

Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne

D. Baize et H. Paquereau

Science du Sol - I.N.R.A. - Orléans. - Domaine de Limère - 45160 Ardon

RÉSUMÉ

A l'occasion de plans d'épandage de boues de stations d'épuration urbaines, la norme AFNOR NF U 44 041 rendue d'application obligatoire, exige l'analyse préalable de 8 éléments traces dans l'horizon labouré du sol agricole où est envisagé l'épandage. Prenant l'exemple du département de Seine-et-Marne, secteur soumis à une forte "pression" de la part de l'agglomération parisienne toute proche, cet article montre comment on peut traiter cette masse de données "dormantes" et quelles connaissances peuvent en être extraites facilement, malgré l'imperfection de l'échantillonnage.

La population étudiée correspond à une entité administrative, le département. Malgré la multiplicité des sols et matériaux parentaux rassemblés dans cette population, des traitements simples ont permis de distinguer une sous-population de "sols limoneux", de proposer des "seuils de contamination" et de faire apparaître des secteurs légèrement contaminés par des pratiques d'épandage déjà anciennes (composts d'ordures ménagères).

Mots clés

Sol agricole, éléments traces, contamination, Seine-et-Marne

SUMMARY

CONCENTRATIONS OF TRACE ELEMENTS IN THE AGRICULTURAL SOILS OF SEINE-ET-MARNE (France)

The French norm AFNOR NF U 44 041 requires the compulsory analysis of eight trace metals in the topsoil before spreading sewage sludge on any agricultural parcel. Several thousands of these expansive data remain unprocessed throughout France.

The department of Seine-et-Marne is very close to Paris and its suburbs, hence submitted to a strong pressure from this urban area. This paper takes this departement as an example. It shows how to process a large set of unutilized data and what interesting knowledge can be easily drawn from, in spite of a very imperfect sampling pattern.

The dataset studied was built up on the basis of an administrative unit and consequently gathers various types of soil and parent materials. Simple processings allowed us to distinguish a sub-population of silty topsoils, to propose thresholds for assessing low-level contamination in them and to delimit some areas slightly contaminated by old spreadings of household refuse composts.

Key-words

Agricultural soils - trace elements - contamination - Seine-et-Marne.

RESUMEN

CONTENIDO TOTAL EN ELEMENTOS TRAZA EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS DE SEINE-ET-MARNE - FRANCIA

En el cuadro de los planes de esparcimiento de los lodos de estaciones de depuración urbanas, la norma AFNOR NF U 44041 de aplicación obligatoria, exige el análisis previo de 8 elementos traza en el horizonte labrado del suelo agrícola donde está previsto el esparcimiento. Tomando el ejemplo del departamento de Seine-et-Marne, sector sometido a una fuerte presión de parte del conjunto parisino cercano, este artículo muestra como se puede tratar esta masa de datos acumulados y que conocimientos pueden ser extraídos fácilmente, a pesar de la imperfección del muestreo.

La población estudiada corresponde a una entidad administrativa, el departamento. A pesar de la multiplicidad de suelos y de materiales de origen reunidos en esta población, tratamientos simples permitieron de distinguir una subpoblación de «suelos limosos», de proponer «niveles de contaminación» y de hacer aparecer sectores ligeramente contaminados por prácticas de esparcimiento ya viejas (compost de basuras familiares).

Palabras claves

Suelo agrícola, elementos traza, contaminación, Seine-et-Marne.

A l'occasion de plans d'épandage de boues de stations d'épuration urbaines, la norme AFNOR NF U 44 041 rendue d'application obligatoire, exige l'analyse préalable de 8 éléments traces dans le sol agricole où est envisagé l'épandage ou, plus exactement, dans l'horizon labouré de ce sol. Dans certains départements situés à proximité immédiate de l'agglomération parisienne, les tonnages de boues à épandre sont considérables, d'où la multiplication des plans d'épandages et la réalisation d'un grand nombre d'analyses. Ces chiffres sont juste confrontés aux valeurs-seuils "sols" de la norme NF U 44-041 et les coûteuses informations ainsi recueillies ne sont pas véritablement exploitées ni valorisées.

Cet article montre comment on peut traiter cette masse de données "dormantes" et quelles connaissances peuvent en être extraites facilement, malgré l'imperfection de l'échantillonnage. A priori, trois objectifs pouvaient être visés : - l'estimation des fonds pédo-géochimiques locaux ou régionaux; - la détection d'éventuelles anomalies naturelles; - le constat de l'état "normal" des sols agricoles avant la réalisation de grandes campagnes d'épandage de boues. Cet état normal correspond au fond pédo-géochimique augmenté d'apports volontaires gérés à la parcelle (engrais, amendements) et de retombées atmosphériques d'origine plus ou moins lointaine.

Cet article reprend l'essentiel d'un travail de fin d'étude de maîtrise (Paquereau, 1996) réalisé à l'unité INRA de Science du Sol à Orléans-Ardon.

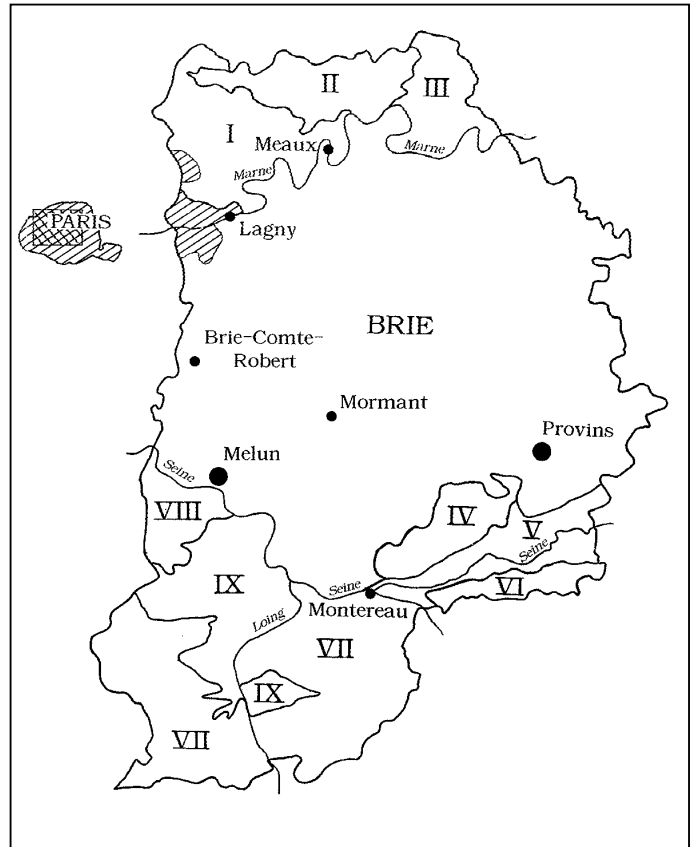
Le cadre géographique et administratif

Le département de Seine-et-Marne, sur sa lisière occidentale, est directement accolé à l'agglomération parisienne (figure 1). Celle-ci n'arrête pas de se développer vers l'est, sous la forme de "villes nouvelles", telles que Melun-Sénart, Marne-la-Vallée, etc. A Brie-Comte-Robert, par exemple, on se trouve à seulement 26 km de Notre-Dame de Paris. C'est pourquoi des tonnages croissants de boues d'épuration sont produits à proximité ou dans les principales localités de l'ouest du département, d'où une forte demande de terrains agricoles pour épandre ces boues.

Pour le département de Seine-et-Marne, plus de 450 analyses de "sols" ont été réalisées, sur quatre années, de 1992 à 1995. Ces données analytiques ont été collectées par M. Delaporte (Conseil Général - Division de l'Eau et de l'Environnement) qui nous les a aimablement

Figure 1 - Les petites régions naturelles de Seine-et-Marne (Roque, 1995). I = Pays de France - II = Multien et Goële - III = Orxois - IV = Montois - V = "Bassée" - VI = Champagne sénonaise - VII = Gâtinais - VIII = Pays de Bière - IX = Forêt de Fontainebleau.

Figure 1 - The small natural regions in Seine-et-Marne.



communiquées.

Le cadre géologique et pédologique (Roque, 1995)

La Seine-et-Marne est presque au centre du Bassin de Paris. Après le dépôt de la craie sénonienne, le bassin s'est comporté comme un golfe marin peu profond et a connu une série de cycles sédimentaires qui ont conduit aux dépôts minces et variés détaillés ci-dessous.

