

teneurs totales en métaux lourds dans les sols français premiers résultats du programme ASPITET

par Denis Baize

INRA, unité de Science du sol, 45160 Ardon

Nous assistons aujourd'hui à l'application de nouvelles réglementations relatives à la qualité des sols : par exemple dans le cas des « expertises écologiques » des sites pour la vente de terrains industriels. L'épandage des boues de stations d'épuration est interdit lorsque la teneur en métaux lourds mesurée dans les horizons supérieurs du sol dépasse une valeur-limite, définie par la norme AFNOR U 44-041. Mais une question se pose : ces métaux lourds proviennent-ils d'une contamination à la suite d'activités humaines ou sont-ils là en tant que constituants naturels, correspondant au fond pédogéochimique (voir encadré n°1) ?

Le programme ASPITET (sigle de « apports d'une stratification pédologique pour l'interprétation des teneurs en éléments traces ») tente d'apporter des éléments de réponse.

Il a pour premier objectif de comprendre le déterminisme des *teneurs totales en 7 éléments traces métalliques -ou ETM-* (*cadmium, chrome, cobalt, cuivre, nickel, plomb et zinc*) et d'étudier les relations entre ces teneurs et d'autres valeurs couramment mesurées en pédologie : teneurs en fer (libre et total), en argile, en manganèse, en carbone organique, en carbonate de calcium (CaCO_3) et capacité d'échange cationique. Son deuxième objectif est d'évaluer le fond pédo-géochimique naturel des sols de notre pays et de mettre au point des méthodes pour estimer le degré de contamination des sols. Un troisième volet sera d'étudier plus finement la mobilité et la bio-disponibilité des éléments traces dans le cas de certains échantillons particuliers.

Le présent exposé résume les premiers résultats de ce programme.

1. Pourquoi les teneurs totales ?

Les analyses totales évaluent le stock total de tel ou tel élément à un moment donné. Elles ont par contre l'inconvénient de ne fournir aucun renseignement sur la mobilité des éléments dans le sol ni sur leur bio-disponibilité vis-à-vis des plantes. Il est possible d'opérer des suivis au cours du temps, pour repérer des variations lentes - dues par exemple à des contaminations diffuses - ou rapides et ponctuelles. On peut comparer les analyses entre elles et les confronter aux normes réglementaires, qui sont, à ce jour, toutes exprimées sous la forme de teneurs totales.

Plusieurs extradants sont considérés comme donnant des teneurs « totales ». Ce sont l'acide fluorhydrique, l'acide nitrique, l'acide chlorhydrique, ou une combinaison de plusieurs acides (eau

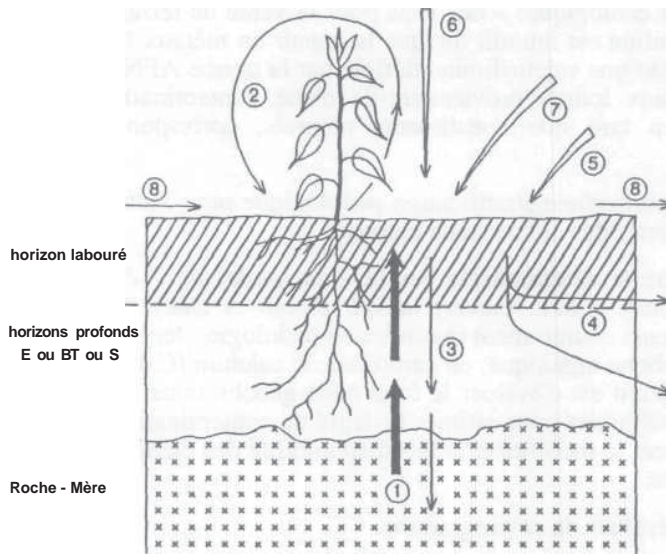
Origine des éléments traces métalliques dans sols (figure 1) :

Ces éléments proviennent d'abord de phénomènes naturels (fond pédo-géochimique naturel) :

- 1 héritage de la roche-mère (composition chimique de la roche - sans oublier de prendre en compte également les formations superficielles) ;
- 2 cycle bio-géochimique : des éléments sont adsorbés par les racines dans tous les horizons, assimilés par les plantes et libérés plus tard soit dans le sol (décomposition des racines) soit à la surface (débris des parties aériennes, litières forestières) ;
- 3 transferts pédologiques verticaux : migrations sous formes solubles ou associés aux particules d'argile et au fer vers les horizons profonds ou vers les nappes phréatiques ;
- 4 transferts pédologiques latéraux : lessivage latéral de particules ou redistributions suite aux cycles réduction/oxydation ;
- 6bis poussières et aérosols d'origine lointaine : volcaniques, embruns et vents lointains.

