée et inversement, si les vibrisses sont faibles, les sites ont des teneurs en éléments traces faibles. Les sites qui présentent des valeurs supérieures à la vibrisse sont considérés comme anomaliques. Cela signifie qu'ils présentent une valeur très différente et nettement plus élevée de celle des points voisins.

Figure 6 - Relation entre le pourcentage de valeurs anomaliques et le coefficient de vibrisse α utilisé pour les éléments de la couche 30-50 cm (lignes pleines pour les éléments totaux, lignes pointillées pour les éléments extractibles)

Figure 6 - Relationship between the percentage of outlier values and the coefficient used to calculate the whisker α for each elements in the deeper layer (plain lines for total elements, dotted lines for extractable element)



Les pourcentages d'anomalies calculés par rapport aux vibrisses locales (tableau 4) sont plus faibles que ceux calculés pour les vibrisses nationales (tableau 3), que ce soit pour un coefficient $\alpha = 1,5$ ou $\alpha = 3,0$. Cela s'explique par le fait que le calcul de la vibrisse locale prend en compte le contexte local : contamination diffuse ou fond pédogéochimique particulier. Ce type de vibrisse est alors plus robuste pour détecter une valeur dite « anomalique » et indique une limite supérieure aux variations proches des teneurs habituelles. Il faut relever tout de même que le pourcentage d'anomalies reste élevé dans le cas du Cu extractible (4,1 % pour la vibrisse externe pour la couche de surface)

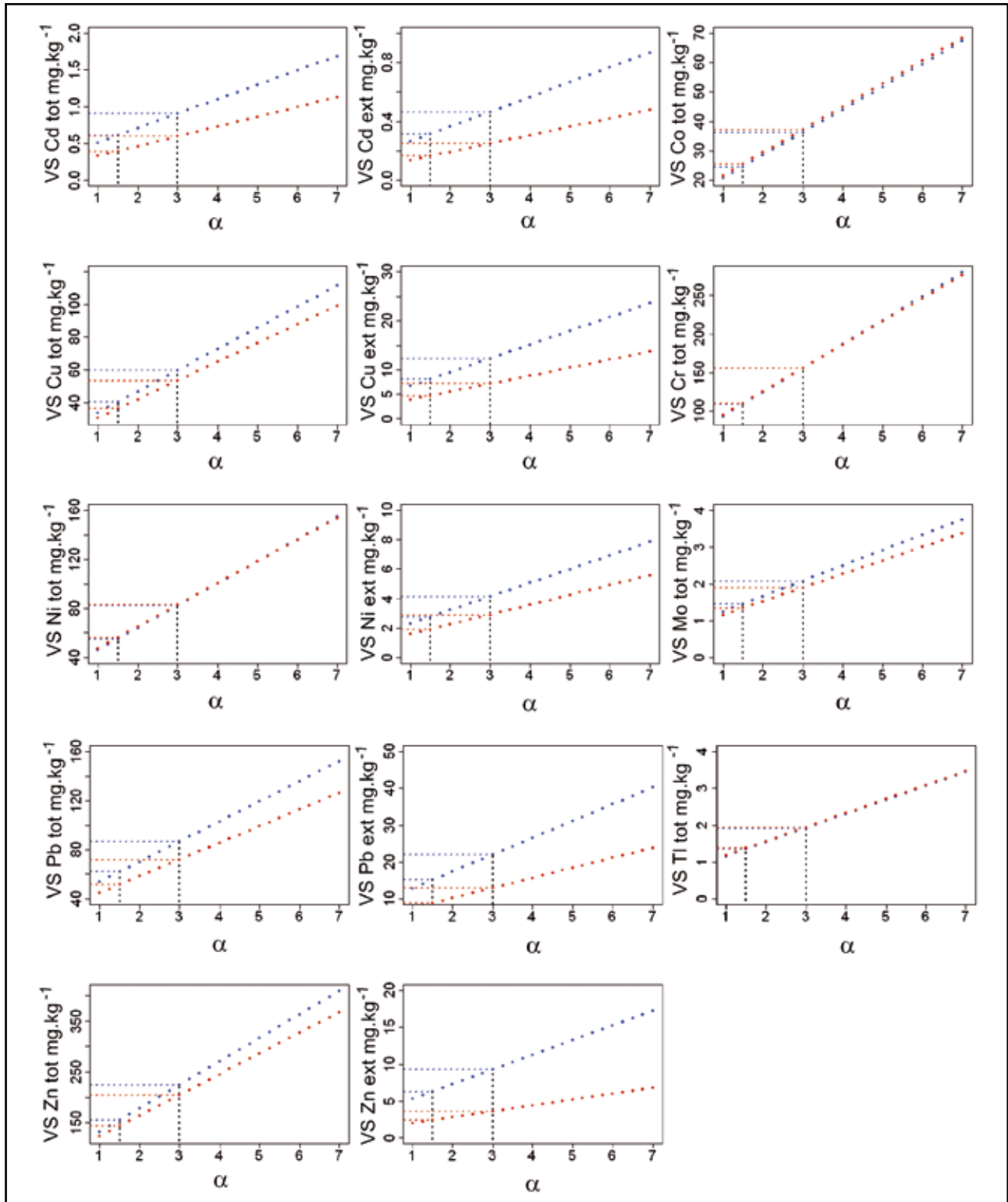
La vibrisse représentée sur les cartes (figure 8) est la vibrisse externe supérieure, calculée avec un coefficient $\alpha = 3,0$ ce qui signi-

fie que les anomalies détectées sont plus importantes et donc plus différentes des teneurs habituelles qu'avec un coefficient $\alpha = 1,5$.