Les couches les plus anciennes sont constituées par la craie blanche à silex (Campanien) qui n'affleure qu'à l'extrémité sud-est du département en Champagne Sénonaise et en Bassée. Viennent ensuite successivement l'argile plastique et les sables grossiers du Sparnacien surtout présents sur le plateau de Nemours dans le Gâtinais; les sables de Cuise et le calcaire grossier du Lutétien dont les affleurements sont très localisés en bordure d'entailles (vallées de la Seine, de la Marne, du Petit et du Grand Morin); les formations sableuses de Beauchamps et d'Auvers très peu représentées; le cal-

caire de Saint-Ouen formant la plate-forme du Multien au nord; les marnes et calcaires de Champigny et de Château-Landon (Ludien) présents surtout vers l'est; le calcaire de Brie et son altération paléo-pédologique en "argile à meulière" (Sannoisien) faciès très développés qui forment le substrat des sols limoneux couvrant les deux tiers du département; enfin les formations stampiennes, sables et grès de Fontainebleau, recouverts localement dans le Gâtinais par les calcaires d'Étampes et de Beauce.

Actuellement, les limons quaternaires recouvrent régulièrement la plupart des plateaux du département. Le degré d'engorgement des sols est étroitement lié à la plus ou moins grande proximité d'une couche imperméable en profondeur (argile à meulière le plus souvent). Les formations calcaires ou sableuses n'affleurent que sur les versants des principales vallées ou de grandes zones d'érosion (sables de Fontainebleau).

Le contexte géo-pédologique général est donc celui de sédiments marins tertiaires et de limons loessiques, à l'exclusion de toute zone fortement minéralisée.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les échantillons étudiés

Sélection et nature des sites échantillonnés

Rappelons qu'il s'agit exclusivement de sols cultivés et des horizons de surface. Étant donné l'objectif (trouver des terrains convenant à des épandages de boues), il s'agit presque toujours de sols de plateaux (au sens large de ce terme) ou situés sur des pentes faibles (pour éviter les ruissellements) dans des secteurs franchement agricoles ou des terrains cultivés au voisinage immédiat des villes nouvelles. Le deuxième critère était en effet de minimiser les distances entre la station d'épuration et les terrains récepteurs, le troisième de trouver des agriculteurs acceptant de "recycler" ces déchets.

L'échantillonnage a été le plus souvent réalisé selon la méthode du prélèvement agronomique de terre (plusieurs carottes rassemblées en un échantillon composite) par des agents de bureaux d'études.

Si nous connaissons bien la localisation des parcelles échantillonnées, nous n'avons en revanche aucune information relative au type de sol ni à la nature de la roche-mère. Des cartes pédologiques de reconnaissance à 1/200 000 ou 1/100 000 existent par ailleurs qui peuvent nous aider (Roque, 1995, 1997) mais insuffisamment précises pour pouvoir connaître avec certitude le type de sol par un simple positionnement du prélèvement. Ces cartes montrent cependant que les sols limoneux plus ou moins fortement lessivés en argile et

en fer (LUVISOLS DÉGRADÉS, LUVISOLS TYPQUES RÉDOXIQUES, NÉOLUVISOLS) s'étendent très largement sur les plateaux de la Brie et du Multien.

Répartition géographique

Tous les échantillons traités ont pu être convenablement localisés sur des cartes à 1/25 000 et leurs coordonnées Lambert saisies sur un SIG. Leur répartition spatiale est irrégulière : ils sont très majoritairement situés dans la moitié ouest du département et souvent regroupés autour de certaines localités (Brie-Comte-Robert, Lagny, Mormant, Meaux, Lizy-sur-Ourcq) ou chez certains groupes d'exploitants (figure 19).

Laboratoire d'analyse - Méthodes analytiques

445 échantillons ont été analysés par le Laboratoire d'Analyse des Sols INRA d'Arras. 6 proviennent du laboratoire Y. 3 analyses proviennent d'un laboratoire indéterminé que nous appellerons X. Les méthodes analytiques employées pour le dosage des éléments traces figurent en annexe.

On notera que les deux laboratoires cités ci-dessus mettent en oeuvre des méthodes de mise en solution différentes quoique toutes deux normalisées (normes AFNOR X 31-147 et X 31-151). Il est cependant notoire que l'extraction à l'eau régale ne dissout pas tous les minéraux silicatés. En introduction, la norme NF X 31-151 explique d'ailleurs que "dans le cas de matériaux à structure silicatée, il est impératif d'utiliser la méthode à l'acide fluorhydrique si on veut connaître la quantité de métaux liée à ces structures". Sauf cas exceptionnels, la plupart des sols français contiennent une notable proportion de silicates : la majeure partie de la fraction "argile" et une part non négligeable des fractions "limons" (feldspaths et micas).

Données disponibles

Pour respecter les instructions de la norme NF U 44-041, 8 éléments traces ont été analysés : Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn. Les concentrations seront exprimées en mg/kg de matière sèche (teneurs relatives à la "terre fine" < 2 mm).

Données analytiques et nombre de valeurs disponibles :

	nb		
Cd	= 432	Ni	= 429
Cr	= 428	Pb	= 430
Cu	= 434	Se	= 385
Hg	= 424	Zn	= 439

Autres données analytiques et nombre de valeurs disponibles :

- granulométrie (sans décarbonatation) 5 fractions =	383
- carbone organique (méthode Anne modifiée) =	454
- pH eau =	454

- capacité d'échange cationique (CEC) méthode Metson =	255
- calcaire total (calcimétrie) =	454
- fer total (extraction HF) =	32

Méthodes statistiques

Des méthodes graphiques et statistiques courantes ont été employées (cf. ci-dessous). Cependant, la "personnalisation" de chaque échantillon est toujours possible et peut être utile pour interpréter certaines teneurs mesurées.

La méthode de récapitulation des données dite "exploratory data analysis" (EDA) (Tukey, 1977) a été utilisée. La "vibrisse supérieure" ("upper whisker") est définie comme la valeur correspondant à 1,5 fois l'intervalle interquartile ajouté à la valeur du quartile supérieur. Toutes les valeurs de la variable étudiée supérieures à cette "vibrisse" sont des "upper outliers" ou "valeurs aberrantes" supérieures. Symétriquement, il existe une "vibrisse inférieure" et, éventuellement, des "valeurs aberrantes" inférieures ("lower outliers"). D'après McGrath et Loveland (1992), cette approche est d'un grand intérêt en recherche géochimique. Elle ne repose pas sur des hypothèses de normalité mais seulement sur la structure inhérente des données et montre plusieurs avantages importants, par exemple la description claire de l'étendue et de la dissymétrie des données ou l'identification objective des "valeurs aberrantes". L'expérience des géochimistes britanniques a montré qu'en employant ces méthodes on faisait ressortir facilement les relations entre les mesures chimiques et les traits géographiques ou géologiques.

Les matrices de corrélations ont été réalisées à l'aide du logiciel Statgraphics. Ne seront présentées que les corrélations significatives au seuil de 1 %.

Spécificités de la population rassemblée

La population des échantillons disponibles présente des spécificités que nous allons évoquer ci-dessous, notamment des insuffisances qui vont limiter les possibilités de traitement des données et d'interprétation.

Points positifs :

- nombreuses données (454 horizons - 3401 valeurs numériques);
- informations complémentaires utiles fournies par les données granulométriques - de teneur en carbone - de taux de calcaire - de CEC (3564 valeurs numériques complémentaires);
- coordonnées géographiques des sites prélevés connues;
- analyses provenant presque toutes d'un même laboratoire, méthodes d'analyses utilisées normalisées (sauf pour Se et Hg);
- prélèvements réalisés sur une période courte de quatre ans, permettant une photographie presque instantanée de l'état des sols;
- prélèvements effectués avant les campagnes d'épandages

de boues.

Obstacles à l'interprétation des résultats :

- association dans une même population de sols très variés, de toutes granulométries, calcaires ou non, développés à partir de diverses roches et formations superficielles, originaires de différentes régions naturelles;
- aucun renseignement sur le type de sol ni indication sur la nature des matériaux sous-jacents; absence de cartes pédologiques détaillées;
- aucune connaissance analytique des autres horizons non situés en surface;
- presque jamais d'analyse du fer total, qui est pourtant le meilleur élément de référence (Baize, 1997);
- échantillonnage biaisé, privilégiant les sols de plateau et de grande culture de l'ouest du département, au détriment des sols de versants et de vallées;
- tous les "sols" prélevés ont subi des apports d'éléments traces liés aux activités agricoles, plus ou moins importants selon la nature, l'intensité et la durée des pratiques antérieures, lesquelles nous restent totalement inconnues.

Terminologie : contamination et pollution. Valeurs "suspectes"

Dans le langage courant, ces deux mots sont souvent employés indifféremment pour désigner l'accumulation anormale, presque toujours due aux activités humaines, d'éléments minéraux, organiques ou de pathogènes dans un milieu donné. Le comité technique ISO/TC 190 a refusé de les définir, se limitant à constater le désaccord entre les spécialistes des diverses disciplines et des différents pays.

D'après Juste (in Juste et al., 1995), le terme "contamination" doit être employé pour les sols pour désigner l'accroissement notable de la concentration d'un composé sans préjuger de la modification de la qualité qui peut en résulter. En revanche, le terme "pollution" permet de désigner l'accumulation d'un composé en quantité telles que sa présence peut revêtir un danger pour les organismes vivants ou compromettre une ou plusieurs grandes fonctions du sol.