Les teneurs totales mesurées résultent aussi d'influences directes ou indirectes des activités humaines :

- 5 apports agricoles gérés à la parcelle : engrais (notamment phosphatés), amendements calcaires, fumiers, lisiers, épandages divers, boues de stations d'épuration, composts urbains, produits de traitements phytosanitaires, etc. ;
- 6 apports diffus aériens d'origine lointaine : poussières et aérosols provenant des chauffages, activités industrielles, moteurs d'automobiles, etc. ;
- 7 apports massifs localisés d'origine proche : « pollutions » ;
- 8 transferts latéraux de particules par ruissellement à la surface. Apports ou pertes selon position sur les versants.



effectuées dans le laboratoire d'Analyse des sols INRA d'Arras, avec les mêmes méthodes d'extraction (attaque par l'acide fluorhydrique et l'acide perchlorique) et de dosage.

A ce jour, 381 horizons-échantillons ont pu être rassemblés à partir de sols cultivés et de sols forestiers, de 137 sites différents (dont 76 sont situés dans la moitié sud du département de l'Yonne et 18 en Côte d'Or). Deux sites agricoles sont notoirement contaminés, d'autres ont subi une légère contamination de leur horizon de surface liée à l'agriculture. Les valeurs correspondant à des pollutions anthropiques ont été éliminées. On dispose pour chaque échantillon à la fois des analyses des éléments traces métalliques et des analyses de caractérisation pédologique. Outre les sols analysés dans le cadre spécifique du programme ASPITET, sont rassemblés également les sols étudiés pour la mise en place de l'Observatoire de la qualité des sols (provenant des régions Lorraine, Bretagne, Nord-

régale, réactif triacide). Mais il semble bien que seul l'acide fluorhydrique (HF) soit capable d'extraire de l'échantillon de sol la totalité d'un élément. L'acide nitrique n'extraîrait que 60% à 80% des éléments traces métalliques selon les cas. Le débat n'est pas tranché. Faut-il ou non dissoudre les silicates pour mesurer la véritable teneur totale ?

Ces incertitudes font qu'il est difficile de comparer des valeurs « totales » publiées dans la littérature internationale, car elles sont obtenues avec des méthodes d'extraction trop différentes. On ne retiendra que les ordres de grandeur.

2. Les méthodes d'étude

Mode de prélèvement

Méthodes d'analyse

Dans la présente étude, l'échantillon de sol est l'horizon (les pédologues désignent ainsi une couche de sol à peu près parallèle à la surface du terrain et sensiblement homogène), prélevé à partir d'une fosse après avoir été repéré et décrit. Il fait clairement partie d'un sol bien étudié et resitué dans son paysage naturel et humain. Aucun échantillon n'a été prélevé dans des secteurs urbains ou industriels.

Les analyses portent sur l'ensemble de la « terre fine » (éléments de taille inférieure à 2 mm) ; elles sont toutes ef-

Pas-de-Calais et Aquitaine) auxquels nous avons pu ajouter quelques résultats émanant des missions de valorisation agricole des déchets (MVAD) de Côte-d'Or et de l'Ain (A. Buatier, études en cours) et du District de Poitiers.

En chaque site, de 2 à 6 horizons superposés de chaque sol sont analysés. Il est donc possible d'observer les variations verticales des teneurs en éléments. Les horizons profonds sont étudiés au même titre que les horizons de surface. Il y a à cela trois ensembles de raisons. D'abord, les racines des plantes puisent des éléments dans tous les horizons et pas seulement dans les horizons superficiels (cycle bio-géochimique, voir la figure 1 dans l'encadré). Ensuite, la connaissance des teneurs des horizons profonds est souvent indispensable pour interpréter celles des horizons labourés (voir ci-dessous). Enfin, très souvent, en bordure de plateau, suite à l'érosion, les sols sont tronqués partiellement et les horizons profonds deviennent les horizons de surface (avec de plus fortes teneurs en matières organiques).

On ne saurait prétendre que cette population expérimentale représente les sols de France. Les sols issus de roches cristallines ou cristallophylliennes et les sols développés dans des formations superficielles limoneuses sont sous-représentés. Au contraire, la moitié des échantillons proviennent de la partie sédimentaire de la Bourgogne, à proximité du massif cristallin du Morvan. Les sols issus de roches sédimentaires du Jurassique sont donc sur-représentés. Des sous-populations ont été définies, par exemple : horizons non situés en surface, horizons calcaires, horizons correspondant à telle classe granulométrique, ainsi que des « familles » de sols différant par le type de roche-mère (sols issus de marnes, sols développés dans des matériaux glauconieux, etc.) et des « unités typologiques de sols » très détaillées. Les résultats sont interprétés à l'aide de méthodes graphiques et statistiques, complétées par le retour à l'examen individuel de chaque échantillon, souvent indispensable pour interpréter les teneurs mesurées.

