

# teneurs totales en « métaux lourds » dans les sols français

## résultats généraux du programme ASPITET

par Denis Baize

INRA, unité de Science du sol, centre d'Orléans, Ardon  
BP 20619, 45166 Olivet cedex  
*Denis.Baize@orleans.inra.fr*

### Introduction

Dans le contexte actuel de l'agriculture mondiale (concurrence exacerbée, exigences croissantes des consommateurs, principe de précaution), la qualité des produits agro-alimentaires prend de plus en plus d'importance, notamment en ce qui concerne les productions légumières. Dans le même temps, en conséquence de la multiplication des stations d'épuration des eaux usées, les volumes de boues générés augmentent rapidement et leur épandage sur les terrains agricoles est considéré comme la solution la plus simple et la moins coûteuse. D'autres déchets de toutes natures sont également susceptibles d'être épandus sur les sols cultivés ou bien l'ont été dans le passé (composts d'ordures ménagères, boues d'industries alimentaires, boues de papeteries, etc.). Parmi les substances indésirables contenues dans ces divers déchets, figurent les « éléments traces métalliques » (ETM) souvent appelés également « métaux lourds ». Par ailleurs, l'inventaire des « sites et sols pollués » est en cours et il y a souvent des terrains agricoles à proximité de ces sites industriels ou miniers.

C'est pourquoi il est intéressant de pouvoir reconnaître si un sol cultivé est indemne de contamination ou, au contraire, s'il a gardé la trace d'apports de métaux potentiellement dangereux et de bien distinguer la part de ce qui est naturel et de ce qui est contamination d'origine humaine. Malgré des flux et des concentrations plutôt faibles, le cadmium (Cd) est en tête de la liste des métaux potentiellement toxiques. Doivent aussi être surveillés dans tous les compartiments de notre environnement : le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le mercure (Hg), l'arsenic (As) et, dans une moindre mesure, le chrome (Cr), le nickel (Ni), le sélénium (Se), le thallium (Tl)...

Pour connaître le degré de contamination d'un sol en zone rurale, il ne suffit pas de confronter ses résultats aux valeurs seuils d'une réglementation<sup>1</sup> ou à des références étrangères. Il est nécessaire d'estimer d'abord le fond pédogéochimique local, c'est-à-dire de déterminer les concentrations

---

<sup>1</sup> En France, le décret 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées et l'arrêté complémentaire du 8 janvier 1998.

naturelles en ETM présents dans un sol, résultant uniquement de l'évolution géologique et pédologique, en absence de tout apport lié aux activités humaines.

En effet, de nombreuses anomalies naturelles en ETM ont été à ce jour détectées en France (Baize et Chrétien, 1994 ; Baize, 1997d ; Baize *et al.*, 1999 - cf annexe 1). Il est utile d'en faire l'inventaire, d'en connaître la répartition spatiale, de vérifier leur caractère naturel et d'approfondir la recherche des origines précises de ces anomalies. Il est indispensable de bien prendre en compte ces valeurs élevées afin d'éviter des contresens déplorables au moment de l'interprétation des résultats d'analyses dont le nombre va s'accroître dans l'avenir. En d'autres termes, il faut prendre conscience qu'on peut observer localement des teneurs en ETM très supérieures à telle ou telle valeur réglementaire sans avoir à invoquer une « pollution » d'origine anthropique, même si une étude de la qualité des produits agricoles obtenus sur ces sols anormaux présente un intérêt certain (Mench *et al.*, 1997 ; Tremel *et al.*, 1997a et 1997b).

## 1. Le programme ASPITET

C'est parce que ce problème des « métaux lourds » devenait d'actualité et parce que notre ignorance était immense quant aux teneurs naturelles dans les sols et leurs variations d'un point à un autre que le programme INRA-ASPITET a été lancé en 1993. En juin 1994, un premier article a été publié dans le numéro 22 du *Courrier de l'environnement*<sup>2</sup> pour présenter ses objectifs et exposer les premiers résultats obtenus à cette date. Aujourd'hui, ce programme étant pratiquement terminé, il est possible de tirer un bilan général des connaissances acquises.

Tous les résultats du programme ont été publiés (voir encadré ci-contre).

Le programme ASPITET est surtout un premier *inventaire*, un dégrossissage des problèmes : plusieurs programmes de recherche ont déjà débuté sur ses premiers résultats (Mench *et al.*, 1997 ; Tremel *et al.*, 1997a et b). D'autres encore vont se greffer dessus dans les mois et années à venir (c/ci-dessous).

Il est certain que la connaissance de la teneur totale en un élément ne permet pas de se faire une bonne idée du risque pour la chaîne alimentaire et l'environnement. Mais les teneurs totales sont les plus faciles à obtenir analytiquement et les moins contestables en matière d'interprétation, à la différence des extractions sélectives avec tel ou tel réactif. Le programme ASPITET a montré cependant qu'il est possible, en raisonnant sur les teneurs totales et en déterminant le fond pédogéochimique naturel local, d'estimer les apports et contaminations dues aux activités humaines. C'est déjà beaucoup ! C'est un premier pas, indispensable avant d'entamer, si besoin, une étude plus approfondie des formes chimiques présentes (spéciation), et des risques pour les êtres vivants ou notre environnement (absorption par les plantes, tests biologiques, mobilité).

Denis Baize  
Teneurs totales en éléments  
traces métalliques dans les  
sols (France)  
Références et stratégies  
d'interprétation  
1997, INRA Éditions, 410 p.

Dans cet ouvrage (Baize, 1997d), nous avons montré qu'il était possible de traiter les données disponibles de diverses façons, des plus simples (accessibles à tous) aux plus compliquées (analyse en composantes principales). Nous avons aussi cherché à proposer des démarches qui peuvent être reprises par chacun et être appliquées à des cas concrets qui se posent et se poseront de plus en plus, à l'échelon local ou régional.

Les chapitres 22 à 31 montrent quels traitements de données peuvent être aisément effectués pour telle ou telle « série » de sols ou « famille pédogéologique ». Les chapitres suivants 32 à 37 présentent ce que l'on peut faire sur des ensembles de données correspondant à des « rassemblements » de sols. Quelle que soit la composition de la population d'échantillons à étudier, on peut toujours en tirer une information intéressante !

<sup>2</sup> Baize Denis, 1995. Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 22, 37-46.

## 2. La population étudiée

Elle correspond à celle déjà envisagée par Baize (1997d) mais complétée par de nombreux prélèvements puisque son effectif est passé de 580 horizons<sup>3</sup> à 815. Le mode d'échantillonnage est resté le même, à savoir :

- chaque « individu » (au sens statistique du terme) est un horizon pédologique prélevé dans une fosse (plus rarement prélevé à la tarière pour certains horizons profonds) ;

- les prélèvements ne concernent que des sols de zones rurales. Aucun échantillon n'a été prélevé dans des secteurs urbains ou industriels ;

- cette population comprend des sols cultivés et des sols forestiers, elle correspond à 382 sites distincts ;

- en chaque site, les principaux horizons des solums ont été analysés. Il est donc possible d'observer les variations verticales des teneurs pour 2 à 5 horizons superposés selon les cas. Le contexte géologique et pédologique est, à chaque fois, parfaitement connu.