Les valeurs de vibrisses les plus élevées en Pb ($> 130 \text{ mg kg}^{-1}$) sont localisées dans les secteurs très urbanisés ou fortement industrialisés comme la région parisienne ou l'agglomération de Lille et le bassin minier du Nord (figure 8a). Un fort gradient de teneurs en Pb d'origine anthropique autour de la région parisienne avait déjà été montré par Saby *et al.* (2006), en calculant des coefficients d'enrichissement relatif des couches de surface, et en leur appliquant des techniques géostatistiques. On observe également des valeurs de vibrisses élevées en Pb dans certaines régions viticoles (Alsace, Bordelais, Bourgogne, Pays-de-Loire). L'arséniate de plomb a été utilisé dans les vignes par le passé. Le Pb est un

Figure 7 - Variation de la valeur de la vibrisse supérieure en fonction du coefficient α pour chaque ETM pour la couche 0-30 cm (en bleu) et la couche 30-50 cm (en vert)

Figure 7 - Evolution of the value of the upper whisker with the value of coefficient α for each element for the 0-30 cm (blue) and 30-50 cm (green) layers



élément généralement peu mobile, donc qui migre difficilement. Sa présence en profondeur pourrait s'expliquer par les travaux du sol profonds préalables aux plantations de vigne (défoncement). Les valeurs élevées de vibrisses dans les massifs hercyniens (Massifs central et armoricain, Morvan) seraient principalement dues à la présence de Pb d'origine naturelle (Baize, 1997).

Les valeurs les plus élevées de vibrisses en Zn (entre 150 et 200 mg.kg⁻¹) sont situées au niveau des grandes agglomérations comme Paris ou Lille (*figure 8b*). On remarque des valeurs de vibrisses entre 150 et 200 mg.kg⁻¹ pour le Zn en Bretagne qui pourraient être dues à l'épandage d'effluents d'élevage de porcs. On observe les valeurs les plus élevées des vibrisses en Zn dans les massifs hercyniens (Massifs central et armoricain) avec plus de 200 et même 300 mg.kg⁻¹. Ce métal y serait d'origine naturelle. Les valeurs les plus élevées de vibrisses restent modérées pour des seuils d'anomalies extrêmes.

Les grandes agglomérations n'auraient pas d'impact visible concernant les vibrisses du Cu (*figure 8c*). Il ne semble pas y avoir de tendances très marquées excepté dans le Bordelais où les vibrisses dépassent 200 mg.kg⁻¹. Les vibrisses sont aussi un peu plus élevées dans les autres régions viticoles (Alsace, Bourgogne, Pays-de-Loire), ce qui s'expliquerait par l'utilisation des sels de Cu comme antifongique (bouillie bordelaise : sulfate de Cu). Ce résultat était attendu, car l'accumulation du Cu dans les sols viticoles est connue de très longue date (e.g. Delas *et al.* 1960), même si les approches statistiques sur de larges bases de données restent relativement récentes en France (Baize, 1997; Baize *et al.*, 2006a, 2007). Le Cu présent dans la couche 30-50 cm est certainement dû en grande partie au travail du sol profond par défonçage dans les vignes.

Les vibrisses en Cd total sont élevées en région parisienne (supérieures à 1,5 et même 2,0 mg.kg⁻¹) (*figure 8d*). Ces vibrisses sont également élevées (supérieures à 2,0 mg.kg⁻¹) dans certaines régions telles que le Poitou, la Bourgogne ou la Franche-Comté où les sols peuvent être développés sur des calcaires riches en Cd. Ces anomalies naturelles ont déjà été étudiées et signalées (Baize, 1997; Baize *et al.*, 1999).

Les vibrisses en Cd extractibles sont, de manière globale, moins élevées que les vibrisses en Cd total. Néanmoins, les vibrisses élevées sont localisées dans les mêmes secteurs (*figure 8e*): l'agglomération de Paris ainsi que les zones où sont présents les calcaires jurassiques. Les vibrisses dans ces secteurs sont élevées en surface (supérieures à 0,75 et même 1,00 mg.kg⁻¹) et plus faibles en profondeur (de 0,25 à 1,00 mg.kg⁻¹). On observe des vibrisses élevées en Cd extractible autour de l'agglomération lilloise dans la couche de surface.

Une vibrisse élevée n'est pas obligatoirement signe de pollution importante. Cela signifie en général que le 3^e quartile a une valeur élevée donc que les teneurs habituelles sont élevées soit à cause du fond pédogéochimique, soit à cause d'une contamination anthropique, soit par l'addition de ces deux causes. Dans certains cas, des vibrisses élevées peuvent résulter de la méthode et sont

considérées comme des artefacts. En effet, lorsque la surface prise en compte dans le calcul comprend des matériaux parentaux ayant des teneurs très différentes, et en particulier si l'un des matériaux présente des teneurs très faibles, cela induit une distance interquartile forte qui tend à augmenter fortement la vibrisse. Ceci est par exemple le cas en bordure du triangle sableux des Landes de Gascogne dans le cas du Zn.

DISCUSSION

Pourcentage et seuils des valeurs anomaliques

Il existe des gammes de valeurs en teneurs totales en éléments traces calculées au niveau national (Baize, 2000b). Elles permettent d'avoir un ordre de grandeur dans le cas de teneurs ordinaires, d'anomalies naturelles modérées ou de fortes anomalies naturelles. Les gammes de valeurs des vibrisses de cette étude couvrent toutes les gammes de valeurs proposées par Baize et les valeurs de vibrisses les plus élevées correspondent aux fortes anomalies naturelles. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que les vibrisses qui sont calculées ici à partir des données du RMQS détectent soit des anomalies naturelles, soit des contaminations anthropiques, soit une addition de ces deux causes.