3. Les premiers résultats

3.1. Eventail des teneurs

Le tableau I présente les maximums, minimums et médianes de la population étudiée, divisée en 5 grandes catégories granulométriques. Il permet déjà de faire les constatations suivantes, relatives au fond pédo-géochimique naturel.

La gamme totale des teneurs s'étend : pour le fer de 1 à 20, pour l'argile de 1 à 85, pour le cadmium de 1 à 430, pour le cuivre de 1 à 500, pour le manganèse de 1 à 675, pour le cobalt et le chrome de 1 à 1 500, pour le nickel de 1 à 4 800, pour le plomb de 1 à 7 000 (une valeur de 10 180 mg/kg exclue) et pour le zinc de 1 à 38 000.

Les médianes sont proportionnelles au taux d'argile pour le cuivre, le chrome, le cadmium, le zinc, le nickel, et le fer, également proportionnelles au taux d'argile pour le cobalt, le plomb et le manganèse mais cette proportionnalité ne se maintient pas pour les horizons argileux et argileux lourds.

Les minimums sont : - toujours très faibles et ne sont pas proportionnels aux teneurs en argile pour le cuivre, le cobalt, le cadmium, le manganèse ; - proportionnels au taux d'argile pour le chrome, le zinc, le fer ; - proportionnels au taux d'argile pour le nickel mais cette proportionnalité ne se maintient pas pour les horizons argileux et argileux lourds. Le plomb semble peu lié à la teneur en argile

Les maximums sont : - proportionnels au taux d'argile pour le chrome, le cadmium ; - proportionnels au taux d'argile pour le cobalt, le nickel, le fer et le manganèse mais cette proportionnalité ne se maintient pas pour les horizons argileux et argileux lourds. Les maximums du cuivre, du plomb et du zinc sont de beaucoup supérieurs dans la catégorie des horizons argileux que dans celle des argileux lourds.

Globalement, il y a donc une forte relation entre la granulométrie de l'échantillon étudié et les teneurs totales en fer, manganèse et les 7 ETM dosés. Les matériaux et horizons très sableux ou très limoneux sont naturellement les plus pauvres. Mais, en ce qui concerne les échantillons des catégories argileuse ou argileuse lourde (plus de 35 % d'argile), il demeure une très grande incertitude. Pour un même taux d'argile, les teneurs en ETM peuvent varier très largement, en fonction de la nature lithologique de la

Tableau I. Teneurs totales en éléments traces métalliques

Maximums, minimums et médianes par grandes catégories granulométriques ; valeurs en g/100g pour l'argile et le fer et en mg/kg pour les autres éléments ; population totale ; horizons notoirement contaminés exclus.

		Cu	Co	Cr	Cd	Pb	Zn	Ni	Fe	Mn
Sableux (19)	11.5	32.1	11.1	35.9	0.48	64.9	49	11.4	1.70	201
	1.1	0.2	0	0.3	0.02	2.2	0	0.1	0.29	37
	7.1	3.2	1.3	135	0.03	13.1	17	3.8	0.60	152
Limoneux (78)	19.9	71.0	18.0	104.0	0.90	152.0	115	53.2	3.11	1331
	4.5	2.1	0.8	14.0	0.01	10.0	16	2.1	0.64	50
	15.1	6.3	5.7	36.3	0.08	22.8	35	11.1	128	393
Moyen (89)	34.9	56.6	107.0	221.0	1.20	578.0	436	198.0	6.11	5833
	20.2	3.9	2.8	24.0	0.01	8.2	23	5.1	1.53	69
	26.3	11.6	12.9	58.0	0.10	26.9	56	24.8	2.48	507
Argileux (101)	49.8	99.0	148.0	362.0	3.70	1560.0	3820	476.0	10.70	23440
	35.0	3.5	1.6	38.3	0.01	13.1	31	14.4	1.83	38
	40.9	13.3	165	76.2	0.17	35.2	88	36.1	355	924
Argileux lourd (77)	93.1	51.2	143.0	456.0	4.30	264.0	1999	478.0	12.15	24975
	50.4	3.2	3.2	62.9	0.01	13.0	42	12.1	2.45	41
	57.8	16.7	17.3	99.4	0.19	37.9	128	55.1	5.47	861
Norme AFNOR NFU 44-041		100.0	30.0	150.0	2.00	100.0	300	50.0		
Nb horizons > à la norme		aucun	33	23	10	28	35	90		

roche-mère mais également et surtout en fonction de l'histoire pédologique du sol ou d'anomalies pédo-géologiques. On peut ainsi opposer des « familles » de très vieux sols résiduels (« Aubues rouges », sols issus des argiles à chailles, sols issus du calcaire sinémurien à la limite nord du Morvan) où peuvent être observées des accumulations d'éléments traces métalliques et des sols beaucoup plus récents développés dans des sédiments argileux ou marneux.