Les échantillons proviennent d'une quarantaine de départements mais ils sont irrégulièrement répartis sur le territoire national, situés surtout dans la moitié nord du pays et principalement dans le Bassin parisien, au sens large.

Les sols issus de roches cristallines ou cristallophyllics sont nettement sous-représentés. Au contraire, plus de 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 inférieur (Lias) et moyen (Dogger) sont donc plutôt sur-représentés.

Quelques rares sites agricoles sont apparus comme notablement contaminés dans leur horizon de surface, soit suite à des épandages excessifs de boues d'épuration, soit en relation avec une activité industrielle ponctuelle. Toutes ces valeurs, correspondant avec certitude à une contamination d'origine humaine importante, ont été éliminées des traitements statistiques.

Pour tous les échantillons, les concentrations *totales* en éléments traces ont été déterminées :

- toujours Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn (mise en solution par HF et HClO<sub>4</sub> - respectivement acides

### Glossaire

#### *Horizon*

Couche de sol sensiblement homogène, dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs décimètres. L'horizon est défini par sa structure (existence, formes, dimensions des agrégats), sa granulométrie, son taux de calcaire, sa couleur, par l'abondance et la nature des éléments grossiers, etc. Chaque horizon diffère de manière notable de l'horizon immédiatement situé au-dessus ou au-dessous de lui. L'horizon est l'unité d'échantillonnage en pédologie. La plupart des sols doivent être décrits comme des superpositions de 2, 3, 4 horizons (ou plus) dont les caractères et les propriétés sont différents.

#### **Solum**

La meilleure façon d'étudier les sols consiste à creuser des fosses de dimensions suffisantes à des emplacements sélectionnés. Le solum est le volume réel effectivement observé dans une fosse, appréhendé à la main ou au couteau, éventuellement décrit et échantillonné. Ce mot remplace désormais l'ancien terme « profil ».

#### **Série de sols**

C'est un type de sol existant localement, développé sur une formation géologique précise, et parfaitement caractérisé, aussi bien en ce qui concerne la morphologie du solum (structure, couleur, éléments grossiers, succession et épaisseur des horizons) qu'au plan analytique (granulométrie, pH, CEC, carbone, calcaire, fer, etc.).

#### **Familles pédogéologiques**

C'est un regroupement de plusieurs « séries de sols » apparentées qui ont en commun un même héritage géologique et globalement le même type de pédogenèse. En conséquence, des différences dans la succession ou les épaisseurs d'horizons ou bien la troncature plus ou moins importante des solums ou encore le degré de décarbonatation ont relativement peu d'importance en matière de pédogéochimie.

#### **Fond pédogéochimique (naturel) local**

C'est la concentration naturelle d'un élément ou d'une substance dans un horizon de sol, résultant uniquement de l'évolution géologique et pédologique, en absence de tout apport lié aux activités humaines. Étant donné cette définition, l'adjectif « naturel » est redondant mais il permet d'insister sur le caractère naturel de cette concentration. D'un point à un autre, ce fond pédogéochimique naturel peut varier très largement en fonction de la roche-mère (héritage), du type de sol et de l'horizon considéré.

Il résulte de cette définition que les concentrations mesurées aujourd'hui dans les horizons de surface des sols cultivés ne correspondent plus au fond pédogéochimique (naturel) local mais ont été plus ou moins augmentées par divers apports agricoles usuels tels que fumiers, engrais, chaulages, etc.

<sup>3</sup> Voir le glossaire.

fluorhydrique et perchlorique - concentrés - norme AFNOR X 31-147) ;  
- souvent As, Co, Hg, Se, Tl.

Sont également toujours disponibles des données de caractérisation pédologique courante telles que le carbone organique, la capacité d'échange cationique, le pH, le fer total et, si nécessaire, le calcaire total. Toutes ces analyses ont été réalisées dans un seul et même laboratoire, celui de l'INRA à Arras, entre 1988 et 1998.

### **3. Principaux faits établis grâce au programme ASPITET**

#### **3.1. Principes généraux**

Pour étudier convenablement les ETM dans les sols, nous avons montré qu'il était nécessaire de raisonner par horizons et d'opérer les prélèvements en respectant leurs limites (qu'elles soient naturelles ou anthropiques). En outre, quand cela est nécessaire, par exemple pour calculer des quantités par unité de surface ou pour réaliser des bilans, il faut tenir compte de l'épaisseur et des densités apparentes de ces horizons.

De même que la modélisation de la haute atmosphère par les physiciens passe par son découpage schématique en 4 couches superposées (troposphère, stratosphère, mésosphère et thermosphère), de même, les sols doivent être étudiés, modélisés et analysés par couches de nature et propriétés différentes : les horizons.

L'étude géochimique des sols ne peut pas se limiter à l'analyse de l'horizon de surface. Une connaissance minimale d'autres horizons plus profonds est presque toujours nécessaire. Il est également indispensable de compléter la connaissance géochimique (teneurs totales) par la connaissance pédologique classique (morphologie, données analytiques).

Il faut prendre en compte l'infinie diversité des types de sols. En effet, on trouve trop souvent dans la littérature relative aux ETM dans les sols des affirmations exposées avec beaucoup de sérieux mais qui sont aussitôt contredites par d'autres publications, non moins sérieuses. Il y a à cela trois raisons. La plupart du temps, les auteurs ne sont pas pédologues et n'ont pas une idée réaliste de ce qu'est véritablement un sol. En outre, les analyses sont souvent limitées aux 10 ou 20 premiers centimètres : les horizons sous-jacents et profonds sont complètement négligés et inconnus. Enfin, les résultats obtenus pour un certain type de sol dans un certain contexte naturel et humain sont trop souvent généralisés et présentés comme des lois universelles. Les résultats du programme ASPITET montrent à quel point les sols sont divers, en fonction de leurs héritages géochimiques initiaux puis de leur évolution pédogénétique et de leur fonctionnement actuel. D'une « série de sols » à une autre, ils diffèrent par leurs conditions de pH, par leur dynamique hydrique, par l'abondance et la nature des matières organiques, par l'activité des micro-organismes, et par diverses interactions ou antagonismes entre ETM.

Les « séries de sols » ne doivent pas seulement être prises en compte pour l'interprétation des teneurs totales, elles doivent également servir de base d'échantillonnage et de raisonnement pour les études sur la bio-disponibilité des ETM pour les plantes et sur leur absorption effective. Des études menées conjointement avec l'équipe de Biogéochimie de l'INRA Bordeaux ont montré que l'absorption des ETM par le blé et le colza étaient largement tributaires du type de sol, indépendamment des teneurs totales (Mench *et al*, 1997 ; Tremel *et al*, 1997b).

### 3.2. Autres résultats

On peut les récapituler sous la forme des douze points suivants.