Les pourcentages de valeurs anomaliques calculés au niveau national à partir des données de Baize *et al.* (2007) sont similaires à ceux calculés dans cette étude avec la même méthode (vibrisse interne, coefficient $\alpha = 1,5$) (*tableau 3*). Toutefois, le calcul de vibrisses au niveau local, par la prise en compte du contexte local, permet un résultat plus précis que les résultats nationaux. En effet, un site qui serait détecté comme anomalique par rapport aux valeurs nationales peut ne pas l'être avec les résultats locaux dans le cas d'une anomalie naturelle étendue. Par contre, une anomalie ponctuelle sera toujours détectée. En effet, les vibrisses permettent la prise en compte de la tendance faible ou élevée des teneurs habituelles en un ou plusieurs ETM dans un rayon de 50 km. La comparaison d'une valeur ponctuelle dans ce secteur avec la tendance locale permet de déterminer avec beaucoup plus de certitude qu'avec des valeurs nationales s'il existe ou non une anomalie.

Les résultats de ces deux études diffèrent notamment par les bases de données utilisées. La base de données ANADEME de l'étude de Baize *et al.* en 2007 est issue de la collecte des données sur les sols avant épandage de boues de stations d'épuration, initiée par le programme ADEME-INRA. Cette base est constituée d'environ 153 000 valeurs analytiques réparties sur 11 396 sites, plus ou moins renseignés en fonction des éléments. Les prélèvements ont été réalisés entre 1984 et 1998 sur des sites agricoles répartis inégalement sur le territoire national. Les analyses ont été réalisées par différents laboratoires dont les méthodes d'analyse diffèrent. L'avantage de cette base est le grand nombre de sites

Figure 8 - Cartes des valeurs des vibrisses supérieures pour une sélection d'éléments traces totaux et extractibles (vibrisse externe supérieure $\alpha = 3,0$)

Figure 8 - Maps of the outlier values for selected trace elements and for total and extractable concentrations (upper outer fence $\alpha = 3.0$)

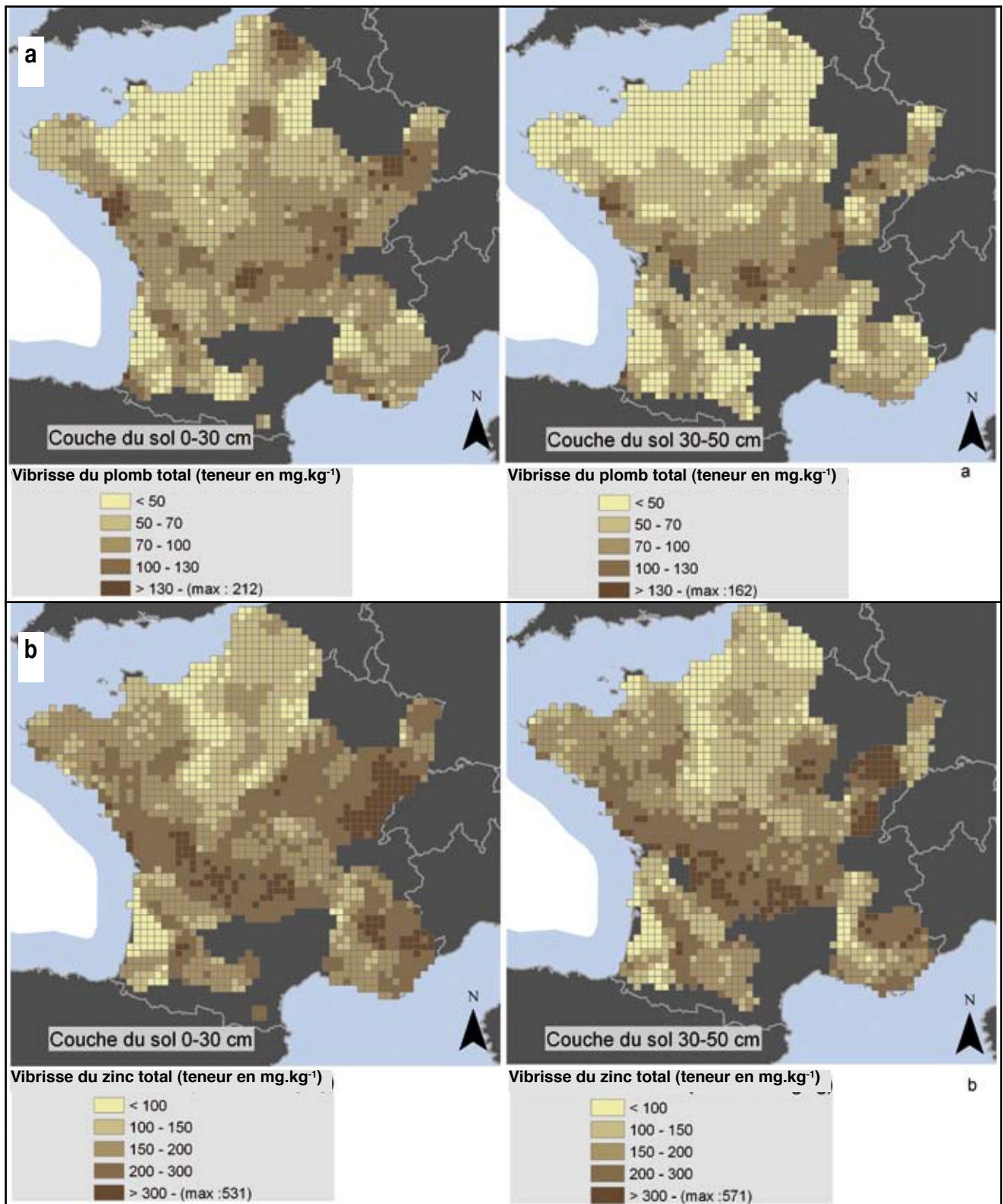


Figure 8 - Cartes des valeurs des vibrisses supérieures pour une sélection d'éléments traces totaux et extractibles (vibrisse externe supérieure $\alpha = 3,0$)