3.2. Variabilité au sein d'un même sol

Les teneurs en ETM peuvent être très variables au sein d'un même sol, d'un horizon à un autre, tout particulièrement dans le cas de sols à forte différenciation texturale (tels ceux appelés Luvisols, Planosols, Pélosols différenciés, très fréquents sur le territoire national), et ce en dehors de toute contamination anthropique. Les teneurs en ETM sont en effet fortement corrélées aux teneurs en argile et en fer, tous les horizons éluviaux^(*) de sub-surface (horizons E) étant nettement plus pauvres que les horizons plus profonds S ou BT (tableau II).

Tableau II. Teneurs totales en ETM dans un Planosol typique sableux en surface, argilo-sableux en profondeur ; sous forêt (région d'Auxerre).

Horizons	Prof. en cm	Co	Zn	Ni	Pb	A %	Fe %
AE	0- 5	1.9	37	6.4	22.5	17	1.4
E	10- 20	0.8	14	3.9	12.8	11	1.3
Eg	25- 40	1.4	10	4.3	14.7	12	1.7
Sgd	43- 48	10.9	53	25.8	18.7	49	7.9
S	60- 75	12.7	56	31.2	18.0	53	7.4
SC	90-110	14.2	46	30.1	17.8	38	6.3
C	140-155	17.5	51	37.9	16.1	40	6.7

(*) Eluviation : appauvrissement de l'horizon d'un sol en colloïdes (argile, humus, oxydes de fer) par suite de la migration de ces éléments vers des horizons plus profonds ou latéralement.

3.3 Variabilité d'une famille de sols à une autre

Elle sera illustrée par la représentation graphique de la relation entre le fer total et le nickel total (218 valeurs), prise à titre d'exemple (fig. 2, ci-dessous). Environ 140 valeurs s'alignent régulièrement croissant de 0,5 à 5,0 % de fer total et de 4 à 60 mg/kg de nickel, formant une sorte de noyau central. Mais quelques familles de sols se singularisent nettement. Ce sont :

- GC : sols de moraines du pays de Gex (non calcaires) et sols calcaires issus des marnes du Carixien (Yonne) : très riches en Ni pour des teneurs en fer moyennes (16 échantillons sur 16) ;
- S : sols résiduels sur calcaire sinémurien en limite du Morvan : très riches en fer mais également très riches en nickel, avec des rapports Ni/Fe très supérieurs à ceux correspondant au « noyau central » (26 échantillons sur 29 plus 5 valeurs hors schéma avec des teneurs en Ni supérieures à 250 mg/kg) ;
- G1 : horizons profonds argileux ou argilo-sableux très glauconieux : à la fois très riches en fer mais très pauvres en nickel (10 échantillons sur 10). On notera de plus que tous les horizons éluviaux de cette même famille se séparent également du « noyau central » dans une gamme de faibles teneurs totales en fer (G1-E).