Dans cet article, le mot "contamination" sera donc employé lorsque sera observée une augmentation notable des teneurs en éléments traces par rapport au fond pédo-géochimique régional. Tant qu'on ne peut pas raisonner véritablement par type de sol, et déterminer le fond pédo-géochimique naturel local au cas par cas, on est obligé de considérer des populations. Nous verrons que certaines teneurs semblent anormalement fortes, par rapport à des relations naturelles générales à l'échelle régionale. D'où la notion de seuil de contamination. Pour des valeurs intermédiaires pour lesquelles il n'y a aucune certitude, nous proposons la notion de valeurs "suspectes" (c'est-à-dire soupçonnées de résulter d'une faible contamination) et la notion de "seuils de suspicion".

Terminologie : fond pédogéochimique local

La concentration en tel ou tel élément trace mesurée aujourd'hui dans un horizon de sol résulte d'abord et principalement de l'héritage reçu de la roche-mère (fond géochimique local), plus ou moins modifié ensuite par les processus de pédogenèse (fond pédogéochimique local) et augmenté éventuellement des différents apports liés aux activités humaines.

En conséquence, nous proposons la définition suivante. Le "fond pédogéochimique naturel local" est la concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique.

TENEURS TOTALES OBSERVÉES

Sur 454 horizons analysés, 14 sont calcaires (dont seulement 11 avec plus de 23 % de CaCO_3). Les taux d'argile s'échelonnent de 8,2 à 44,8 % avec une médiane à 19,5 %. 80 % des valeurs sont comprises entre 14,8 et 27,1 % d'argile. 6 horizons seulement contiennent plus de 35 % d'argile. Les textures limoneuses et limono-sableuses sont très largement dominantes.

Les taux de carbone organique sont compris entre 0,80 et 3,58 % (médiane = 1,67). Les CEC s'échelonnent entre 3,0 et 28,6 centimole +/kg (médiane = 10,6). Les pH varient au maxi-

um entre 5,0 et 8,5 (1er décile = 6,2; médiane = 7,3; neuvième décile = 8,0).

Le tableau 1 présente la structure de la population pour les 8 éléments traces analysés.

Les "outliers" supérieurs

Ils sont nombreux pour tous les éléments sauf Ni et Cr. Ceci peut résulter d'une part de la très grande hétérogénéité de la population (aux plans de la granulométrie, du type de matériau, du type de pédogenèse, etc.) ou bien d'une assez forte contamination en Cu, Pb, Zn, Hg occasionnant ainsi des "anomalies anthropiques". Ces deux hypothèses ne sont pas contradictoires et peuvent se combiner.

Les "outliers" inférieurs

Contrairement à ce qui est observé habituellement (McGrath et Loveland, 1992; Baize, 1997), il apparaît quelques "valeurs aberrantes" inférieures (8 pour Cr, 1 pour Pb et 2 pour Zn. L'existence de sols naturellement très pauvres en ces éléments pourrait être une explication mais faire appel aux actions humaines n'est plus possible. Parmi les 8 "valeurs aberrantes" inférieures qui apparaissent pour le chrome, 2 correspondent à des sols sableux acides à faible CEC, naturellement pauvres en éléments traces. Les 6 autres cas correspondent à des analyses réalisées après attaque par l'eau régale et non par l'association $\text{HF} + \text{HClO}_4$. Il en va de même pour le seul "outlier" inférieur du Pb (9,8 mg/kg). Les deux "valeurs aberrantes" inférieures pour le zinc correspon-

Tableau 1 - Sols agricoles de Seine-et-Marne. Concentrations mesurées dans l'horizon de surface labouré.

Table 1 - Agricultural soils in Seine-et-Marne. Concentrations obtained in the ploughed surface layer.

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Se
(nb valeurs)	(432)	(427)	(433)	(428)	(429)	(438)	(424)	(385)
vibrisse inférieure	0,01	21,9	< 0	1,6	10,4	26	< 0	0,04
nb "outliers" inf.	0	8	0	0	1	2	0	0
minimum	0,09	19,8	4,8	6,2	9,8	22	< 0,02	0,08
1er décile	0,15	33,8	8,7	13,1	21,7	44	0,04	0,13
médiane	0,23	48,2	13,5	20,2	26,8	57	0,06	0,19
9e décile	0,37	64,3	23,9	29,9	43,9	79	0,19	0,28
maximum	1,80	98,9	57,7	47,4	107,0	352	1,36	1,13
vibrisse supérieure	0,46	74,4	28,4	39,7	46,4	90	0,18	0,36
nb "outliers" sup.	15	7	27	2	35	23	47	13
échantillon n°397	0,55	55,5	420	44,3	213	520	0,70	-
seuils norme NF U44-041	2,0	150	100	50	100	300	1	10
nb valeurs > seuils	0	0	0	0	1	1	1	0
norme NF U44-041								

dent à des sols sableux et sablo-limoneux de la région de Perthes et La-Chapelle-la-Reine (sables de Fontainebleau). Donc certains échantillons à la fois assez pauvres en Cr et Pb et analysés après attaque par ce réactif incapable de dissoudre tous les silicates, apparaissent comme des "valeurs aberrantes" inférieures.

L'échantillon n° 397

Cet échantillon est très particulier (tableau 1). Ce prélèvement, réalisé tout près de Montereau et de granulométrie limono-sableuse, est "valeur aberrante" supérieure pour 6 des 7 éléments analysés et les valeurs mesurées pour Cu, Pb et Zn sont tout à fait considérables, sans commune mesure avec les autres teneurs observées aussi bien dans la population générale que pour les 7 autres analyses réalisées sur la même exploitation agricole. Dans un tel contexte pédo-géologique de sol limono-sableux développé dans un "loess" (LP de la carte géologique), une anomalie géochimique naturelle est peu vraisemblable, une pollution multi-élémentaire ponctuelle est très probable dont cependant nous ignorons complètement l'origine. Étant donné son caractère de pollution notoire, cet échantillon a été retiré des traitements statistiques ultérieurs.

RELATIONS BI-VARIABLES

Principe - Recherche d'un élément de référence

La visualisation graphique de telles relations est à la portée de tous les logiciels et de toute personne. Les diagrammes sont aisés à comprendre et à interpréter. Il a été montré que le fer est l'élément de référence le plus intéressant vis-à-vis des métaux traces car il présente de nombreux avantages (Baize, 1997). Il est en effet coloré et son abondance est aisément repérable à l'œil sur le terrain, en outre c'est un bon indicateur des processus d'altération, d'illuviation et d'hydromorphie dans les sols. Enfin, il est dosé dans la même solution d'extraction que la plupart des métaux traces pour un coût minime. En ce qui concerne notre population seine-et-marnaise, cette donnée n'est disponible que pour seulement 32 échantillons. Il va donc falloir trouver un autre élément de référence. Les travaux réalisés dans le cadre du programme Aspitet (Baize, 1997) ont montré que, faute de disposer des teneurs en fer, on pouvait se référer aux teneurs en argile ou à celles du nickel, les sols étant très rarement contaminés par ce métal.

A l'examen de la figure 2 on voit qu'il y a une relation

Figure 2 - Ensemble de la population. Relation nickel/argile. - Entourés : 6 horizons assez fortement calcaires.

Figure 2 - The whole population. Relationship between nickel and clay content. Surrounded : 6 markedly calcareous samples.

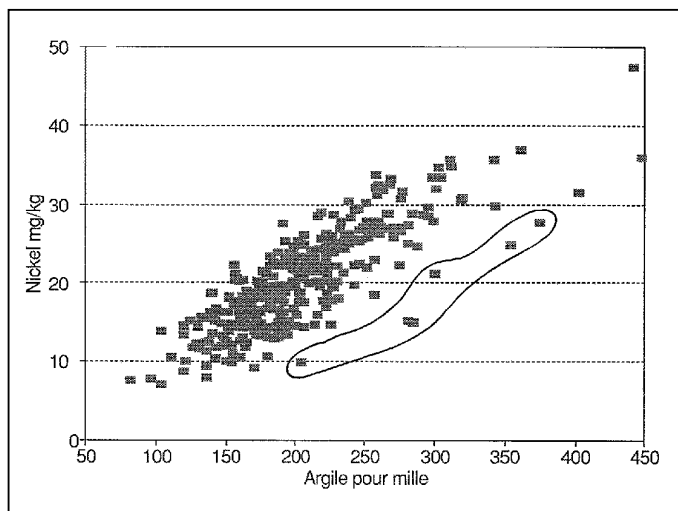


Figure 3 - Ensemble de la population. Relation chrome/argile. - Entourés d'un trait continu : 7 échantillons assez fortement calcaires. Entourés par un tireté : 6 échantillons analysés après attaque à l'eau régale.