Figure 8 - Maps of the outlier values for selected trace elements and for total and extractable concentrations (upper outer fence $\alpha = 3.0$)

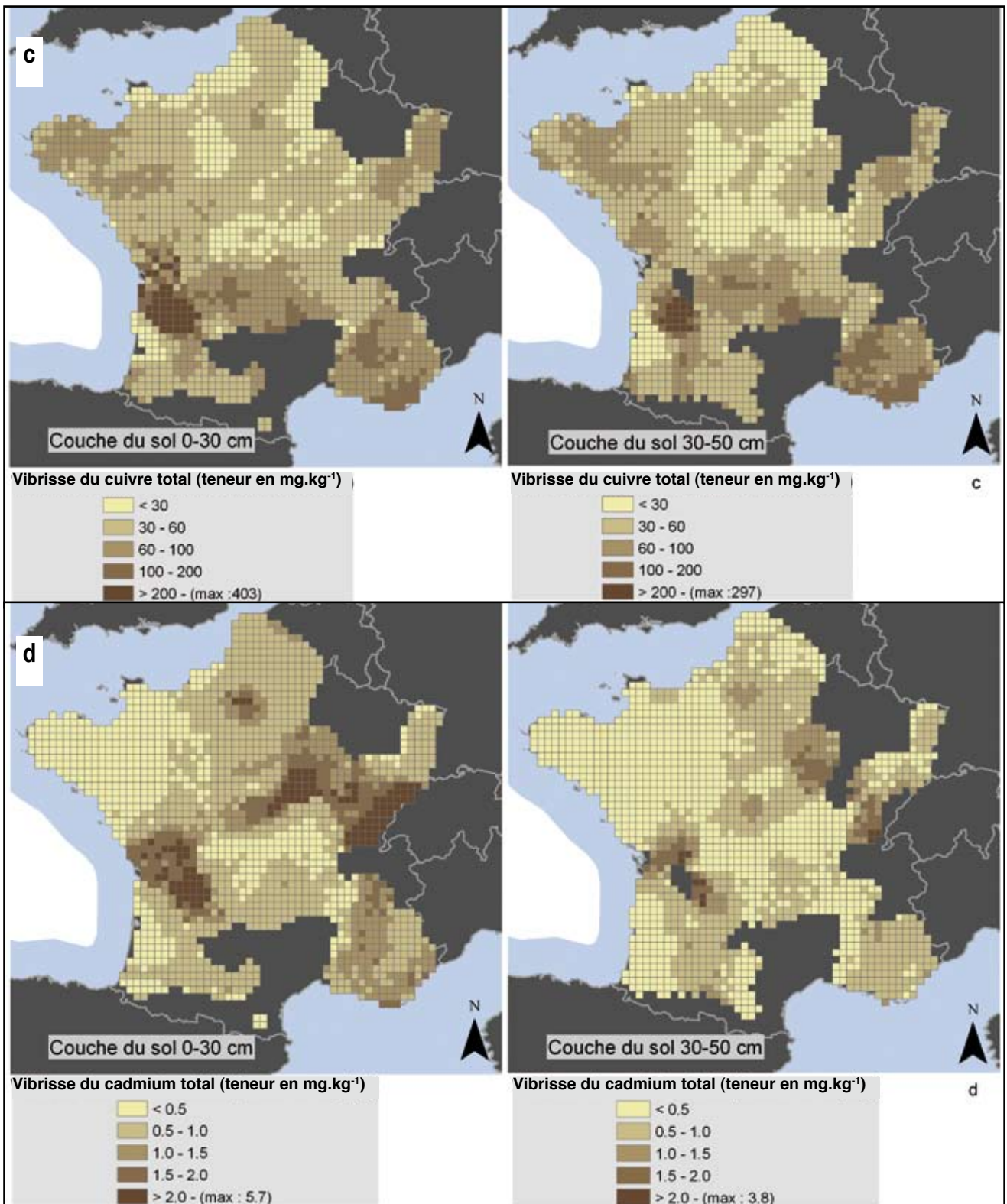
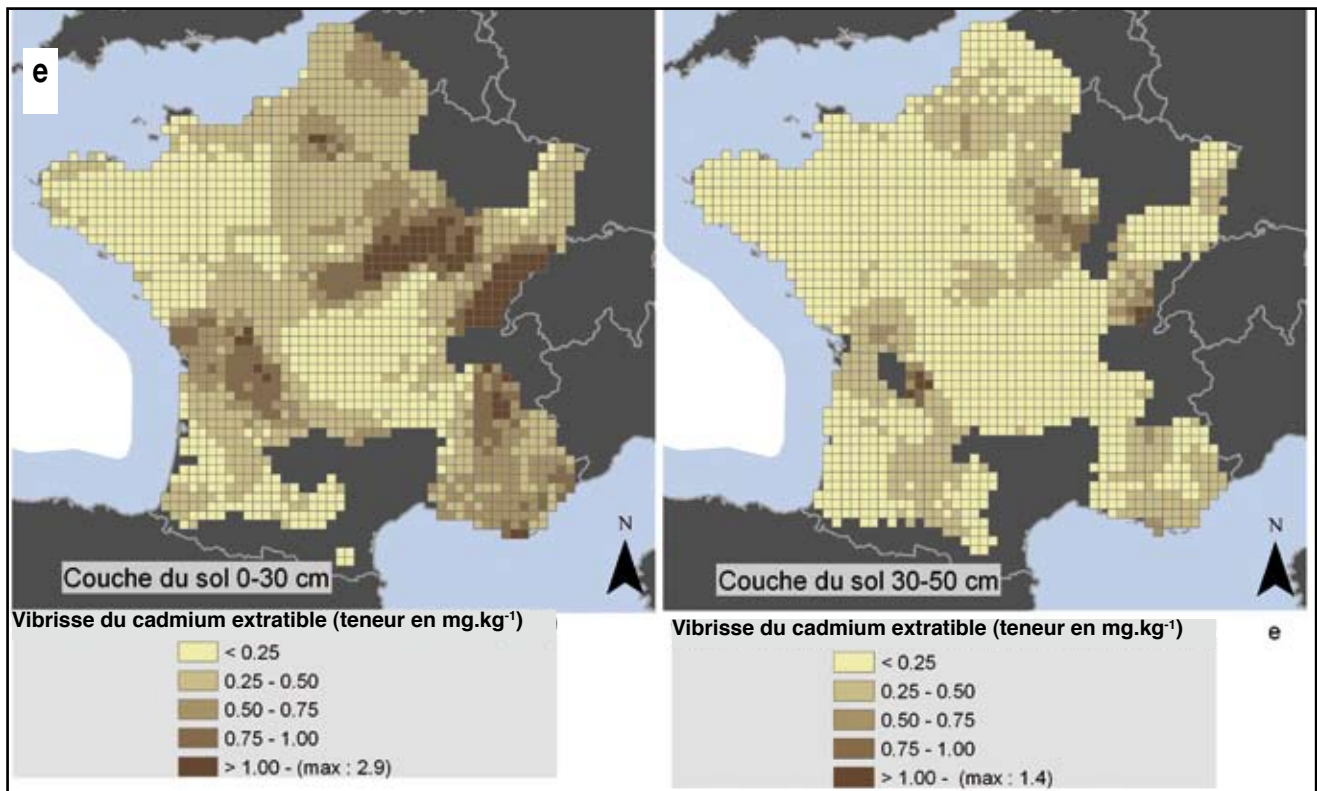