1) L'étude de différentes couches d'un même horizon labouré a montré que, sauf contamination ou épandage très récents, on peut considérer les horizons labourés comme homogènes sur toute leur épaisseur. Ainsi, un prélèvement entre 0 et 15 cm est représentatif de l'ensemble de l'horizon labouré (lequel peut faire 25, 28 ou 32 cm d'épaisseur).

2) Pour certains types de sols, les variations des concentrations au sein d'un même solum sont importantes (Luvisols, Planosols, Podzosols). Ces variations sont encore plus considérables lorsqu'un horizon d'accumulation de fer et/ou de manganèse est présent.

3) Une étude simple de l'ensemble de la population a fait apparaître que les gammes des teneurs mesurées sont extrêmement larges (tab. I). Celles-ci dépendent beaucoup de la roche-mère, du type de sol et du type d'horizon considérés.

4) Les médianes sont beaucoup plus représentatives de la structure des populations étudiées que les moyennes qui sont trop influencées par quelques valeurs extrêmes (tab. I).

5) Il n'y a pas de valeurs anormalement basses (« outliers inférieurs »). Il existe, en revanche, un certain nombre d'« outliers supérieurs » qui tous appartiennent à seulement quelques « familles pédogéologiques » bien identifiées.

6) Les résultats sont extrêmement tributaires de l'échantillon. Notre collection d'échantillons (815 horizons issus de 382 solums différents) est fortement marquée par l'abondance des sols à textures argileuses et par la présence de quelques « familles pédogéologiques » très chargées en ETM (sols affectés par des minéralisations sur le pourtour nord et nord-est du Morvan et « terres rouges » ferrallitiques du Poitou, notamment). Cf annexe 1.

**Tableau I. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans des sols français**

Population générale de 815 échantillons ; horizons notoirement contaminés exclus

A = seuils de l'arrêté du 8 janvier 1998 sur l'épandage des boues d'épuration ;

B = nombre de valeurs supérieures au seuil A.

	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn	Fe
<i>(nb valeurs)</i>	<i>(768)</i>	<i>(695)</i>	<i>(791)</i>	<i>(787)</i>	<i>(797)</i>	<i>(790)</i>	<i>(804)</i>	<i>(735)</i>	<i>(767)</i>
minimum	<0,02	<1	<2	<2	<2	2,2	<5	<10	0,05
1 <sup>er</sup> décile	0,03	3,1	27,5	5,0	8,7	17,2	31	149	1,27
1 <sup>er</sup> quartile	0,07	7,6	45,1	8,2	18,0	23,1	49	408	2,16
<b>médiane</b>	<b>0,16</b>	<b>14,0</b>	<b>66,3</b>	<b>12,8</b>	<b>31,0</b>	<b>34,1</b>	<b>80</b>	<b>754</b>	<b>3,24</b>
<i>moyenne</i>	<i>0,42</i>	<i>17,1</i>	<i>75,0</i>	<i>14,9</i>	<i>41,3</i>	<i>64,8</i>	<i>149</i>	<i>7585</i>	<i>3,65</i>
3 <sup>e</sup> quartile	0,47	21,3	90,7	18,1	48,6	48,5	132	1473	4,57
9 <sup>e</sup> décile	1,06	32,4	118,0	27,2	78,9	91,5	275	3332	6,47
maximum	6,99	148,0	691,0	107,0	478,0	3 088	3 820	24 975	19,16
A	2	30 <sup>a</sup>	150	100	50	100	300		
B	26	82	39	1	186	76	71		

<sup>a</sup> = ce seuil, proposé par Godin en 1984 pour le cobalt. n'a pas été retenu dans la norme française.

**Tableau II. Coefficients de corrélation r entre le fer total et d'autres variables**

calculées pour six séries de sols (Baize, 1997c)

A = teneur en argile ; CEC = capacité d'échange cationique ; ns = non significative au seuil de 1% ; nd = non déterminé.

	nb	A	CEC	Cu	Co	Cr	Cd	Pb	Zn	Ni	Mn	Fer li
Cudot	(47)	0,92	0,86	0,84	0,61	0,92	ns	ns	0,83	0,93	ns	0,91
Chamoux	(24)	0,89	0,64	0,73	ns	0,82	ns	0,67	0,77	0,76	ns	0,91
Magny	(54)	0,78	0,85	0,93	0,69	0,68	ns	ns	0,41	0,87	0,85	0,9*
Sergines	(14)	0,99	0,96	0,89	ns	0,95	ns	ns	0,95	0,96	ns	0,9f
Nitry	(28)	0,99	0,87	0,62	ns	0,98	ns	-0,52	0,89	0,97	-0,52	nd
Lys	(30)	0,80	0,52	*	0,84	0,94	ns	ns	ns	0,82	ns	nd

\* plusieurs échantillons légèrement contaminés par des traitements au sulfate de cuivre (cultures de pommes de terre)

7) L'élément pour lequel les valeurs mesurées sont le plus souvent supérieures au seuil de la norme AFNOR est le nickel : dans 186 cas sur 797, soit 23 % des cas (tous horizons - cf. tab. I) ; dans 138 cas sur 1 091, soit 13 % des cas (horizons de surface labourés - cf. annexe 2). En effet, ce seuil a été fixé trop bas. La plupart des sols argileux et riches en fer approchent ou excèdent cette valeur de 50 mg de Ni par kg.

8) L'étude des relations bi-variables a bien mis en évidence le rôle majeur du fer en tant qu'élément de référence. En effet, l'immense majorité des horizons respecte bien une relation linéaire entre concentration en ETM et teneur totale en fer. Plus il y a de fer dans un sol, plus forte sera la teneur en Co, Cr, Cu, Ni et Zn. Cette relation est bonne pour l'ensemble de la population, elle est encore meilleure lorsqu'on raisonne au sein d'un même "série de sols" (tab. II). Le plus souvent le cadmium et le plomb ne sont pas corrélés au fer mais sont plus abondants dans l'horizon de surface que dans les autres horizons plus profonds.

9) Dans la population étudiée, une dizaine de « familles pédogéologiques » ou « séries de sols » se singularisent nettement pour la plupart des relations entre ETM et fer total. Les unes sont nettement plus chargées en tel ou tel ETM que leur teneur en fer pouvait le faire escompter, pour d'autres, c'est l'inverse. D'autres enfin, se caractérisent par des teneurs très élevées en l'ETM considéré et en fer.

10) Globalement, il y a une forte relation entre la teneur en argile de l'échantillon étudié et les teneurs totales en fer, en manganèse et en les 7 ETM étudiés. Les matériaux et horizons très sableux ou très limoneux sont les plus pauvres. Mais cette relation statistique globale ne permet pas de juger de telle ou telle valeur et de savoir si elle est naturelle ou résulte d'une contamination.

11) L'étude multivariée menée sous la forme d'une analyse en composantes principales (ACP) a fait à nouveau apparaître la dizaine de « familles pédogéochimiques » qui constituent autant d'anomalies naturelles. Les individus appartenant à ces familles « pèsent » très lourd dans la structuration et l'allongement du nuage de points dans l'espace multidimensionnel (c/annexe 1).