Figure 3 - The whole population. Relationship between chromium and clay content. Surrounded with a continuous line : 7 markedly calcareous samples. Surrounded with a dotted line : 6 samples digested with aqua regia.

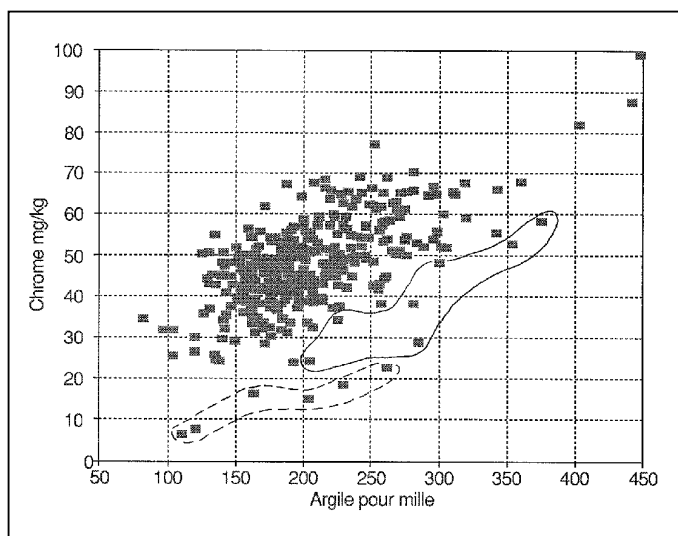


Figure 4 - Ensemble de la population. Relation chrome/nickel.
Entourés par un tireté : 6 échantillons analysés après attaque à l'eau régale.

Figure 4 - The whole population. Relationship between chromium and nickel. Surrounded with a dotted line : 6 samples digested with aqua regia.

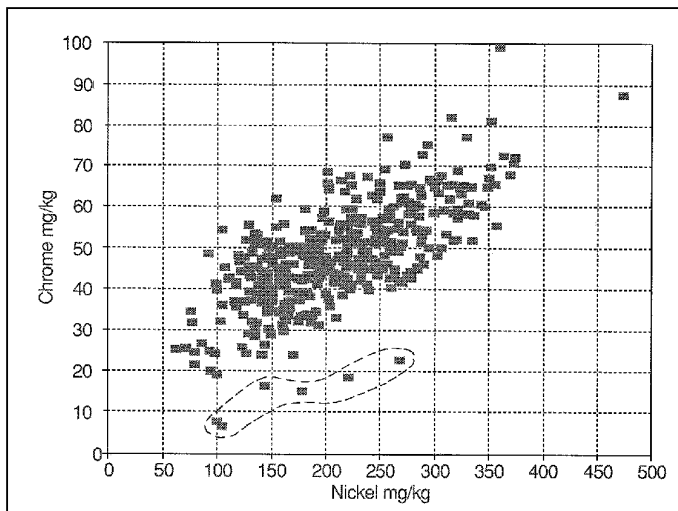
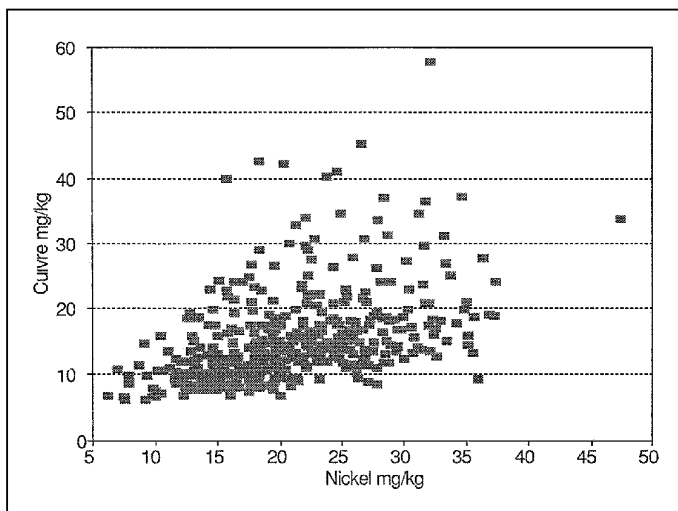


Figure 5 - Ensemble de la population. Relation cuivre/nickel.

Figure 5 - The whole population. Relationship between copper and nickel.



globale hautement significative entre les teneurs en nickel et les teneurs en argile ($r = 0,81$). En outre, il n'apparaît pas de contaminations évidentes en nickel dans cette population. 6 valeurs nettement détachées vers le bas sous le nuage principal correspondent à des horizons nettement calcaires (plus de 23 %), le calcaire agissant comme un diluant. En effet, dans le cas des sols calcaires, il a été montré (Baize, 1997) qu'il y avait une relation inverse entre les taux de calcaire et les teneurs en tous les éléments traces, et que la décarbonatation pédogénétique progressive provoquait automatiquement l'accroissement des teneurs pondérales en éléments traces, au même titre que le fer ou l'argile.

A l'examen de la figure 3, il paraît évident qu'il existe une forte relation générale entre le chrome et la teneur en argile ($r = 0,61$). Il n'apparaît pas de contaminations évidentes en chrome. Les valeurs nettement détachées vers le bas sous le nuage principal correspondent à deux catégories : 7 horizons assez fortement calcaires et les 6 horizons analysés après mise en solution à l'eau régale ("outliers" inférieurs évoqués précédemment).

La figure 4 montre que la relation Ni/Cr est hautement significative ($r = 0,68$) mais également que les 6 valeurs obtenues après attaque à l'eau régale sortent complètement du nuage de points, vers les basses teneurs de chrome.

La relation nickel/argile n'est pas affectée par le mode de mise en solution employé par le laboratoire d'analyse tandis que les relations chrome/argile et chrome/nickel le sont nettement. Il semble donc que les teneurs obtenues pour le chrome en utilisant l'eau régale sont très inférieures à celles obtenues par l'acide fluorhydrique. La même observation a été faite récemment, par comparaison entre deux populations de sols identiques, analysés selon les deux méthodes (sols argileux de la Plaine de la Lys - Nord - rapport non publié). Un tel constat n'implique aucun jugement critique sur la qualité des laboratoires.

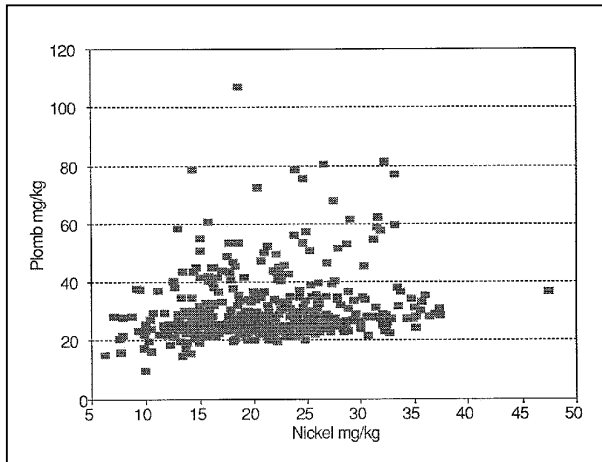
Nous ne disposons pas toujours des granulométries (383 seulement). Comme la relation argile/nickel est hautement significative ($r = 0,81$), le nickel dont nous connaissons la teneur pour 429 horizons, nous servira d'élément de référence.

Relations éléments traces/nickel

Les figures 5 à 10 présentent les relations Cu/Ni, Pb/Ni, Zn/Ni, Cd/Ni, Se/Ni et Hg/Ni.

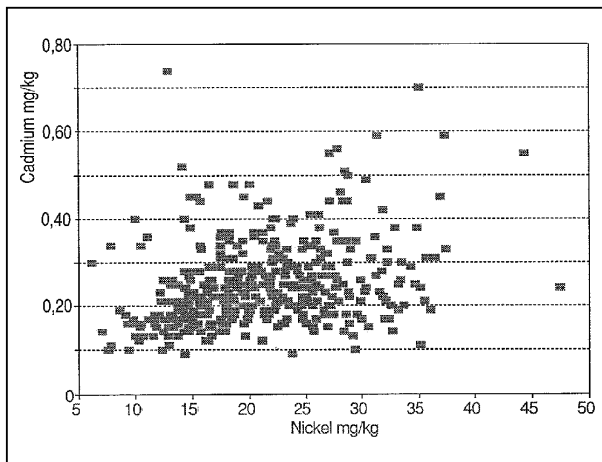
La teneur en cuivre est proportionnelle à celle en nickel (et donc à la teneur en argile) mais il y a bon nombre

Figure 6 - Ensemble de la population. Relation plomb/nickel.
 Figure 6 - The whole population. Relationship between lead and nickel.



d'échantillons qui semblent déjà nettement contaminés (valeurs

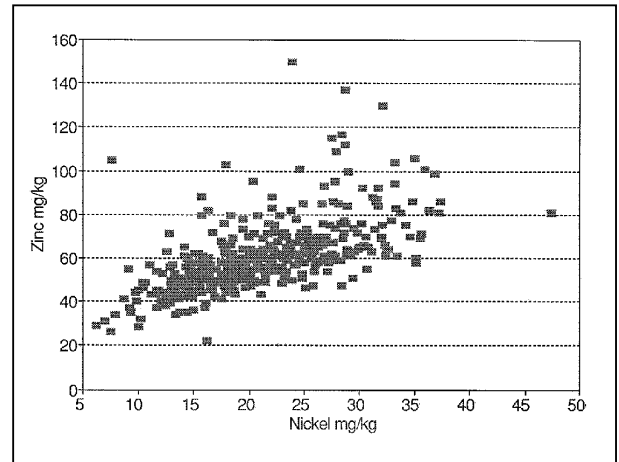
Figure 8 - Ensemble de la population. Relation cadmium/nickel.
 Figure 8 - The whole population. Relationship between cadmium and nickel.