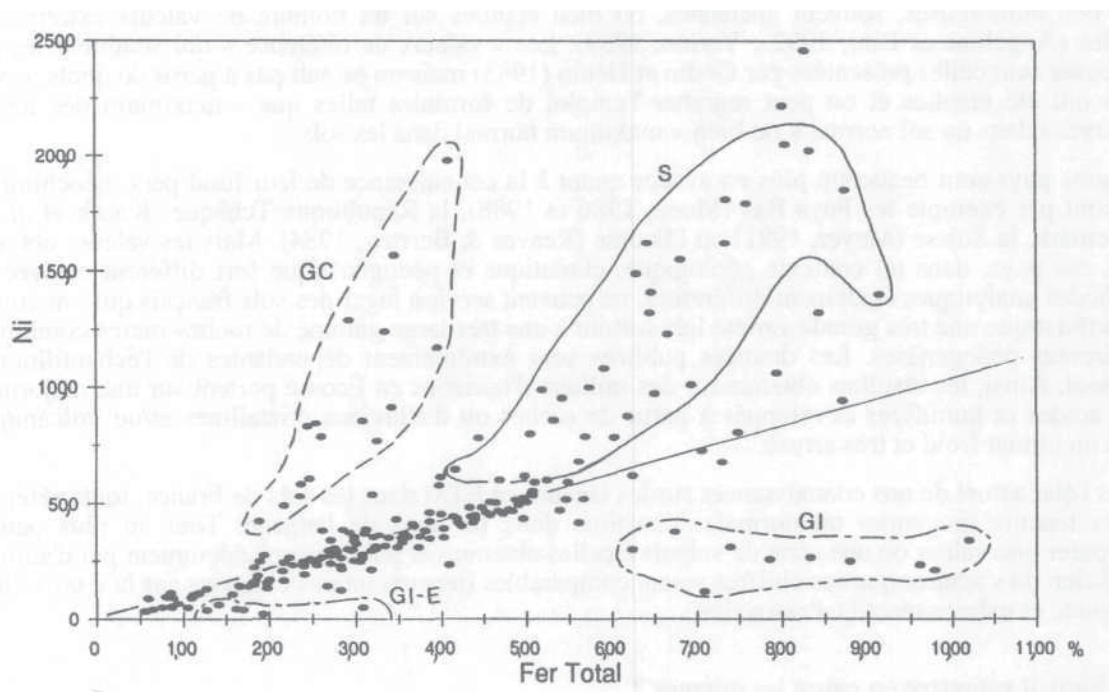


Figure 2. Relation entre teneur en fer total et en nickel pour l'ensemble de la population étudiée (218 valeurs)

3.4. Valeurs de référence, moyennes, médianes, valeurs « normales »

Il est clair que, pour une population aussi hétérogène, les moyennes ont peu d'intérêt. Beaucoup plus intéressantes sont donc les médianes et les fourchettes de valeurs correspondant aux 1^{er} et 9^e déciles, qui rassemblent 80 % des valeurs obtenues (tableau III). De telles fourchettes permettent d'avoir une idée des gammes de variations en éliminant les fortes contaminations ou les « accidents » naturels. Cette façon de voir est également celle des spécialistes suisses (Meyer, 1991).

Tableau III. Médiannes, premiers et neuvièmes déciles ; comparaison avec les moyennes pour les horizons argileux valeurs exprimées en mg/kg.

	Pb	Zn	Ni	Cu	Co	Cr	Cd	Mn
(nb valeurs)	(100)	(101)	(100)	(100)	(91)	(100)	(88)	(89)
1er décile	18.1	47	23.7	7.7	7.1	59.4	0.03	116
médiane	35.2	88	36.1	13.3	16.5	76.2	0.17	924
9ème décile	112.0	419	117.0	36.6	50.0	134.0	0.69	6950
moyenne	173.7	232	58.7	19.1	23.7	91.5	0.35	2595

Les personnes qui ont aujourd'hui à interpréter des teneurs totales en ETM ne savent pas à quelles valeurs nationales ou régionales se référer. Les rares résultats publiés pour les sols de France sont parfois considérées fautiveusement comme des « valeurs normales » ou des « valeurs standard » voire comme des « moyennes ». En ce qui concerne notre pays, les références bibliographiques sont en effet très peu nombreuses, souvent anciennes, ou bien établies sur un nombre de valeurs extrêmement faibles (Angelone et Bini, 1992 ; Verloo, 1989). Les « valeurs de référence » qui semblent les plus sérieuses sont celles présentées par Godin et Hénin (1983) mais on ne sait pas à partir de quels travaux elles ont été établies et on peut regretter l'emploi de formules telles que « maximum des teneurs observées dans un sol normal » ou bien « maximum normal dans les sols ».

D'autres pays sont beaucoup plus en avance quant à la connaissance de leur fond pédo-géochimique. Ce sont par exemple les Pays Bas (Moen, 1986 et 1988), la République Tchèque (Kozak *et al.*), le Danemark, la Suisse (Meyer, 1991) ou l'Ecosse (Reaves & Berrow, 1984). Mais les valeurs obtenues dans ces pays, dans un contexte géologique, climatique et pédogénétique fort différent et avec des méthodes analytiques également différentes, ne peuvent servir à juger des sols français qui ont comme caractéristique une très grande variété liée surtout à une très large gamme de roches-mères combinée à différentes pédogénèses. Les données publiées sont extrêmement dépendantes de l'échantillonnage originel. Ainsi, les résultats obtenus sur des milliers d'horizons en Ecosse portent sur une majorité de sols acides et humifères développés à partir de roches ou d'alluvions cristallines et/ou volcaniques, sous un climat froid et très arrosé.