Figure 8 - Cartes des valeurs des vibrisses supérieures pour une sélection d'éléments traces totaux et extractibles (vibrisse externe supérieure $\alpha = 3,0$)

Figure 8 - Maps of the outlier values for selected trace elements and for total and extractable concentrations (upper outer fence $\alpha = 3.0$)



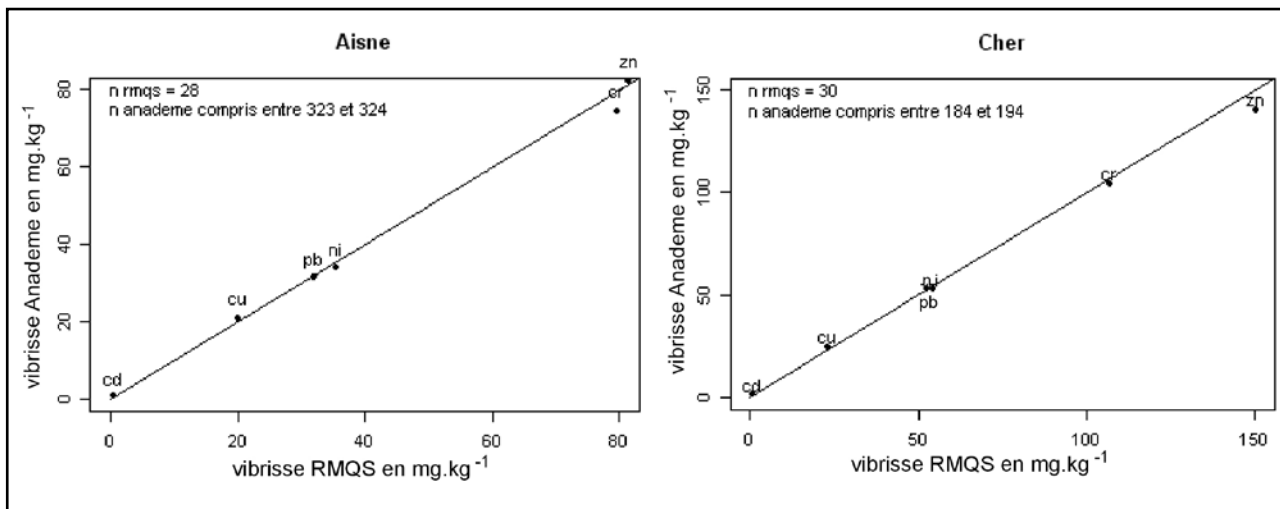
mais elle a aussi certains inconvénients : données hétérogènes sur le plan de l'échantillonnage et des méthodes d'analyse, gamme d'éléments traces analysés restreinte (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn), teneurs mesurées dans les 30 premiers centimètres du sol ne permettant pas de remonter valablement au fond pédogéochimique naturel (Darmendrail *et al.*, 2000). Elle serait plutôt représentative des sols agricoles français. Quant à lui, le RMQS rassemblera à terme seulement 2200 sites (557 sites forestiers et 1 643 sites agricoles, naturels, etc.) et les teneurs mesurées dans les 50 premiers centimètres du sol ne permettent pas non plus de remonter au fond pédogéochimique naturel, mais sa force réside dans la répartition spatiale uniforme des prélèvements sur l'ensemble de la France. Par ailleurs, les analyses sont toutes effectuées par le même laboratoire (INRA d'Arras). De plus, le prélèvement est indépendant du type d'occupation du sol (sauf impossibilité de prélever ou incompatibilité du site en vue des analyses à effectuer). La base du RMQS couvre une plus grande diversité d'occupation et d'usage des couches superficielles des sols français. En revanche, la faiblesse évidente de la base du RMQS est le faible nombre de sites de mesures. C'est pourquoi nous utilisons des statistiques non paramétriques robustes pour traiter ses résultats. Pour juger de l'influence de ce faible nombre de résultats sur l'évaluation des