> 30 mg/kg), d'autres peuvent être suspectés de faibles contaminations (valeurs > 20 mg/kg).

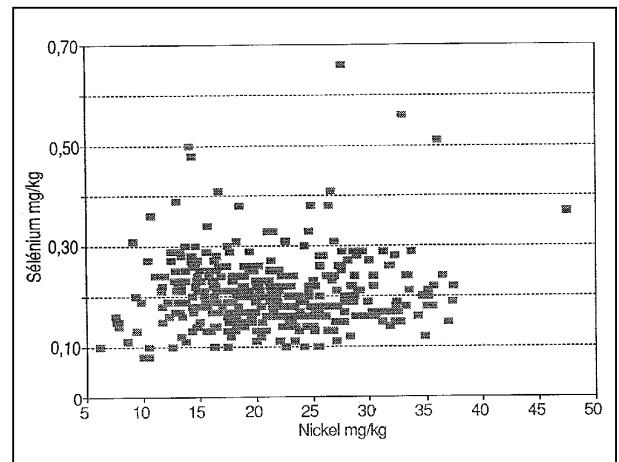
On peut faire les mêmes remarques pour Zn et Pb qui montrent également des teneurs globalement proportionnelles à celles du nickel, avec en outre de nombreuses valeurs qui s'éloignent beaucoup de ces relations (vers le haut) et qui correspondent certainement à des sols déjà plus ou moins contaminés, avant même les campagnes d'épandages de boues des années 1994, 95 et 96.

Figure 7 - Ensemble de la population. Relation zinc/nickel.
 Figure 7 - The whole population. Relationship between zinc and nickel.



Il ne semble pas y avoir une nette relation entre le cadmium

Figure 9 - Ensemble de la population. Relation sélénium/nickel.
 Figure 9 - The whole population. Relationship between selenium and nickel.



et le nickel mais la figure 8 montre bien que peu de concentrations en cadmium excèdent 0,30 mg/kg. Au delà de 0,40 mg/kg les valeurs paraissent correspondre à des contaminations franches.

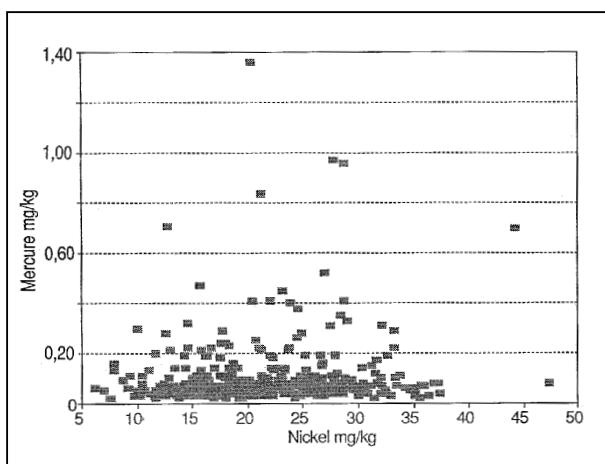
En ce qui concerne le sélénium (figure 9), rares sont les valeurs qui excèdent 0,30 mg/kg et il est clair qu'il n'y a aucune relation avec la teneur en nickel (ni donc avec le taux d'argile). Pour le mercure (figure 10), il en va de même, un seuil de suspicion peut être fixé, un peu arbitrairement, à 0,20 mg/kg.

CORRÉLATIONS

La matrice de corrélation (tableau 2) nous apporte des confirmations de ce qui avait été déjà pressenti. Les corrélations

Figure 10 - Ensemble de la population. Relation mercure/nickel.

Figure 10 - The whole population. Relationship between mercury and nickel.



tions entre des variables non affectées par les contaminations anthropiques sont élevées, par exemple :

- Ni/A (r = 0,81)
- Ni/CEC (r = 0,77)
- Cr/CEC (r = 0,63)
- Cr/A (r = 0,61)
- Cr/Ni (r = 0,68).

Alors que les corrélations entre une variable non affectée par des contaminations et une autre variable affectée sont faibles (ou même il n'apparaît pas de corrélation), par exemple :

- Ni/Cu (r = 0,31)
- A/Cu (r = 0,06)
- Ni/Pb (r = 0,25)
- Cr/Zn (r = 0,15)

En revanche, lorsque les deux éléments sont à la fois proportionnels naturellement et s'avèrent des co-contaminants des quelques sols modérément contaminés, le coefficient de corrélation est à nouveau fort élevé :

- Pb/Cu (r = 0,78)
- Zn/Cu (r = 0,80)
- Pb/Zn (r = 0,64)
- Hg/Pb (r = 0,53)

Dans le même ordre d'idées, on constate que Hg n'est corrélé qu'à Cu, Zn et Pb, les trois contaminants principalement

Tableau 2 - Sols de Seine-et-Marne. Matrice des corrélations. 454 horizons de surface. 11 variables. 255 valeurs de CEC, 385 valeurs de sélénium et 383 valeurs de taux d'argile. Ne sont indiquées que les corrélations significatives au seuil de 1 %

Table 2 - Soils of Seine-et-Marne. Correlation matrix for 454 surface layers. 11 variables. 255 values only of CEC, 385 values only of selenium and 383 values of clay content.

	A	CEC	C	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Hg	Se
CEC	0.96	1									
C	0.16	0.48	1								
Cu			0.55	1							
Zn	0.18	0.23	0.61	0.80	1						
Cr	0.61	0.63	0.19	0.13	0.15	1					
Ni	0.81	0.77	0.29	0.31	0.41	0.68	1				
Pb		0.19	0.68	0.78	0.64		0.25	1			
Cd	0.17	0.17	0.22	0.15	0.24		0.24	0.15	1		
Hg			0.27	0.37	0.39			0.53		1	
Se	0.23	0.46	0.57	0.19		0.29		0.34			1
	A	CEC	C	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	Hg	Se

mis en cause.

Le tableau 2 nous permet aussi de définir deux familles de variables :

- A, CEC, Cr, Ni d'une part fortement corrélés entre eux,
- Pb, Cu, Zn et C d'autre part,
- enfin Hg est fortement corrélé à Pb et Se au carbone.

Conclusions intermédiaires

Par ces approches bi-variables, il semble que plusieurs échantillons montrent des concentrations en certains éléments traces relativement fortes par rapport à leur teneur en nickel. Ces concentrations peuvent donc être soupçonnées de résulter de contaminations liées à des activités humaines. Plusieurs séries de raisons nous incitent à faire appel à des actions humaines et à écarter la possibilité d'anomalies naturelles. D'abord nous nous trouvons à proximité immédiate de l'agglomération parisienne et dans un secteur d'agriculture relativement intensive. Paris et ses banlieues peuvent avoir été source de retombées atmosphériques abondantes et d'apports de divers déchets urbains, et ce, depuis des décennies. En revanche, le contexte géologique et pédologique de roches sédimentaires et de limons loessiques n'est pas en faveur d'anomalies d'origine naturelle. En tout état de cause, nous ne disposons pas d'analyses faites sous forêts qui pourraient constituer une population de référence de sols peu touchés par les actions humaines.

La population générale que nous venons d'étudier rassemble des sols probablement trop divers pour que des conclusions puissent être tirées avec certitude.

ÉTUDE D'UNE SOUS-POPULATION DE "SOLS LIMONEUX"

La sélection de cette sous-population a été opérée sur les conditions granulométriques et chimiques suivantes : A < 22,0 % - LF > 20,0 % - LG > 35,0 % - SF < 10,0 % - SG < 9,0 % et CaCO₃ = 0. De cette façon, ont été sélectionnés 162 horizons, franchement limoneux et pour lesquels la fraction limons grossiers (LG) domine nettement la fraction limons fins (LF), ce qui est une particularité granulométrique des "limons loessiques" du Bassin parisien au sens le plus large. Il s'agit d'horizons de surface éluviaux de LUVISOLS Dégradés ou de LUVISOLS TYPHIQUES RÉDOXIQUES de Brie et également de NÉOLUVISOLS et LUVISOLS TYPHIQUES du Multien. Tous ces sols sont développés dans des "limons des plateaux" quaternaires. Des sols limoneux plus ou moins colluvionnés font peut-être partie de cet ensemble mais pas les LUVISOLS TRONQUÉS dont les horizons de surface ont plus de 22 % d'argile.