12) Le carbonate de calcium des sols calcaires se comporte comme un diluant. Tout se passe comme si le fer et la plupart des ETM étaient dilués dans une quantité variable de carbonate de calcium, la décarbonatation naturelle progressive entraînant automatiquement une augmentation relative des teneurs en fer et éléments traces.

## 4. Stratégies d'estimation des contaminations

Pour déceler et estimer des contaminations (même modestes) en ETM dans les sols, on peut faire appel à une ou plusieurs des approches décrites ci-dessous qui ont chacune leurs avantages et inconvénients.

#### 4.1. Démarche de comparaison verticale ponctuelle

Il s'agit de comparer les teneurs en éléments traces de l'horizon labouré avec celles des horizons sous-jacents. Lors de cette confrontation, il faut cependant prendre en compte des différences parfois importantes de teneurs en argile, carbone, fer ou calcaire. De fortes teneurs en surface contrastant avec des concentrations beaucoup plus faibles immédiatement en dessous sont plutôt un indice d'apports importants liés aux activités humaines. En effet, il n'y a aucune raison pour que cet horizon de surface présente des teneurs en éléments traces beaucoup plus élevées que celles mesurées dans les horizons sous-jacents. Au contraire, dans de nombreux types de sols, les horizons supérieurs sont plutôt appauvris en argile, en fer et en la plupart des éléments traces (Luvisols, Néoluvisols, Planosols). En revanche, de fortes teneurs en surface mais continuant de croître avec la profondeur sont plutôt un argument pour une origine géogène donc naturelle.

Cette méthode ne nécessite pas de connaissances pédologiques régionales ni générales, c'est pourquoi elle peut être utilisée par quiconque. Elle est cependant plus délicate pour le plomb et le cadmium car ces deux éléments sont presque toujours plus abondants dans l'horizon de surface que dans les horizons sous-jacents, sous cultures comme sous forêts. Cela est dû aux affinités particulières de Pb et Cd pour les matières organiques et pour une large part au recyclage bio-géochimique naturel. On notera enfin que cette méthode implique que le contaminant éventuel soit demeuré dans l'horizon de surface, ce qui n'est pas toujours vérifié.

#### 4.2. Démarche de comparaison latérale

Cette approche analogique consiste à comparer l'échantillon sur lequel on s'interroge au même type d'horizon issu du même type de sol, situé sous forêt, à proximité, et censé être intact de contaminations (fig. 1, ci-dessus). Encore faut-il vérifier que ce sol forestier de référence n'ait pas été contaminé anciennement par telle ou telle activité humaine (cristallerie, exploitation minière).

Cette démarche est très proche de celle employée dans les expérimentations agronomiques, qui consiste à comparer une placette ayant reçu tel traitement à une placette voisine n'ayant pas reçu ce traitement et considérée comme "témoin", toutes les autres conditions étant identiques.

La méthode de comparaison latérale est facile à mettre en oeuvre. Le prélèvement du (ou des) « témoin(s) » est réalisé en même temps que celui de l'horizon à tester. En outre, elle n'est pas onéreuse (peu de prélèvements à faire) mais elle nécessite la présence d'une personne capable de reconnaître sur le terrain type de sol et type d'horizons. Enfin, il est possible de tester des horizons profonds, pas seulement des horizons de surface.

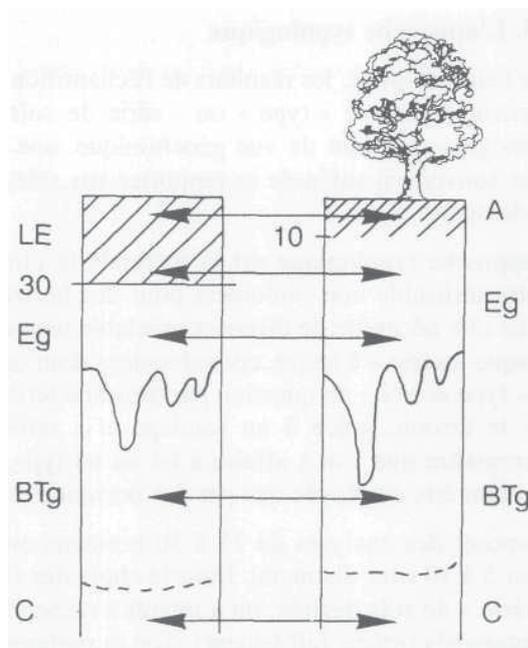


Figure 1. Principe de la démarche de comparaison latérale  
exemple d'un Luvisol dégradé

### 4.3. L'approche typologique

Par cette méthode, les résultats de l'échantillon sont comparés avec les données collectées sur le même horizon du même « type » ou « série de sols » (*cf* glossaire). Dans une telle sous-population, très homogène du point de vue géochimique, une faible contamination peut facilement être détectée. Le plus souvent, il suffit de se rapporter aux relations naturelles métal/fer ou métal/taux d'argile (tab. II, ci-dessus).

L'approche typologique est la méthode la plus efficace et la plus sensible. Elle présente l'avantage d'être utilisable non seulement pour des horizons de surface mais aussi pour des horizons profonds. Mais elle nécessite de disposer préalablement de bonnes connaissances typologiques et analytiques de chaque « série » à tester, connaissances dont on ne dispose pas toujours. Il faut être capable de définir le « type de sol » en question par des caractéristiques morphologiques et analytiques précises. Ensuite, sur le terrain, grâce à un sondage à la tarière ou en creusant une fosse, il faut être capable de reconnaître que l'on a affaire à tel ou tel type, préalablement défini. Il s'agit donc d'une approche ne pouvant être employée que par des personnes ayant une bonne formation en pédologie.

Disposer des analyses de 15 à 30 horizons est suffisant (soit un coût de l'ordre de 9 000 à 18 000 F pour 5 à 10 sites distincts). Dans le choix des sites à prélever, outre la vérification qu'il s'agit bien de la « série » de sols désirée, on a intérêt à rechercher les emplacements les moins susceptibles d'avoir été contaminés (même faiblement), d'où la préférence pour des solums forestiers.

### 4.4. Approche granulométrique

Le principe de cette méthode est de confronter la ou les valeurs que l'on veut tester aux valeurs obtenues précédemment pour la même catégorie granulométrique. Il faut donc disposer du plus grand nombre possible d'analyses de référence réalisées antérieurement par soi-même ou par d'autres (ETM et granulométrie).

Par cette approche, une valeur anormale est assez facilement décelée sur les diagrammes de type élément-trace / taux d'argile. Les valeurs nettement « au-dessus du paquet » sont anormales, mais il n'est pas toujours facile de tracer la « ligne de démarcation » entre ce « paquet » où les valeurs sont considérées comme « normales » et les valeurs considérées comme des anomalies. Certaines contaminations que l'on décèle aisément par l'approche de comparaison verticale ou par l'approche typologique peuvent ne pas apparaître sur ces diagrammes.