Dans l'état actuel de nos connaissances sur les teneurs en ETM dans les sols de France, toute référence à des teneurs moyennes ou normales constitue donc un abus de langage. Tout au plus peut-on comparer une valeur ou une série de valeurs à celles obtenues et publiées précédemment par d'autres, à condition de s'assurer que ces chiffres soient comparables (teneurs totales obtenues sur la « terre fine » complète et mêmes réactifs d'extraction).

3.5. Faut-il remettre en cause les nonnes ?

En 1984, le secrétariat chargé de l'Environnement (Analyse et traitement des sols pollués) définissait trois types d'usages pour les sols (a, b et c) et adoptait quatre concentrations de référence (de 1 à 4) :

- (a) usage pour la production maraîchère (le plus exigeant) ;
- (b) usage pour les autres productions agricoles liées à l'alimentation ;
- (c) autres usages ;
- (1) seuil d'anomalie : concentration maximale rencontrée dans les sols courants ;
- (2) seuil d'investigation : concentration du sol au-delà de laquelle une étude approfondie du site est nécessaire ;
- (3) seuil de traitement : concentration du sol au-delà de laquelle son traitement est nécessaire ;
- (4) seuil d'urgence : concentration du sol au-delà de laquelle un traitement ou pré-traitement d'attente s'impose dans un délai de trois mois.

Et le rédacteur ajoutait: dans l'état actuel des connaissances, ces seuils de référence en matière de pollution du sol sont donnés à titre de repères. Pour plus de commodité on a d'ailleurs pris :

- seuil (2) = 2 fois le seuil d'anomalie ; - seuil (3) = 5 fois le seuil d'anomalie ; - seuil (4) = 10 fois le seuil d'anomalie.

Enfin, il était signalé que ces valeurs émanaient des travaux d'une commission AFNOR et de tableaux provisoires analogues établis dans d'autres pays européens (Pays-Bas). La norme AFNOR U 44-041 de 1985 officialisa ces valeurs des seuils d'anomalie proposés pour fixer des limites de teneurs du sol au-delà desquelles on ne doit plus épandre des boues de stations d'épuration.

Etant donné que la notion de « concentrations maximales dans les sols courants » n'a guère de sens, nous venons de le voir, il est difficile d'admettre la validité de ces seuils d'anomalie. On peut cependant considérer les valeurs de la norme AFNOR comme des seuils d'alerte dans le cadre de projets d'épandages de déchets dans le milieu naturel. Si les teneurs naturelles sont déjà jugées fortes, il n'est certainement pas raisonnable d'en rajouter artificiellement.

Par ailleurs, ne faudrait-il pas tenir compte aussi de la teneur en ETM de la boue ? En effet, pourquoi une boue pratiquement « propre » (dépourvue d'ETM) ne pourrait-elle pas être épandue sur un sol dont les teneurs sont au niveau de la norme ou la dépassent ?

Depuis plusieurs années, certaines missions pour la valorisation agricole des déchets (MVAD de l'Ain - 1989) ont mis le doigt sur le problème particulier des teneurs en nickel qui, dépassant assez souvent le seuil de 50 mg/kg, interdisent l'épandage de boues de stations d'épuration. Sur 51 horizons de surface analysés, 15 dépassaient la norme AFNOR, sans être pour autant particulièrement argileux (20 à 59 % d'argile - médiane 29 %). La MVAD de l'Ain a même proposé l'adoption de nouveaux seuils variables selon la texture.

Nous avons nous-même constaté (tableau I et figure 2) que c'était le seuil du nickel (50 mg/kg) qui était le plus souvent dépassé, et cela sans que jamais il soit nécessaire d'invoquer une contamination par l'activité humaine pour l'expliquer. Dans l'ensemble des horizons que nous avons étudiés, il suffit qu'un échantillon renferme plus de 50% d'argile ou 5,0% de fer total pour qu'il ait de grandes chances d'avoir une teneur en nickel dépassant 50 mg/kg. Hors de ce cadre général, certaines familles de sols se singularisent. Les sols glauconieux, pourtant très riches en fer et en argile, sont très en dessous du seuil AFNOR tandis que les sols du pays de Gex (Ain) et les sols sur marnes du Carixien (Yonne) se caractérisent par de très fortes teneurs en nickel pour des teneurs en fer modestes et, en ce qui concerne les sols du Pays de Gex, des teneurs en argiles comprises entre 13 et 29% (pour 36 à 43% de limons totaux).

A notre avis, une modification de la norme AFNOR, pour le nickel ou pour un autre élément, n'est pas le problème du moment. Il paraît plus utile d'étudier les formes et la bio-disponibilité des éléments traces métalliques, dans les cas particuliers des familles de sols qui montrent des teneurs totales naturelles extrêmement fortes.