Les taux d'argile s'échelonnent de 12,5 à 21,9 % avec une médiane à 18,2 %.

Éléments traces - Concentrations mesurées (tableau 3)

Les gammes en éléments traces sont nettement plus resserrées que pour la population générale. On n'observe plus de valeurs aberrantes inférieures et il y a beaucoup moins de valeurs aberrantes supérieures que pour la population entière. Cette sous-population est granulométriquement et pédologiquement beaucoup plus homogène, elle l'est donc aussi obligatoirement au plan géochimique.

Les figures 11 à 16 ont été établies pour ces 162 horizons

Tableau 3 - Sols non calcaires de Seine-et-Marne à horizons de surface franchement limoneux. Concentrations en éléments traces mesurées.

Table 3 - Non calcareous soils of Seine-et-Marne with silty surface layers. Trace element concentrations measured.

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Se
(nb valeurs)	(157)	(154)	(157)	(156)	(153)	(159)	(153)	(137)
minimum	0,12	34,8	6,8	9,2	19,8	38	0,02	0,10
1er décile	0,16	39,4	9,1	13,6	22,2	48	0,04	0,14
médiane	0,23	47,8	13,1	18,7	26,4	56	0,07	0,21
9e décile	0,37	56,1	26,4	23,8	45,1	78	0,22	0,28
maximum	1,80	68,5	42,5	29,0	78,6	150	1,36	0,41
vibrisse sup.	0,44	64,1	28,0	31,8	45,8	76	0,20	0,36
nb outliers sup.	7	6	12	0	13	13	18	2
nb > seuils	0	0	0	0	0	0	1	0
norme NF U44-041								

Figure 11 - Population de 162 horizons limoneux non calcaires. Relation cuivre/nickel.

Figure 11 - Sub-population of 162 non calcareous silty surface horizons. Relationship between copper and nickel.

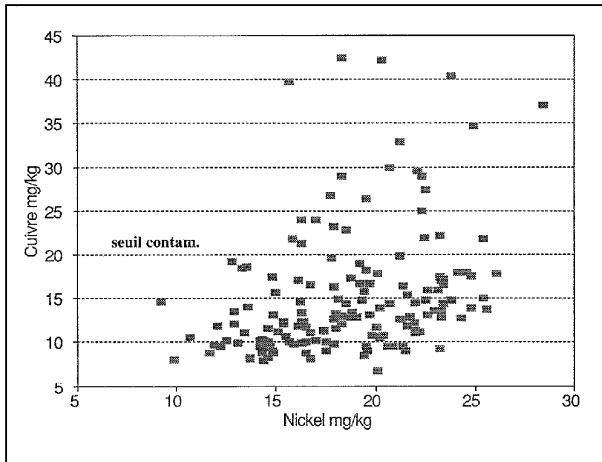


Figure 12 - Population de 162 horizons limoneux non calcaires. Relation chrome/nickel.

Figure 12 - Sub-population of 162 non calcareous silty surface horizons. Relationship between chromium and nickel.

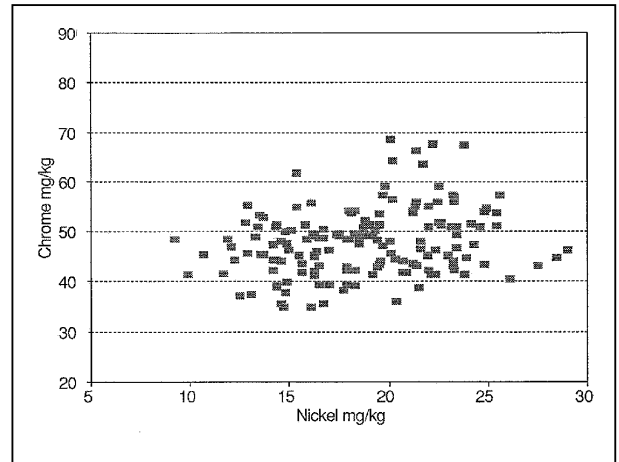


Figure 13 - Population de 162 horizons limoneux non calcaires. Relation zinc/nickel.

Figure 13 - Sub-population of 162 non calcareous silty surface horizons. Relationship between zinc and nickel.

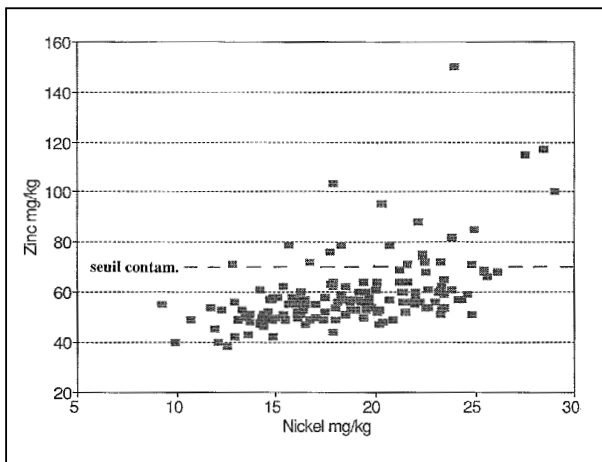
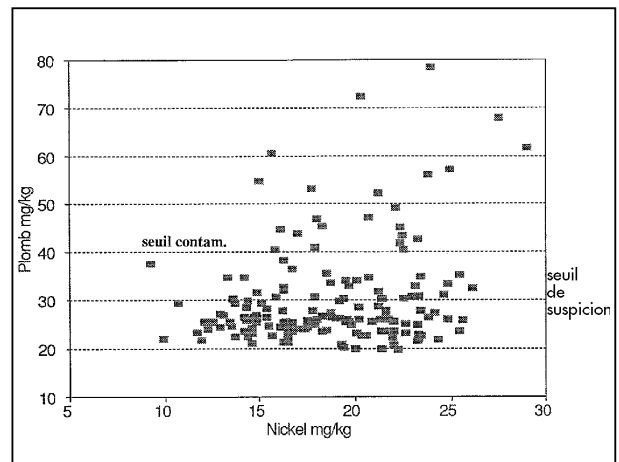


Figure 14 - Population de 162 horizons limoneux non calcaires. Relation plomb/nickel.

Figure 14 - Sub-population of 162 non calcareous silty surface horizons. Relationship between lead and nickel.



limoneux non calcaires. Grâce à leur examen attentif on peut proposer des seuils au-delà desquels il y a suspicion ou quasi-certitude de contamination anthropique (). Dans ce tableau, le nickel ne figure pas (puisque pris comme élément de référence) et aucune contamination en chrome ou en sélénium n'est flagrante. On notera au passage que les valeurs-seuils que nous proposons comme correspondant à des contaminations nettes sont encore fort éloignées des seuils "sols" de la norme AFNOR NF U 44-041.

Remarque : étant donné qu'il existe une relation positive Cu/Ni et Zn/Ni, il

serait plus logique de tracer des seuils de suspicion et de contamination parallèles à l'axe d'allongement du nuage (donc obliques) pour ces deux métaux.

Si on étudie l'identité des horizons jugés comme nettement contaminés selon les seuils du tableau 4, on constate que, parmi les 23 horizons de surface contaminés par le plomb, 15 seraient également contaminés par le zinc, 17 par le cuivre et 5 par le mercure (mais aucun par Cd ou Se). Parmi les 6 horizons contaminés par le mercure, 5 seraient également contaminés par le zinc, 5 par le cuivre et 4 par le plomb. On

Figure 15 - Population de 162 horizons limoneux non calcaires. Relation cadmium/nickel.

Figure 15 - Sub-population of 162 non calcareous silty surface horizons. Relationship between cadmium and nickel.

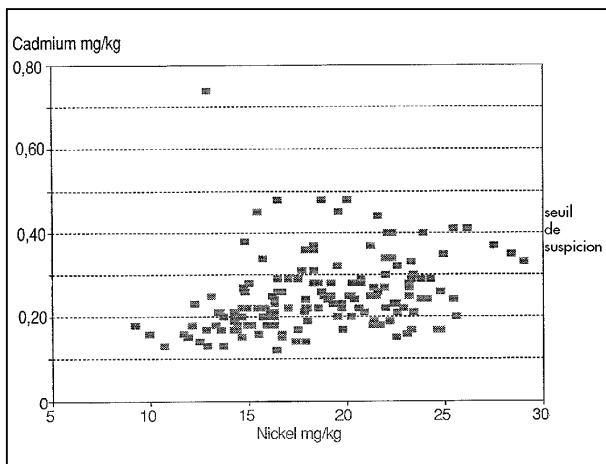


Figure 16 - Population de 162 horizons limoneux non calcaires. Relation mercure/nickel.