Cette méthode semble plus efficace pour les horizons à texture équilibrée, limoneux ou sableux que pour les horizons argileux. Bien adaptée pour Cu, Cr, Ni, Zn et Co, elle ne s'applique pas bien au cadmium. Son principal avantage est d'être très simple et peu coûteuse (il n'est pas nécessaire de faire analyser d'autres échantillons). C'est malheureusement une méthode très grossière, ne faisant apparaître que des anomalies très évidentes et qui ne permet pas de distinguer ce qui est anomalie naturelle et contamination. En outre, elle nécessite de se référer à une collection de valeurs de références obtenues antérieurement.

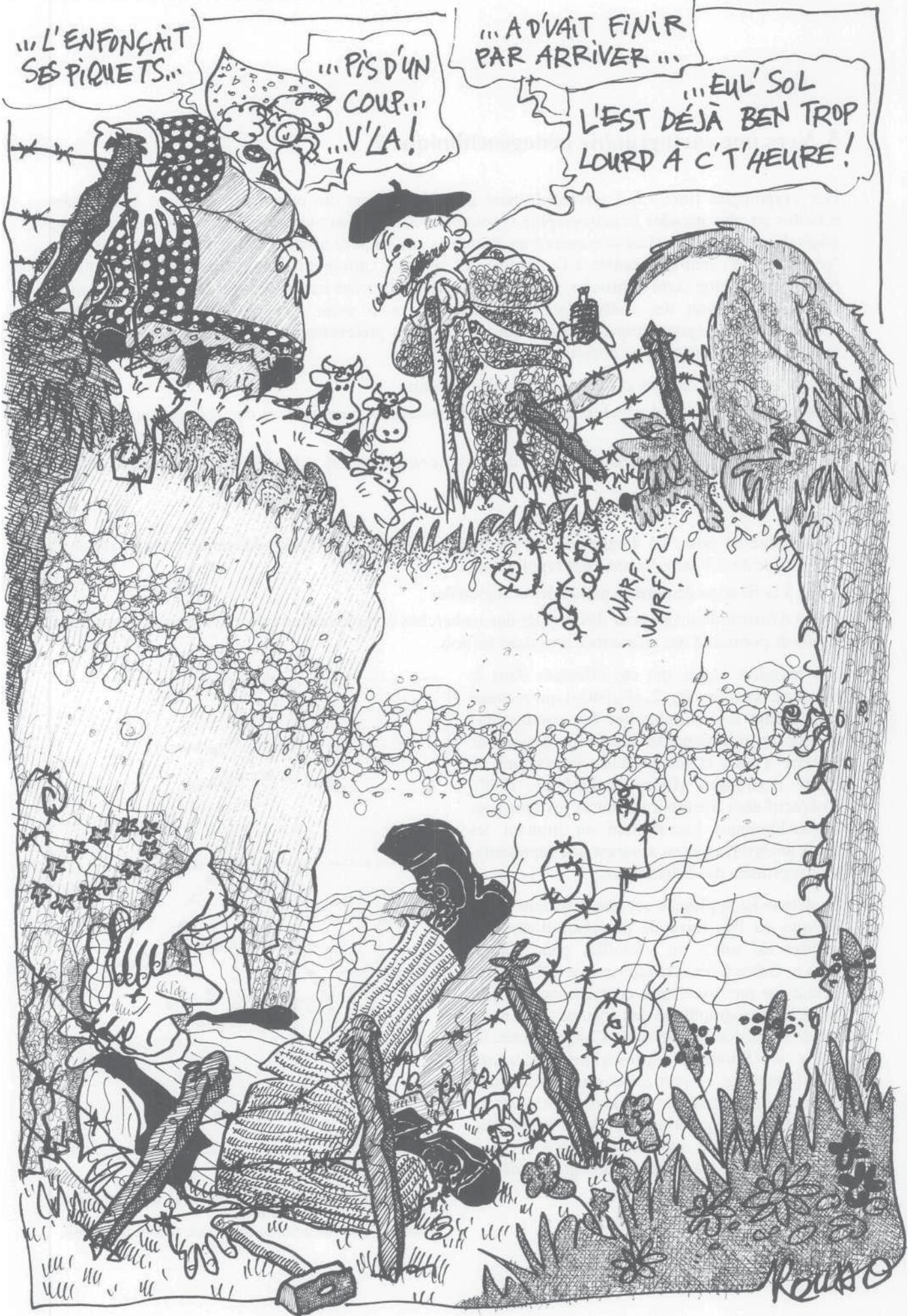
Les quatre méthodes de détection des contaminations ne s'opposent pas. Elles peuvent être facilement combinées et se recoupent et se complètent alors l'une l'autre. Pour consulter des exemples et en savoir plus, se reporter à Baize, 1997d ; 1997e et 1997f.

... L'ENFONÇAIT  
SES PIQUETS...

... PIS D'UN  
COUP...  
... V'LA!

... AD'VAIT FINIR  
PAR ARRIVER...

... EUL' SOL  
L'EST DÉJÀ BEN TROP  
LOURD À C'T'HEURE!



## 5. Vers une cartographie pédogéochimique ?

Les « typologies fines » qui servent de base à l'établissement des cartes pédologiques à moyennes échelles ou plus grandes (« cartographie typologique ») s'avèrent ensuite un excellent outil pour une généralisation spatiale. Les concentrations mesurées sur un petit nombre de sites représentatifs d'une "série de sols" sont extrapolées à l'ensemble des surfaces cartographiées comme correspondant à la même série. Selon cette démarche, il est possible de réaliser des cartes pédogéochimiques régionales ou nationales pour des coûts relativement modestes sans avoir recours à un « *grid sampling* » (échantillonnage systématique régulier) qui implique des prélèvements systématiques forcément très nombreux, donc onéreux, et difficiles à interpréter.

À de telles cartes, on peut assigner les objectifs suivants :

- détermination du fond géochimique naturel des matériaux parentaux et des sols du secteur étudié (références) ;
- estimation de l'état de contamination des sols (contamination agricole et contamination diffuse générale).

D'où :

- possibilité de poser un diagnostic à la parcelle, en référence au fond pédogéochimique naturel du même type de sol par raisonnement typologique ;
- aide à la fixation de normes nationales et régionales ;
- base d'échantillonnage pour développer des recherches complémentaires sur les formes, la mobilité, la bio-disponibilité des éléments traces dans les sols.

Les premiers essais ont été effectués dans le secteur d'Avallon (fig. 2, ci-contre) qui recoupe trois petites régions naturelles fort contrastées : le Morvan granitique, la dépression liasique de la terre Plaine et les plateaux jurassiques de Basse Bourgogne (Baize et Roddier, 1998). L'objectif était d'estimer au mieux les fonds pédogéochimiques locaux tout en limitant les coûts analytiques et en assurant une représentativité optimale des échantillons.

La démarche appliquée est une démarche typologique où l'on raisonne et échantillonne par « séries de sols » ou « familles pédogéologiques ». Grâce à cet échantillonnage optimisé, se basant sur une excellente connaissance typologique et cartographique des sols, un petit nombre de répétition est suffisant. Chaque « série de sols » ou « famille pédogéologique » est traitée spécifiquement, en particulier quant au nombre et au type d'horizons qui seront prélevés et analysés. L'extrapolation spatiale de la connaissance typologique est possible grâce à l'existence préalable de cartes pédologiques détaillées au 1/50 000.