4. La détection des contaminations dans les sols

Le comité technique ISO / TC 190 a refusé de définir les deux mots « contamination » et « pollution ». C'est dire que ces concepts ne sont pas parfaitement clairs. A la notion de contamination on peut cependant associer deux idées :

- un *accroissement des teneurs* suite aux activités humaines, locales ou générales et
- un *accroissement du risque* de nuire aux fonctions des sols naturels. Mais c'est probablement plus la forme de l'élément que sa teneur qui risque d'avoir une action négative sur le fonctionnement du sol ou sur la qualité alimentaire des produits végétaux.

Envisageons comment il est possible d'estimer les accroissements des teneurs dans les sols, suite à l'action humaine. On peut envisager trois façons pour détecter les contaminations d'origine agricole ou aérienne.

- **La 1^{ère} méthode** consiste à comparer les teneurs en éléments de l'horizon de surface labouré et celles des horizons situés immédiatement en-dessous. Cette procédure de *comparaison verticale* est toujours facile à réaliser. Elle ne nécessite pas de connaissance régionale ni même de connaissances pédologiques mais les deux horizons doivent être similaires (c'est-à-dire présenter des teneurs en argile, fer, carbone, calcaire, et des CEC du même ordre).

Des teneurs nettement plus fortes en surface ne peuvent guère s'expliquer par des phénomènes naturels. Surtout si, comme c'est souvent le cas, les teneurs en argile et en fer sont similaires ou bien vont croissant avec la profondeur. Seule exception : le plomb, qui semble très lié au carbone et qui est donc parfois plus abondant en surface.

Le tableau IV présente trois exemples. Dans le premier cas (Évin-Malmaison), une simple comparaison verticale fait apparaître une très forte pollution dans l'horizon labouré pour le zinc, le plomb et le cadmium et une pollution nettement plus faible est probable pour le cuivre. On constate également que cette contamination n'est pas descendue dans l'horizon 34-45 cm (sauf peut-être très légèrement pour le cadmium et le plomb).

Dans le deuxième cas (Beauvoir), seule une contamination en cadmium est visible. Enfin dans le troisième cas (Vault-de-Lugny), le simple constat des teneurs très élevées en nickel, zinc, plomb et cadmium de l'horizon labouré ne permet pas de savoir si ce fait résulte d'une contamination par l'homme ou du fond pédo-géochimique naturel. Quand on connaît les teneurs des horizons pédologiques situés en profondeur, on constate que les teneurs en ETM sont encore plus fortes, de plus en plus fortes avec la profondeur, parallèlement aux teneurs en argile et en fer. Il ne s'agit donc pas d'une contamination anthropique mais d'un sol présentant des teneurs en ETM naturellement très grandes.

Tableau IV. Recherche de contamination par comparaison verticale teneurs en ETM en mg/kg.

A) Cas d' Evin-Malmaison (Pas de Calais) – Secteur agricole hautement contaminé. Usines métallurgiques – Tous horizons à pH = 8.3.										
	Profond.	Cu	Zn	Cr	Ni	Co	Pb	Cd	CEC	Argile %
L1	0 – 12 cm	19.2	620	38.3	19.7	11.6	500.0	8.20		
L2	12 – 27 cm	20.5	637	38.6	19.2	9.9	524.0	8.10	12.4	17.9
L3	27 – 34 cm	20.4	635	38.9	18.7	8.9	525.0	8.20		
EB	34 – 45 cm	10.4	64	40.1	19.6	10.1	33.4	0.23	12.6	20.9
BT	70 – 82 cm	8.9	49	51.6	29.1	13.0	22.8	0.08	12.1	24.5

B) Cas du polder de Beauvoir (Mont Saint Michel) – Cultures légumières. Fertilisation intensive + pesticides. Sol sableux calcaire.										
	Profond.	Cu	Zn	Cr	Ni	Co	Pb	Cd	CEC	Argile %
L1	0 – 33 cm	7.5	26	21.5	6.0	2.2	15.2	0.90	3.4	13.9
L2	33 – 41 cm	3.8	20	17.4	5.2	1.8	11.4	0.57	1.9	6.6
C1	41 – 69 cm	4.6	18	15.5	4.3	1.5	16.1	0.09	1.5	4.5
C2	69 – 76 cm	2.8	14	13.5	3.4	1.3	8.7	0.02	1.0	2.7