Figure 16 - Sub-population of 162 non calcareous silty surface horizons. Relationship between mercury and nickel.

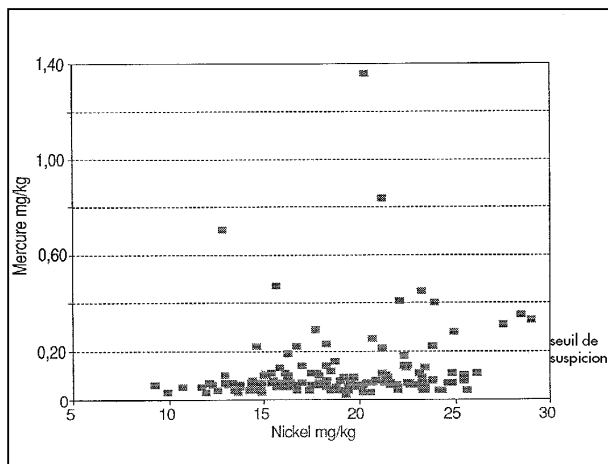


Figure 17 - Population de 162 horizons limoneux non calcaires. Relation cuivre/zinc.

Figure 17 - Sub-population of 162 non calcareous silty surface horizons. Relationship between copper and zinc.

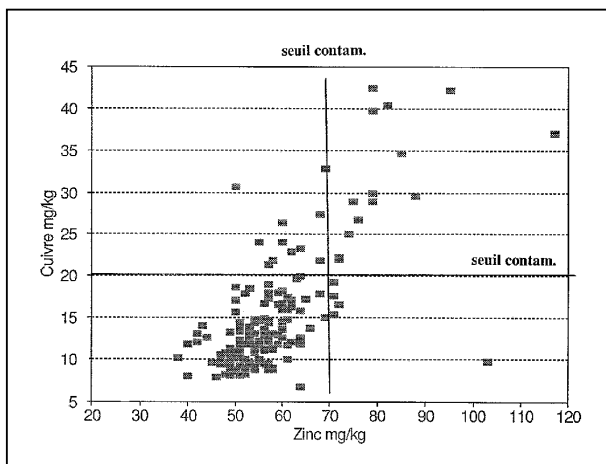
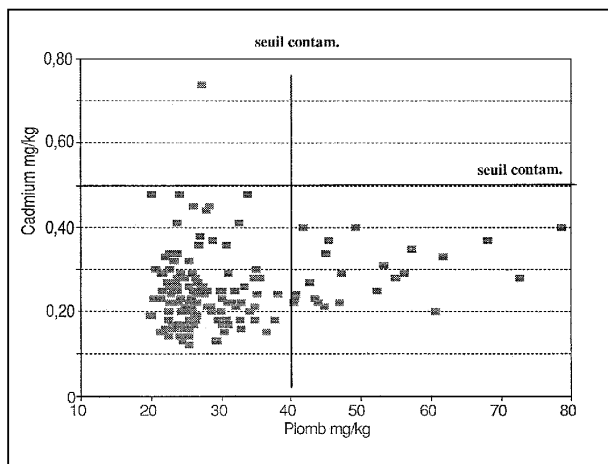


Figure 18 - Population de 162 horizons limoneux non calcaires. Relation cadmium/plomb.

Figure 18 - Sub-population of 162 non calcareous silty surface horizons. Relationship between cadmium and lead.



voit donc qu'il s'agit le plus souvent de contaminations multi-élémentaires (Cu + Zn + Pb ou Cu + Zn + Pb + Hg), ce qui pourrait bien correspondre à des apports de boues ou de déchets.

La figure 17 présente la relation entre cuivre et zinc. Parmi les 25 horizons qui seraient contaminés en cuivre, 14 seraient aussi contaminés en zinc. Parmi les 19 horizons contaminés en zinc, 14 seraient également contaminés en cuivre. Sur la figure 18 on voit qu'aucun des 23 échantillons considérés

comme contaminés en plomb n'excède la teneur en cadmium de 0,40 mg/kg et que le seul échantillon contaminé en Cd ne présente rien d'anormal pour Pb.

En revanche, parmi les 10 horizons dont les teneurs en cadmium excèdent 0,40 mg/kg, aucun ne dépasse les seuils de contamination proposés pour Cu, Zn, Pb, Hg ou Se. Ainsi, les quelques teneurs faiblement anormales en cadmium seraient liées à des pratiques locales de fertilisation (phosphates) et pas à des contaminations multi-élémentaires comme

celles résultant d'apports de boues ou déchets (Baize, 1996a).

Conclusions intermédiaires - Sources possibles de contamination

Des contaminations viennent d'être mises en évidence dans la sous-population limoneuse comme dans la population générale.

Ces contaminations pourraient résulter de deux sources. D'une part, on sait que des épandages de boues urbaines ont été pratiqués anciennement dans toute la région parisienne, dès la fin des années 70, particulièrement les boues de la station d'Achères, très chargées en métaux traces à cette époque et surtout en cadmium. Des épandages de composts d'ordures ménagères bruts ont également eu lieu. Dans ces deux premiers cas, la contamination doit être à la fois multi-élémentaire et localisée à telle ou telle parcelle ou exploitation agricole mais non étendue à la totalité d'une surface. Un troisième cas de figure serait une contamination localisée autour d'une source ponctuelle, par exemple une usine ou une installation d'incinération. Dans un tel cas, la contamination doit être continue, doit affecter la totalité d'une superficie et être centrée sur cette source.

Ainsi, en l'absence d'une enquête approfondie auprès des agriculteurs, seule la répartition spatiale des concentrations jugées suspectes de contaminations pourra fournir des arguments supplémentaires.

APPROCHE SPATIALE

Huit cartes d'estimation des teneurs en éléments traces ont

Tableau 4 - "Seuils de suspicion" et "seuils de contamination" proposés pour la population de 162 horizons de surface limoneux, non calcaires.

Table 4 - «Suspicion thresholds» and «contamination thresholds» proposed for the population of 162 non calcareous silty surface layers.

	seuil de suspicion	seuil de contamination	nb d'horizons > seuil de contamination
Cd	0,40	0,50	2
Cr	60	70	0
Cu		20	25
Pb	30	40	23
Zn		70	22
Hg	0,20	0,40	6
Se	0,30	0,50	0

été réalisées, par la technique d'interpolation par krigeage. Celle du zinc a été sélectionnée pour être présentée ici, comme étant la plus parlante (figure 19).

On constate d'abord que les points de mesures ne sont pas régulièrement répartis : presque absents dans la partie est et sud du département, trop agglomérés dans la partie nord et ouest (agriculteurs ou groupements d'agriculteurs ayant accepté d'épandre des boues).

Quelques artifices, liés à la méthode d'interpolation, doivent être soulignés. D'une part apparaissent des "puits" artificiels, ne s'appuyant sur aucune valeur mesurée, par exemple dans le secteur de la Forêt de Fontainebleau. Ces zones où la teneur en zinc est estimée comme très faible résultent de la continuation de plu-

Tableau 5 - Calcul hypothétique des apports dus à des épandages de composts d'ordures ménagères brutes dans les années soixante. Niveaux de contamination consécutifs. On fait l'hypothèse que tous les apports sont demeurés dans l'horizon de surface.

Table 5 - Hypothetical calculation of trace element inputs due to spreading of raw domestic refuse composts during the sixties. Consequent contamination levels. The hypothesis was made that all the inputs have remained in the ploughed surface layer.

Composition moyenne hypothétique des composts	
Cu = 900 mg/kg m.s.	
Zn = 1 300 mg/kg m.s.	
Pb = 960 mg/kg m.s.	
Apportée à raison de 3 épandages sur 10 ans de 25 t m.s./ ha, soit 75 t/ha au total	
Dans un horizon de surface labouré limoneux pesant 3 900 t/ha contenant naturellement avant épandages	
Cu = 15 mg/kg	
Zn = 55 mg/kg	
Pb = 25 mg/kg	
Ces 3 épandages constituent un apport de	Soit une augmentation de :
Cu = 67,5 kg/ha	+ 17 mg/kg
Zn = 97,5 kg/ha	+ 25 mg/kg
Pb = 72,0 kg/ha	+ 18,5 mg/kg
Teneurs dans l'horizon de surface labouré, après épandages :	
Cu = 32 mg/kg	
Zn = 80 mg/kg	
Pb = 43,5 mg/kg	

sieurs gradients décroissants. Inversement, il apparaît également des "pics", tout aussi factices, par exemple à proximité immédiate de Montereau (en jaune sur la figure 19).

Il ressort cependant 4 zones à concentrations en zinc nettement anormales ($Zn > 70$ mg/kg - teintes jaunes, roses, rouges et violacées). Ce sont :

- le Pays de France, à l'extrémité nord-ouest du département;
- un secteur de la vallée de la Marne compris entre Lizy-sur-Ourcq, Trilport, La Ferté-sous-Jouarre et Sainte Aulde;
- le secteur de Brie-Comte-Robert et de Moissy-Cramayel, à la limite ouest du département;
- un secteur au nord de Mormant, un peu à l'est du précédent, en pleine Brie.