Figure 2. Emplacement des expériences ASPITET dans l'Yonne  
(le secteur étudié se prolonge en fait vers l'est jusqu'à Semur, en Côte-d'Or)

La connaissance obtenue sur un secteur « pilote » relativement petit (40 000 à 70 000 ha) est extrapolable, avec très peu de travaux supplémentaires, dans les secteurs voisins présentant les mêmes roches et les mêmes types de sols.

Ce secteur en Avallonnais présentait de nombreux avantages. D'une part il était parfaitement connu au plan pédologique et géologique, d'autre part les teneurs naturelles en ETM y étaient élevées, avec peu d'influence de contaminations humaines. Mais nous nous sommes heurtés à plusieurs obstacles : des minéralisations d'origine géologique spatialement irrégulières, et des couvertures pédologiques, anciennes et fortement différenciées, plus ou moins tronquées.

Cette démarche typologique devrait être plus facile à employer dans des zones à la fois moins anomaliques et plus homogènes, notamment les grandes plaines agricoles du bassin de Paris.

D'ores et déjà, cette même démarche typologique est en cours d'application à deux autres régions françaises, dans d'autres contextes géologiques et pédologiques :

- retenue dans le cadre du programme GESSOL du ministère de l'Environnement, une action de recherche est entamée avec le BRGM Orléans sur le secteur de La Châtre (Indre). Elle poursuit deux objectifs : d'une part, évaluer l'état de contamination diffuse en milieu rural par comparaison avec les fonds pédogéochimiques naturels et, d'autre part, réaliser une comparaison méthodologique avec trois techniques des géologues (prospection géochimique stratégique de l'inventaire minier, analyses de « limons d'inondations », analyses de sédiments de ruisseaux) ;

- « Élaboration d'un référentiel pédogéochimique dans le Nord-Pas-de-Calais » : programme sur trois ans associant l'ISA de Lille, l'INRA d'Arras et la Faculté de Gembloux (Belgique) sur des crédits du conseil régional et du ministère de l'Environnement, visant à évaluer l'état de contamination diffuse et industrielle en milieu rural grâce à l'estimation des fonds pédogéochimiques naturels - rapport prévu en mai 2001.

## 6. Qualité des sols de France en zones rurales

Dans les zones rurales étudiées, le degré général de contamination en ETM par les activités humaines demeure très faible, souvent imperceptible. Ceci implique que les flux de retombées atmosphériques générales d'origine lointaine sont peu importants par rapport aux stocks naturels en ETM des sols (hérités des roches et diversement redistribués dans les sols au cours de la pédogenèse). Sous agriculture, les teneurs en cadmium sont souvent doublées par rapport aux mêmes sols restés sous forêt, mais elles restent en général modestes (par exemple 0,30 au lieu de 0,12 mg/kg).

Il y a cependant cinq situations où les sols marquent nettement des contaminations, faciles à mettre en évidence à l'aide des analyses des teneurs totales :

- les zones de vignes et d'arboriculture (actuelles ou anciennes) sont presque toujours contaminées par du cuivre, à des degrés divers, parfois très fortement. En effet, des traitements répétés à la "bouillie bordelaise" ont été réalisés pour lutter contre le mildiou, depuis parfois un siècle, à des doses d'apports variant entre 3 et 30 kg de cuivre par ha et par an, selon le lieu et l'époque. Les sols de vigne ainsi contaminés par le cuivre présentent aujourd'hui des teneurs totales comprises entre 50 et 600 mg/kg. De telles contaminations n'affectent que l'horizon de surface mais les plus fortes d'entre elles peuvent rendre impossible la replantation de jeunes vignes ou une culture céréalière après arrachage. Elles ont également un impact négatif sur l'activité microbienne car le cuivre est un puissant antibiotique. Les vignobles français ainsi plus ou moins touchés représenteraient plus de 1 million d'hectares ;

- des parcelles exploitées pour certaines cultures intensives très spécialisées peuvent avoir été contaminées par l'intermédiaire de produits phytosanitaires (Zn, Hg, Pb, As, Cu) ou par une fertilisation intense (Cd) ;
- des parcelles qui ont reçu des épandages de boues ou gadoues très chargées en « métaux lourds », à des doses cumulées excessives (Cd, Pb, Cu, Zn, Hg), dans les années 1970, à une époque où il n'y avait aucune réglementation ;
- des parcelles situées à proximité d'usines métallurgiques ou d'exploitations minières ou d'installations polluantes (certains incinérateurs, usines traitant ou retraitant du plomb). Il s'agit là de contaminations par voie atmosphérique d'origine proche ;
- enfin, l'épandage de lisiers de porcs à hautes doses sur les terrains agricoles n'est pas sans conséquences quant aux teneurs en Cu et Zn des sols. En effet, ces deux éléments sont ajoutés volontairement aux rations des animaux pour leur éviter certaines maladies. Or la plus grande partie de ces éléments est évacuée dans les fèces et aboutit à la surface des sols épandus. En Bretagne, l'augmentation serait de l'ordre de 4 à 7 mg/kg en 15 ans pour Cu et de 15 à 20 mg/kg pour Zn. Une telle évolution ne peut pas se prolonger indéfiniment sans risques.

## 7. Propositions de valeurs numériques comme « seuils d'investigation »

La teneur totale en tel ou tel élément permet de connaître le stock de cet élément à un moment donné, elle ne donne malheureusement aucun renseignement sur sa mobilité dans le sol ni sur sa disponibilité vis-à-vis des plantes. Il est pourtant souhaitable de bien faire la part de ce qui est naturel et de ce qui est contamination, car le métal des apports anthropiques présente certainement des risques supérieurs au métal naturel, souvent immobilisé sous des formes relativement inertes.

Il est pratiquement impossible de fixer une valeur unique de teneur totale d'un élément ayant une signification de risque utilisable pour tous les types de sols, toutes les plantes cultivées, tous les divers usages des sols.

En matière de tuyaux, par exemple, l'AFNOR reconnaît plusieurs dizaines de modèles en fonction des fluides utilisés et des pressions appliquées, auxquels correspondent autant de normes techniques distinctes. En matière d'analyses de sang, il existe des valeurs normales (albumine, cholestérol, urée, etc.) ayant une certaine signification pour l'espèce humaine. On n'aurait pas idée de fixer la même valeur « normale » pour le sang des hommes, des porcs, des poules et des chevaux. Vouloir fixer une seule valeur-seuil « normal » pour tous les types de sols, aux propriétés granulométriques, physiques et chimiques pourtant si différentes, est à la fois impossible et déraisonnable.

Une valeur-seuil d'une norme ne peut donc servir que de « signal d'alerte » au dessus duquel une investigation plus détaillée est nécessaire. Les seuils actuels de l'arrêté du 8 janvier 1998 sont placés presque toujours trop haut pour signaler la plupart des anomalies, qu'elles soient naturelles ou anthropiques. Le tableau III ci-dessous présente nos propositions exprimées en mg/kg.