C) Cas du solum Vault de Lugny (Yonne – Bourgogne) – Agriculture Sol d'altération de calcaire Sinémurien – Bordure du Morvan.										
	Profond.	Cu	Zn	Cr	Ni	Co	Pb	Cd	CEC	Argile %
LE	0 – 26 cm	18,0	436	71.3	64.5	23.7	134	1.2	17.0	28.0
EB	26 – 40 cm	21.0	783	81.9	78.6	24.9	192	2.5	23.0	36.0
BTfe	40 – 58 cm	23.6	968	89.0	97.1	28.3	218	3.4	23.7	40.8
BTR	58 – 90 cm	25.3	1138	96.2	101.0	26.5	245	4.3	24.5	42.3

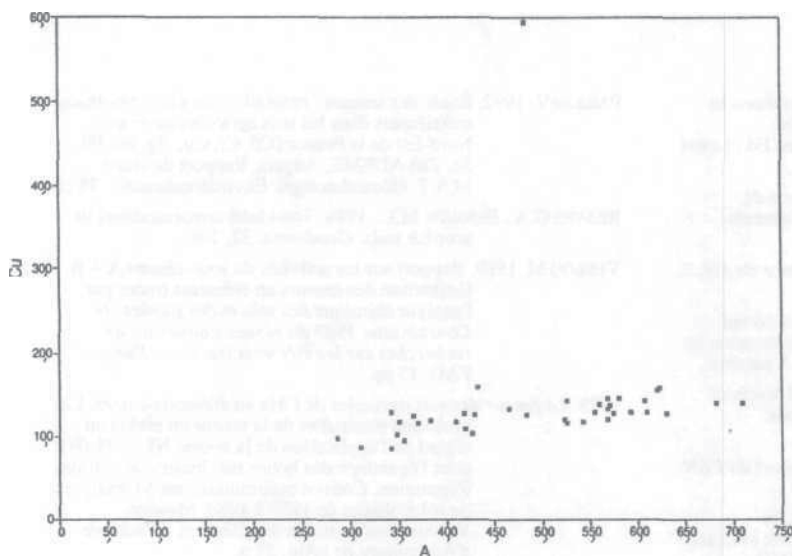


Figure 3 : Relation entre teneur en argile et en cuivre pour 39 échantillons d'Aubues rouges (horizons de surface labourés et horizons profonds)
 Une anomalie apparaît immédiatement pour un horizon de surface. Il s'agit d'une contamination cuprique liée à une ancienne vigne.

Dans l'ensemble des échantillons de notre étude, les contaminations constatées n'ont pas, ou guère, affecté les horizons sous-jacents à l'horizon labouré. Les seuls cas où une migration a pu être décelée sont des sols de vignoble très sableux. Les sols très hydromorphes risquent également de montrer des migrations des ETM associés au fer et/ou au manganèse.

- **La 2^e méthode** est la méthode typologique. Elle consiste à comparer l'échantillon en cause à ce que l'on connaît du même type d'horizon appartenant au même type de sol détaillé. Dans une telle sous-population en général très homogène, une contamination même modérée peut apparaître assez facilement (figure 3). Cette deuxième mé-

thode présente l'avantage d'être utilisable aussi pour des horizons profonds, et pas seulement pour des horizons de surface, elle nécessite une bonne connaissance typologique et analytique préalable des sols.

- **Une 3^e méthode** consiste à comparer l'échantillon en cause au même type d'horizon issu du même type de sol, situé sous forêt, à proximité, et censé être indemne de contaminations. Encore faut-il être sûr que ces sols forestiers de référence ne soient pas enrichis en métaux lourds par contamination aérienne d'origine lointaine ou agricoles (d'anciennes cultures, anciennes activités humaines). Une étude est en cours pour tester cette méthode dans le cas de Luvisols dégradés issus de limons dans le Sud-Est du Bassin parisien.

Pour toutes ces méthodes, une condition méthodologique doit être remplie : prélever les échantillons en respectant les limites des horizons - horizons labourés et horizons naturels. Ceci rejoint l'opinion des chercheurs canadiens McKeague et Wolynetz (1980) et de bien d'autres auteurs.

Travaux futurs

Le programme ASPITET a été retenu comme un des éléments de l'action incitative programmée (AIP) « écodynamique des substances à caractère polluant ». Dans ce cadre, une collaboration est entamée avec les agronomes de l'INRA de Bordeaux. En mai 1993 et 1994, 16 échantillons de blés (au stade montaison) ont été prélevés ainsi que l'horizon de surface correspondant. Des analyses sont en cours pour estimer la mobilité et la bio-disponibilité des ETM. Par ailleurs, à l'aide des connaissances déjà acquises, sont envisagées des études du fond pédo-géochimique naturel à l'échelle de petites régions naturelles (Vexin, Nord-Pas-de-Calais) •