vibrisses, nous avons comparé les résultats calculés par Baize *et al.* (2007) sur les 31 départements pour lesquels ils ont fourni une estimation, avec la médiane des vibrisses ($\alpha = 1,5$) que nous obtenons pour les cellules RMQS présentes sur ces départements. Les résultats apparaissent du même ordre de grandeur comme par exemple pour les départements de l'Aisne ou du Cher (*figure 9*). Il faut tout de même noter que sur cette figure, nous ne pouvons pas voir de variations du Cd en raison de l'échelle qui est inadaptée à cette gamme de valeur. Néanmoins, elle est adaptée aux valeurs des autres ETM présentés.

D'autres bases de données relatives aux teneurs totales et pseudo-totales en ETM dans les sols existent en France : Aspité (1 200 sites sous agriculture ou sous forêt analysés en surface et en profondeur sur la moitié nord de la France), le référentiel pédogéochimique du Nord Pas de Calais (267 sites sous agriculture ou sous forêt analysés en surface et en profondeur dans le Nord Pas de Calais) et le programme Nicosia (3900 sites sous agriculture et sous forêt analysés en surface en Nord Pas de Calais) elles pourraient être utilisées afin d'établir des seuils d'anomalies plus précis du fait de leur grand nombre de données disponibles mais appliqués à des territoires plus limités (tel que l'ont fait Mathieu *et al.* en 2008 avec Aspité et Anademe).

Figure 9 - Comparaison des vibrisses calculées par Baize *et al.* (2007) par rapport à la médiane par département des vibrisses locales calculées avec le RMQS

Figure 9 - Comparison of whiskers computed by Baize *et al.* (2007) and median local whiskers computed with RMQS data by department.



Limites de la méthode et précautions d'interprétation

La première limite de la méthode est liée au faible nombre de mesures utilisées par rapport à la surface sur laquelle les vibrisses sont calculées. Certaines études recommandent de s'appuyer sur des effectifs beaucoup plus importants dans ce type de démarche (e.g., Baize *et al.*, 2007; Baize, 2008a; Mathieu *et al.*, 2008). Ce défaut lié au faible nombre de mesures est inhérent à la stratégie (et au financement) du RMQS, et il convient d'interpréter les résultats plus comme des indicateurs de tendance que comme des valeurs absolues. Nous avons toutefois vu que la méthode semblait relativement robuste en la comparant à d'autres stratégies.

Les cartes de vibrisses présentées (figure 8) nécessitent de nombreuses précautions d'usage. Tout d'abord, il faut prendre en compte certaines imperfections dues à la méthode. Les vibrisses sont calculées à partir des points qui se trouvent dans un rayon de 50 km avec un minimum de 10 points. En effet, il a été nécessaire de faire un compromis entre le nombre de points utilisés pour le calcul de vibrisse : plus le nombre de points est élevé, plus la vibrisse est robuste. Mais il convient de limiter le rayon de prise en compte des points pour conserver le caractère « local » de la vibrisse. Dans le cas d'un site proche d'une frontière ou de la côte, les points utilisés ne sont pas répartis de manière homogène de part et d'autre du site, ce qui peut biaiser le calcul de vibrisse (« effet de bord »). Pour les frontières terrestres, la prise en compte de données provenant des pays limitrophes pourrait peut-être permettre de contrebalancer ce biais. Toutefois, des difficultés méthodologiques sont prévisibles, dans la mesure où les stratégies d'échantillonnage (tant au plan de la couverture nationale, qu'au

plan de la prise d'échantillon intra-site) différent et que les méthodes analytiques ne sont que très rarement identiques (Morvan *et al.*, 2007, Morvan *et al.*, 2008). Dans le cas où les valeurs utilisées présentent une distribution très étalée (ou même bimodale dans le cas où nous utilisons des sols avec des matériaux parentaux très différents), la Distance Inter Quartile peut être large, ce qui induit une surestimation du seuil d'anomalie.

La faible sensibilité aux valeurs extrêmes est un autre inconvénient de cette méthode, car elle induit un lissage des valeurs. Des valeurs éventuelles à une échelle plus fine que celle de nos cartes ne sont pas perceptibles. Ce défaut est lié à la résolution de la grille du RMQS : les données réparties sur la France de manière systématique sur une grille de 16 x 16 km impliquent que la vibrisse soit calculée pour une surface de 256 km², et ce en se fondant sur une statistique prenant en compte des surfaces de 10 à 30 fois plus vastes. Elle ne prend donc pas en compte les variations liées aux fonds pédogéochimiques ou à des anomalies présentes à une échelle plus fine. La valeur de vibrisse joue donc un rôle d'indicateur de tendance locale et non pas une valeur absolue en un point précis. Toute surface présentant une anomalie naturelle ou anthropique de surface inférieure à la cellule élémentaire du RMQS présente un risque de n'être pas prise en compte dans cette évaluation, en passant au travers de la maille du dispositif.