Tableau III. Proposition de "seuils d'investigations"

Élément	Valeur seuil de l'arrêté du 8 janvier 1998	Proposition pour un « seuil d'investigation »
Cd	2,0	0,70
Co	(30)(Godin, 1983)	30
Cr	150	100
Cu	100	35
Ni	50	70
Pb	100	60
Zn	300	150

## 8. Nouveaux programmes apparentés

Deux programmes importants sont actuellement en cours, plus ou moins inspirés des résultats et des connaissances tirées du programme ASPITET.

### 8.1. Le programme ADEME/INRA

Dans le cadre de la réalisation des plans d'épandage des boues d'épuration, de très nombreuses analyses des "métaux lourds" dans les sols ont été effectuées sur tout le territoire national depuis une dizaine d'années. Il aurait été dommage de ne pas exploiter au mieux cette masse de données et de ne pas en tirer un maximum d'informations sur la qualité des sols cultivés français. C'est pourquoi l'ADEME et l'unité de Science du sol ENIRA d'Orléans se sont associées pour réaliser la collecte puis le traitement de ces données, au plan national.

Les analyses ne portent donc que sur les horizons de surface de sols cultivés, sélectionnés comme pouvant raisonnablement recevoir des épandages de boues d'épuration. Les résultats d'analyses obtenus avant épandages traduisent donc à la fois le fond pédogéochimique naturel local et la somme des apports liés aux activités humaines, récentes ou plus anciennes. Les origines de ces contaminations anthropiques peuvent être agricoles (fumiers, amendements, fertilisants), urbaines ou industrielles ; les sources peuvent être locales ou diffuses.

Les informations collectées sont non seulement les teneurs totales en éléments traces mais également les analyses de caractérisation courantes du sol, l'identité des laboratoires d'analyses, les méthodes analytiques utilisées, et des informations relatives au type de sol et à la roche-mère. Les coordonnées géographiques précises (coordonnées Lambert) sont indispensables si l'on veut pouvoir réaliser des traitements spatiaux.

Ce travail a rencontré de nombreuses difficultés pratiques, les unes liées au processus de collecte, les autres à l'insuffisance ou à l'hétérogénéité des données recueillies. Il apparaît, en effet, de fortes disparités dues principalement aux méthodes analytiques employées par les différents laboratoires (une vingtaine, à travers toute la France). Deux méthodes de mise en solution normalisées sont utilisées avant le dosage des « métaux lourds » : l'extraction à l'eau régale (norme AFNOR X 31-151) ou l'extraction par l'acide fluorhydrique et l'acide perchlorique (norme AFNOR X 31-147). On sait par ailleurs que cela a de notables conséquences sur les valeurs obtenues, particulièrement pour le chrome, le nickel et le plomb.

À ce jour, la population totale regroupe 11 414 échantillons de surface de sols cultivés, provenant de 86 départements, analysés pour la plupart entre 1992 et 1997, dont 8 530 sont correctement localisés en coordonnées géographiques. La présentation et l'analyse complète des résultats sera l'objet d'une publication par l'ADEME.

### 8.2. Le programme QUASAR

(QUALité des Sols Agricoles et des Récoltes)

Ce programme est un élément de l'AIP AGREDE (AGRICulture et Épandage des DÉchets urbains et agro-industriels) de l'INRA. Son premier objectif était de connaître les teneurs en ETM dans les grains de blé, en raisonnant par « série de sols », pour une agriculture « normale », c'est-à-dire sans épandages de boues ou autres déchets. Il s'agit donc d'établir d'abord des références indiscutables qui puissent permettre d'élaborer des normes nationales ou européennes de qualité des blés qui ne constituent pas un handicap pour des régions françaises entières. Un deuxième objectif était de déterminer l'influence du type de sol sur la composition en ETM des grains de blé. Ensuite, il sera

possible de savoir si les épandages de boues sur des sols agricoles modifient sensiblement cette composition.

En 1998, ce programme s'est volontairement limité à une seule variété de blé tendre (Trémie). Dix « séries de sols » contrastées ont été étudiées dans la moitié nord de la France. Pour chacune d'entre elles, 12 parcelles distinctes ont été sélectionnées, constituant autant de répétitions. 120 échantillons de blé ont ainsi été prélevés ainsi que les horizons de surface des sols, pour analyses.

Les premiers résultats devraient être publiés d'ici la fin mai 2000. La suite du programme consistera en l'analyse de blés cultivés sur des parcelles ayant reçu des boues d'épuration, sur les mêmes "séries de sols" qu'en 1998 ; puis en l'application de la même démarche à d'autres plantes (blé dur, pomme de terre). Seront testés également des réactifs susceptibles d'extraire seulement les formes des métaux les plus "labiles" (solubles et échangeables), afin de mettre au point des indicateurs simples permettant de mieux estimer l'exposition des végétaux et le risque de phyto-disponibilité.

La réussite de ce programme implique la collaboration de plusieurs laboratoires et domaines de l'INRA, d'ingénieurs de l'ITCF et de nombreuses chambres d'Agriculture •

## Publications liées au programme INRA-Aspitet

1994

BAIZE D Teneurs totales en "métaux lourds" dans les sols français  
Premiers résultats du programme ASPITET. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 22.31-46.

B UZE D., CHRETIEN J. Les couvertures pédologiques de la plate-forme sinémurienne en Bourgogne Particularités morphologiques et pédogéochimiques. *Étude et Gestion des Sols*, 1 (2), 7-27

1995

BAIZE D Sols divers. Des sols naturellement chargés en éléments métalliques. *Pour la Science*, juin 1995, 1 p

1996

(a) BAIZE D Le cadmium dans les sols. *Numéro spécial INRA-Pour la Science* juin 1996, p 17

(b) BAIZE D Teneurs totales en cadmium dans les sols français. Fonds géochimiques locaux et contaminations. V\* *Journ Étude des Sols*, Rennes, pp. 155-157

(c) BAIZE D. Éléments traces métalliques dans les sols. Intérêt d'une typologie détaillée. V\* *Journ. Etude des Sols*, Rennes pp. 159-160.

(d) BAIZE D. Détection des contaminations modérées en « métaux lourds » dans les sols agricoles. Intérêt et limites de la norme AFNOR U 44-041. /f *Symposium international environnement et nouvelles technologies- « Protection des Sols »* Bordeaux, septembre 1996.

CHASSIN P., BAIZE D., CAMBIER PH., STERCKEMAN T. Les éléments traces métalliques et la qualité des sols : impact à moyen et à long terme. *Étude et Gestion des Sols*, 3(4), 297-306

1997

(a) BAIZE D- Les éléments traces dans les sols agricoles : constituants naturels et contaminations. *ADEME Journées techniques : Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage des boues d'épuration urbaines*, pp 160-161.

(b) BAIZE D Le cadmium dans les sols fonds géochimiques locaux et contaminations *ADEME. Journées techniques - Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage des boues d'épuration urbaines*, pp. 162-163.