Ces 2 dernières zones d'anomalies hautes en zinc et clairement suspectes de contaminations se retrouvent également très nettement sur les cartes d'estimation du cuivre et du plomb (non présentées).

Après enquête, nous avons eu confirmation que des épandages de composts d'ordures ménagères brutes avaient eu lieu tout au long des années soixante, notamment dans la région de Brie-Comte-Robert. Ces "gadoues", en provenance de l'agglomération parisienne, étaient épandues à proximité des points de débarquements : particulièrement les gares de Brie-Comte-Robert, Moissy-Cramayel, Coubert et Mormant. Le tableau 5 présente des calculs hypothétiques relatifs aux apports occasionnés par de tels épandages et aux concentrations en Cu, Zn et Pb avant et après épandages dans un horizon labouré d'un sol limoneux. On voit que 3 apports totalisant 75 t/ha sont susceptibles d'accroître notablement les teneurs en ces 3 métaux dans l'horizon de surface, au point d'outrepasser les seuils de contamination proposés au tableau 4.

Pour les deux autres zones anormales du nord du département, nous n'avons pas d'information suffisante pour identifier les causes de ces anomalies. Des études spatiales encore plus détaillées pourraient être réalisées, notamment dans les secteurs où nous disposons d'analyses suffisamment nombreuses.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Ce travail a surtout un intérêt méthodologique. Il montre ce que chacun peut facilement réaliser dans son département ou sa région, à condition de rassembler un nombre suffisant de résultats d'analyses et à condition que ces dernières ne soient pas trop mal réparties dans l'espace. Ces premiers résultats ont été fort utiles pour orienter et préparer une opération nationale qui est menée conjointement avec l'ADEME depuis mars 1997 et qui consiste à collationner et à traiter toutes les données obtenues à l'occasion des plans d'épandages de

boues d'épuration, sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Sur une population purement géographique et pédologique hétérogène, on peut faire quand même des études de relations entre données granulométriques, CEC, carbone et différents éléments traces. Malgré le manque d'information sur les types de sols, les roches-mères, la composition des horizons sous-jacents, il est possible de faire apparaître des valeurs suspectes (contaminations minimales) ou résultant de contaminations franches. D'autant que la plupart de ces contaminations sont multi-élémentaires (association Cu + Zn + Pb + Hg).

En ce qui concerne le cadmium, en dehors d'une valeur très forte (1,80 mg/kg) qui est peut-être d'origine industrielle ou résulterait d'un épandage excessif, les autres valeurs semblent assez aléatoires, liées seulement aux pratiques agricoles (doses et nature de la fertilisation phosphatée, chaulages).

Certes, le nickel a pu nous servir d'élément de référence. Mais une éventuelle contamination en nickel n'aurait pas pu être décelée. Il aurait été préférable de disposer de l'analyse du fer total, lequel est dosé dans la même solution d'extraction que la plupart des éléments traces pour un coût très modique (moins de 20 F).

Nous n'avons pas vraiment approfondi le problème de l'influence des laboratoires où ont été faites les analyses et des méthodes d'analyses employées. Mais nous avons pu faire au passage deux constats. Pour les échantillons analysés après extraction à l'eau régale, les teneurs en chrome ont été observées systématiquement plus faibles que pour ceux analysés après attaque à l'acide fluorhydrique. Il en va peut-être de même pour d'autres éléments chimiques. Par ailleurs nous avons constaté une grosse anomalie relative à l'analyse du mercure. Trois valeurs tout-à-fait exceptionnelles (2,3 - 4,0 et 5,2 mg/kg) sont les seules à provenir du laboratoire inconnu X. Il y a certainement eu un problème analytique ! Ces valeurs ont été éliminées des traitements présentés dans cet article. Lors d'un tel travail de collationnement d'analyses d'origines diverses, ces différences de méthodes et la diversité des laboratoires constituent une difficulté supplémentaire.

Les objectifs initiaux, affichés au début de cet article, ont-ils été atteints ?

1 - Estimation des fonds pédo-géochimiques locaux.

Cette estimation ne peut pas être réalisée car nous avons toujours eu affaire à des horizons de surface labourés, réceptacles de tous les apports quelle qu'en soit l'origine. Pour approcher valablement ces fonds pédo-géochimiques il aurait fallu disposer des analyses d'horizons quasiment indemnes des principales actions humaines, à savoir tous les horizons des sols forestiers ou, à la rigueur, les horizons profonds des sols cultivés (Baize, 1997). Il aurait fallu également pouvoir traiter les données par "type de sol détaillé" ou "séries". Tout au plus peut-on penser que les limites assez rectilignes du bas

des nuages de points (figures 13 à 16) correspondent assez bien au fond pédo-géochimique régional des "sols limoneux".

2 - Détection d'éventuelles anomalies naturelles.

Elles auraient probablement été détectées si elles avaient existé. Mais la Seine-et-Marne est située dans une région de roches sédimentaires tertiaires et de "limons des plateaux" quaternaires caractérisés par des fonds pédo-géochimiques naturels à faibles concentrations en éléments traces (Baize, 1997). En outre, la pédogenèse "lessivante" qui s'est développée dans les couvertures limoneuses a entraîné la formation d'horizons supérieurs éluviés en argile et en fer, donc appauvris également en éléments traces.

3 - Constat de l'état "normal" des sols agricoles avant la réalisation de grandes campagnes d'épandage de boues.

Cet objectif a été parfaitement atteint. Nous avons pu obtenir une "photographie" de l'état de contamination des sols agricoles de Seine-et-Marne sur la courte période 1992-1995, correspondant à la somme des apports à la parcelle additionnés des éventuels apports atmosphériques. Malgré la proximité de l'agglomération parisienne, le niveau de contamination général est faible, presque imperceptible, à l'exception de certaines parcelles.

En outre, nous avons eu la possibilité de déterminer des "seuils de suspicion" ou des "seuils de contamination". Cette première démarche, qui s'appuie soit sur la recherche des "valeurs aberrantes" soit sur des relations entre un élément trace et un élément de référence bien choisi, peut être complétée par une étude de vérification sur le terrain en utilisant les démarches pédo-analogiques mises au point dans le cadre du programme INRA-Aspité : comparaison verticale ponctuelle, comparaison latérale, approche typologique (Baize, 1994, 1996a, 1996b, 1997).

Dans l'avenir, toute valeur observée supérieure aux seuils proposés au tableau 4, pourra être interprétée en termes de plus ou moins forte contamination, à la condition qu'il s'agisse bien d'un horizon de surface d'un sol de "limons des plateaux". Ce dernier point est facile à vérifier sur le terrain par un simple sondage à la tarière.

REMERCIEMENTS

Remerciements à Monsieur F. Delaporte (Conseil Général - Division de l'Eau et de l'Environnement - Melun) qui nous a communiqué toutes ses données ; à Alain Couturier (Ingénieur à l'INRA d'Orléans) pour la réalisation des documents cartographiques et à J. Roque (Ingénieur à l'INRA d'Orléans) pour les informations géologiques et pédologiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, 1996 - Qualité des sols. Recueil de normes françaises. 3e édition. Paris-La Défense. 534 pages.
- Baize D., 1994 - Teneurs totales en "métaux lourds" dans les sols français. Premiers résultats du programme ASPITET. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA, n° 22, 37-46.
- Baize D., 1996a - Teneurs totales en cadmium dans les sols français. Fonds géochimiques locaux et contaminations. 5es Journ. Étude des Sols, Rennes. Résumé 2 pages.
- Baize D., 1996b - Éléments traces métalliques dans les sols. Intérêt d'une typologie détaillée. 5es Journ. Étude des Sols, Rennes. Résumé 2 pages.
- Baize D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA éditions, Paris (sous presse).
- McGrath S.P. et Loveland P.J., 1992 - The Soil Geochemical Atlas of England and Wales. Blackie Academic et Professional. Glasgow. 101 p. + 40 cartes en couleurs + 2 transparents.
- Juste C., Chassin P., Gomez A., Lineres M., Mocquot B., Feix I. et Wiart J., 1995 - Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduelles des stations d'épuration urbaines. Convention ADEME-INRA. 209 pages.
- Paquereau H., 1996 - étude des teneurs totales en éléments traces métalliques de sols de Seine-et-Marne. DESS - Pollutions chimiques et Environnement. Paris XI - Orsay. 42 p. + annexes.
- Roque J., 1995 - Référentiel Régional Pédologique de l'Île de France. Carte des pédopaysages à 1/250000. INRA, Orléans.
- Roque J., 1997 - Carte pédologique de France à 1/100000. Feuille Meaux. INRA Orléans. à paraître.
- Tukey J.W., 1977 - Exploratory data analysis. Addison Wesley, Reading, Massachusetts.