La technique utilisée ne prend pas en compte une stratification du milieu autrement que par la seule distance. Or il est bien connu (Adriano, 1986; Nriagu et Pacyna, 1988; Alloway, 1990; Baize, 1997) que les teneurs en ETM des sols dépendent à la fois des teneurs originelles contenues dans les matériaux parentaux des sols, de leur évolution sous l'effet de divers processus et des apports anthropiques (usages des sols, pratiques agricoles, dépôts

atmosphériques, etc.). Cette absence de stratification par grands types de déterminants lisse fortement les résultats, et peut conduire à des biais géographiques. A titre d'exemple, l'impact des matériaux calcaires riches en Cd dans le Jura « déborde » sur les zones de plaines adjacentes. A l'inverse, la très faible teneur en Zn des sables des Landes induit un artefact à la limite de ce matériau.

Sous réserve de ces précautions d'usage et dans le cadre d'un diagnostic de la contamination d'un site, les cartographies de valeurs des vibrisses locales en ETM pourront utilement être exploitées. Bien qu'elles n'aient absolument pas pour vocation de se substituer à la réalisation d'un état des lieux ou d'une reconstitution d'un état témoin du site, elles peuvent, à défaut de base de données nationale plus complète, servir comme un outil servant à démontrer la pertinence du diagnostic réalisé ou du référentiel local proposé pour gérer le compartiment sol du site.

Avantages de l'outil et possibilités d'amélioration

Les « artefacts » cités précédemment pourraient être en partie levés sur la base d'une stratification liée au matériau parental, voire aux petites régions agricoles (Baize *et al.*, 2006b, 2007; Mathieu *et al.*, 2008), sous réserve que ces ensembles couvrent une surface suffisante et homogène pour comporter un nombre de sites permettant un calcul robuste. Ceci pourrait être envisagé pour des ensembles relativement vastes, comme par exemple pour les Landes de Gascogne. En revanche, des stratifications fondées sur des ensembles géographiques de surface trop petite au regard de la résolution de la maille du RMQS ne permettraient pas un calcul des vibrisses. Dans certains cas, elles seraient même susceptibles d'apporter un bruit supplémentaire dans la détection de certains gradients de contamination diffuse de large amplitude dont l'origine anthropique est évidente (par exemple, autour de la région parisienne ou dans le Nord-Pas-de-Calais).

Une autre possibilité évidente d'amélioration serait un enrichissement progressif de la base par des données complémentaires, sous réserve que ces dernières soient acquises dans des conditions (profondeurs de prélèvements, méthodes analytiques...) similaires. Un tel enrichissement supposerait une réflexion approfondie sur la stratégie spatiale d'implantation des sites, ainsi que sur les modalités de leur prise en compte spatiale et statistique dans un calcul actualisé.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail constitue la première approche nationale exhaustive de cartographie automatique des limites supérieures des teneurs habituelles en ETM dans les sols sur 1 794 sites, fondée sur des données parfaitement homogènes acquises avec une stratégie d'échantillonnage systématique. La possibilité d'automatiser les calculs permettra une mise à jour régulière des calculs au fur et à

mesure que les résultats des derniers sites du RMQS seront disponibles. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont mis à disposition du public sur le site internet du Gis Sol, via l'outil cartographique de la base de données « Indicateur de la Qualité des Sols » (Indiquasol : <http://indiquasol.gissol.fr/>). Les cartes et les tableaux statistiques seront consultables de manière interactive. Ainsi, par exemple, chaque commune se verra attribuée la valeur de vibrisse de la maille RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) dans laquelle son centroïde est localisé. Cette valeur permettra d'indiquer un seuil de valeur anormale, pour chaque élément trace, qui pourra être utilisé par les acteurs chargés d'étudier et de gérer des situations de contamination ponctuelles, avec les précautions d'interprétation que nous avons recommandées.

Le principal avantage de la méthode que nous présentons réside dans la simplicité de mise en œuvre et la facilité de mise à jour. D'autres techniques plus élaborées et non automatisables seront prochainement appliquées à ces données. Les modèles généralisés à effet mixte (Lark *et al.*, 2004, Rawlins *et al.*, 2005) par exemple, devraient permettre de mieux séparer et modéliser les effets respectifs des matériaux parentaux et de la contamination diffuse sur les teneurs habituelles.

REMERCIEMENTS

Le RMQS est un programme financé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (MEEDDAT-IFEN, MAP, INRA, ADEME, IRD). Nous remercions également l'ensemble des partenaires régionaux de ce programme. Nous sommes reconnaissants envers Sophie Leguëdois, Francis Douay et Denis Baize pour leur lecture critique et constructive d'une première version de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Adriano DC., 1986 - Trace elements in the terrestrial environment. Springer Verlag, New York, NY. 533 p.
- Alloway BJ. 1990 - Heavy metals in soils. John Wiley & Sons, New York, NY. 339 p.
- Baize D. 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Editions, Paris, 410 p. .
- Baize D., Deslais W., Gaiffe M., 1999 - Anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France, Etude et Gestion des Sols, 8 (2), pp. 85-104.
- Baize D., 2000b - Teneurs totales en « métaux lourds » dans les sols français. Résultats généraux du programme ASPITET. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA. 39, pp. 39-54.
- Baize D., Tercé M., coord., 2002 - Les éléments traces métalliques dans les sols, approches fonctionnelles et spatiales. INRA Editions, Paris, 549 p + annexes.
- Baize D., Sterckeman T., 2004 - Importance de la détermination du fond pédogéochimique pour évaluer la pollution des sols par les métaux. L'exemple du site de Dornach. Bulletin Société Suisse de Pédologie, Bodenkunliche Gesellschaft der Schweiz, 27, pp. 63-68.
- Baize D., Saby N., Walter C., 2006a - Le cuivre extrait à l'EDTA dans les sols de