(c) Baize D Iran as a Pedo-Geochemical Indicator for Determining the Local Background and Assessing Low-Level Contamination of Soils *4th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements*, June 1997, Berkeley, pp. 547-548.

(d) BAIZE D. *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation* INRA Éditions, Paris. 410 p

(e) BAIZE D. Détection de contaminations modérées en éléments traces dans les sols agricoles. *Analysis Magazine*, 25(9-10), 29-35.

(f) BAIZE D Interpréter les teneurs totales en micro-polluants minéraux : fonds géochimiques locaux et contaminations modérées. *HT\*Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de ferre*. COMIFER-GEMAS. Blois. pp. 181-192.

(g) BAIZE D *Problématique des métaux dans les sols agricoles. Le cas de l'Yonne* Forum Agriculture-Environnement Dijon. 6 pages.

BAIZE D , PAQUEREAU H Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Mame. *Étude et Gestion des Sois*, 2, 77-93.

CHASSIN P., BAIZE D., CAMBIER PH., STERCKEMAN T. Les éléments traces métalliques et la qualité des sols : impact à moyen et à long termes. *Chambres d'Agriculture*. Supplément au n° 856, pp. 35-39-

MENCH M , BAIZE D., MOCQUOTB. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne district, Burgundy, France. *Environmental Pollution* 95(1), 93-103.

(a) TREMEL A., MASSON P., STERCKEMAN TH , BAIZE D., MENCH M. Thallium in French agrosystems I Thallium contents in arable soils *Environmental Pollution* 95(3), 293-302

(b) TREMEL A., MASSON P., GARRAUD D., DONARD O.F.X., BAEE D., MENCH H M. Thallium in French agrosystems II. Concentration of thallium in field-grown rape and some other plant species. *Environmental Pollution*. 97(1-2), 161-168-

1998

BAIZE D. Les métaux lourds dans les sols de Bourgogne. *Repères* (périodique de l'observatoire régional de l'environnement en Bourgogne). Dijon, pp. 6-7.

BAIZE D., RODDIER S. Les typologies pédologiques détaillées comme outils d'extrapolation spatiale. Application à une cartographie pédogéochimique en Avallonnais (France). *XIV<sup>e</sup> Congrès mondial de la science du sol*, Montpellier. 7 pp.

*Conférence on the Biogeochemistry of Trace Elements*, Wien. Oral présentation, pp. 104-105.

BAIZE D., MENCH M., SAGOT S., SAPPIN-DIDIER V., STRECKEMAN T., GOMEZ A. Trace elements uptake by wheat grains depending on soil types (QUASAR programme). *Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements*, Wien. Poster, pp. 544-545.

1999

BAIZE D., DESLAIS W., GAIFFE M. Anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 85-104.

BAIZE D. Détermination of the pedo-geochemical background. Practical applications. *Proc. 5<sup>th</sup> International*

BAIZE D. Suivi des éléments traces métalliques. *Rencontre nationale « Gestion des boues : les agriculteurs au service des villes ? »* Cons. Région. Franche Comté. 20 et 21 octobre 1999, Besançon. Résumé, 3 p.

**Annexe 1. Teneurs totales en éléments traces dans les sols (France)**

Gammes de valeurs « ordinaires » et d'anomalies naturelles

Les gammes de valeurs présentées ci-dessous correspondent à divers horizons de sols, pas seulement les horizons de surface laboures. Les teneurs sont exprimées en mg/kg de « terre fine » (< 2 mm). Les numéros entre parenthèses renvoient à des types de sols effectivement analysés, succinctement décrits et localisés ci-dessous.

	gamme de valeurs couramment observées dans les sols « ordinaires » de toutes granulométries	gamme de valeurs observées dans le cas d'anomalies naturelles modérées		gamme de valeurs observées dans le cas de fortes anomalies naturelles	
As	1,0 à 25,0	30 à 60	(1)	60 à 284	(1)
Cd	0,05 à 0,45	0,70 à 2,0	d)(2)(3)(4)	2,0 à 16,0	(1)(2)(4)
Cr	10 à 90	90 à 150	(1)(2)(3)(4)(5)	150 à 3 180	(1)(2)(3)(4)(5)(8)
Co	2 à 23	23 à 90	(1)(2)(3)(4)(8)	105 à 148	(1)
Cu	2 à 20	20 à 62	(1)(4)(5)(8)	65 à 102	(8)
Hg	0,02 à 0,10				
Ni	2 à 60	60 à 130	(1)(3)(4)(5)	130 à 2 076	(1)(4)(5)(8)
Pb	9 à 50	60 à 90	(1)(2)(3)(4)	100 à 3 000	(1)(3)
Se	0,10 à 0,70	0,8 à 2,0	(6)	2,0 à 4,5	(7)
Tl	0,10 à 1,7	2,5 à 4,4	(1)	7,0 à 55,0	(1)
Zn	10 à 100	100 à 250	(1)(2)	250 à 3 800	(1)(3)

(1) zones de « métallotectes » à fortes minéralisations (à plomb, zinc, barytine, fluor, pyrite, antimoine) au contact entre bassins sédimentaires et massifs cristallins. Notamment roches liasiques et sols associés de la bordure nord et nord-est du Morvan (Yonne, Côte d'Or).

(2) sols argileux développés sur certains calcaires durs du Jurassique moyen et supérieur (Bourgogne, Jura).

(3) paléosols ferrallitiques du Poitou (« terres rouges »).

(4) sols développés dans des « argiles à chailles » (Nièvre, Yonne, Indre).

(5) sols limono-sableux du Pays de Gex (Ain) et du Plateau Suisse.

(6) « bornais » de la région de Poitiers (horizons profonds argileux).

(7) sols tropicaux de Guadeloupe.

(8) sols d'altération d'amphibolites (région de La Châtre - Indre).

## Annexe 2. Éléments statistiques obtenus pour 1110 horizons de surface de sols cultivés français

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
<i>(nombre de valeurs)</i>	<i>(1 063)</i>	<i>(1 089)</i>	<i>(1 080)</i>	<i>(1 091)</i>	<i>(1 091)</i>	<i>(1 084)</i>
Minimum	0,02	6,6	2,8	2,7	7,5	6
1 <sup>er</sup> décile	0,13	29,9	8,0	<b>11,7</b>	20,4	39
1 <sup>er</sup> quartile	0,18	39,9	10,9	16,7	24,1	50
médiane	<b>0,25</b>	<b>50,0</b>	<b>14,9</b>	<b>23,5</b>	<b>29,3</b>	64
moyenne	0,41	58,2	19,1	30,4	41,3	103
3 <sup>e</sup> quartile	0,43	65,3	20,8	35,5	40,6	96
9 <sup>e</sup> décile	0,80	87,3	30,8	55,3	57,8	160
Maximum	8,10	1007	420	292	1560	2 276
seuil de la norme NF U 44-041	2	150	100	50	100	300
Nombre de valeurs > seuil	16	20	10	138	38	38