- France. Probabilités de carences et de toxicités selon la BDAT. *Etude et Gestion des Sols*, 13 (4), pp. 259-268.
- Baize D., Saby N., Deslais W., Bispo A., Feix I., 2006b - Analyses totales et pseudo-totales d'éléments en traces dans les sols. Principaux résultats et enseignements d'une collecte nationale. *Etude et Gestion des Sols*, 13 (3), pp. 181-200.
- Baize D., Deslais W., Saby N., 2007 - Teneurs en huit éléments traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France. Résultat d'une collecte de données à l'échelon national. Rapport final. ADEME. Angers, convention 0375 C0035 - 84 - http://www.gissol.fr/programme/bdetm/_rapport_anademe/rapport/contents.php.
- Baize D., 2008a - Cadmium in soil and cereal grains after sewage-sludge applications on French soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, sous presse.
- Baize D., 2008b - Éléments traces dans les sols : ne plus parler de « bruit de fond ». *Environnement et technique*, 181, pp. 25-30.
- Darmendrail D., Baize D., Barbier J., Freyssinet P., Mouvet C., Salpêtre I., Wavrer P., 2000 - Fond géochimique naturel : État des connaissances à l'échelle nationale. BRGM/RP-50158-FR. Disponible sous : <http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/documents/diagnostic/RP-50158-FR.pdf>. 95 p.
- Delas J., Delmas J., Demias C., 1960 - Etude par dilution isotopique du cuivre incorporé dans les sols depuis 70 ans. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 250, pp. 3867-3869.
- Jolivet C., Boulonne L., Ratié C., 2006a - Manuel du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, édition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p.
- Jolivet C., Arrouays D., Boulonne L., Ratié C., Saby N., 2006b - Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS). Etat d'avancement et premiers résultats. *Etude et Gestion des Sols*, 13 (3) : pp. 149-164.
- Juste C., 1989 - Mobilité et biodisponibilité des oligo-éléments. Dans « Les oligo-éléments et le sol ». 2es journées de l'analyse de terre. GEMAS. Ed. Frontières, pp 5-15.
- Lark RM., CullisBR., 2004 - Model-based analysis using REML for inference from systematically sampled data on soil, *European Journal of Soil Science*, 55, pp. 799-813.
- 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*, 7 (2), pp. 112-122.
- MEEDDAT 2007 - Note ministérielle du 8 février 2007 relative Sites et sols pollués - Modalité de gestion et de réaménagement des sites pollués. <http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr>.
- Morvan X., Richer de Forges A., Arrouays D., Le Bas C., Saby N., Jones R.J.A., Verheijen F., Bellamy P., Kibblewhite M., Stephens M., Freudenschuss A., Strauss P., Spiegel H., Verdoodt A., Goidts E., Colinet G., Sleutel S., Sishkov T., Kolev N., Penizek V., Kozak J., Balström T., Penu P., Köster T., Jolivet C., Baritz R., Kosmas C, Berényi Úveges J., Becher G., Renaud JP, Arnoldussen AH., Pavlenda P., Neville P., Michopoulos P., Herzberger E, Simonic P., Fay D., Buivydaite VV., Karklins A., Camilleri S., Sammut S., Higgins A., Jordan C., Rutgers M, Niedzwiecki J, Stuczynski T, Da Conceição Goncalves M., Dias Mano R., Simota C., Lilly A., Hudson G., Kobza J., Zupan M., Simo Josa I., Olsson M., Lilja H., 2007 - Une analyse des stratégies d'échantillonnage des réseaux de surveillance de la qualité des sols en Europe. *Etude et Gestion des Sols*, 14 (4), pp. 317-326.
- Morvan XPP., Saby NPA., Arrouays D., Le Bas C., Jones R.J.A., Verheijen F.G.A., Bellamy P.H., Stephens M., Kibblewhite M.G., 2008 - Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. *Sci. Tot. Env.*, 391, pp. 1-12.
- Nriagu JO., Pacyna JM., 1988 - Quantitative assessment of worldwide contamination of the air, water and soils with trace metals. *Nature (London)*, 333 : pp. 134-139.
- Saby N., Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Pochot A., 2006 - Geostatistical assessment of lead in soil around Paris, France. *Sci. Tot. Env.* 367, pp. 212-221.
- Tukey JW. 1977 - *Exploratory data analysis*. Addison Wesley, Reading, Massachusetts.
- Rawlins BG., Lark RM., Webster R., O'Donnel KE., 2005 - The use of soil survey data to determine the magnitude and extend of historic metal deposition related to atmospheric smelter emissions across Humberside, UK. *Environmental Pollution*, 143 (3), pp. 416-426.

PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

Revue

Science du Sol

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.
Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.
A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

La Lettre de L'Association

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales ; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : J.P. Rossignol, ENITH, Angers.

Etude et Gestion des Sols

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef : M. Jamagne.

Secrétariat de rédaction : Micheline Eimberck et J.P. Rossignol.

Le Comité éditorial est composé de trente membres de France et de pays francophones.

Ouvrages

Le Livre Jubilaire (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

Fonctionnement hydrique et comportement du sol (1984)

PODZOLS et podzolisation

par D. Righi et A. Chauvel : ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

Micromorphologie des sols/Soil micromorphology

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

Carte mondiale des sols et sa légende (1984)

Présentée sous forme numérique.

Le Référentiel Pédologique

Principaux sols d'Europe, deuxième édition 1995.
Ouvrage collectif publié par l'AFES et l'INRA.

Synthèse nationale des analyses de terre : Période 1990-1994

par C. Walter, C. Schwartz, B. Claudot, P.-Aurousseau et T. Bouedo, avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Actes du XVI^e Congrès Mondial de Sciences du Sol, Montpellier - Août 1998