

Anomalies naturelles en Cadmium dans les sols de France

D. Baize ⁽¹⁾, W. Deslais ⁽¹⁾ et Michèle Gaiffe ⁽²⁾

(1) INRA - Unité de Science du Sol, BP 20619 - Ardon - 45166 Olivet - France

(2) Université de Franche Comté - Sciences Végétales, 25030 Besançon Cedex

RÉSUMÉ

A ce jour, de nombreuses anomalies naturelles en cadmium ont été détectées en France. Cet article en fait un premier inventaire, étudie leur répartition spatiale et approfondit la recherche des origines précises de ces anomalies. Localement, on peut mesurer des teneurs en cadmium très supérieures au seuil de 2 mg/kg sans avoir à invoquer une « pollution » anthropogène, même si une étude de la qualité des récoltes produites sur ces sols anormaux présente un intérêt certain.

Deux populations ont été d'abord étudiées. L'une comporte 1310 horizons supérieurs et profonds, prélevés sous culture ou sous forêt, parfaitement identifiés en ce qui concerne leur localisation, leur matériau parental et leur pédogenèse. L'autre est constituée de 11414 échantillons de surface de sols cultivés, provenant de 86 départements. Sur les 10650 analyses de cadmium total, 8530 sont correctement localisées en coordonnées géographiques, mais les informations relatives aux sols et aux roches sous-jacentes sont pauvres ou absentes.

Le traitement de ces deux jeux de données montre que les anomalies en cadmium sont le plus souvent associées à l'existence de roches calcaires du Jurassique ou du Crétacé en Poitou Charentes, Berry, Bourgogne, Champagne et Jura, certains faciès de calcaires semblant être fréquemment associés aux anomalies (calcaires bioclastiques, crayeux, récifaux, oolithiques).

Pour vérifier l'hypothèse du rôle essentiel des faciès des calcaires sous-jacents, des études plus détaillées ont été menées sur trois secteurs sélectionnés en Basse Bourgogne et dans le Jura. L'origine géogène des anomalies en cadmium y est confirmée ainsi que l'influence majeure des faciès, eux mêmes indicateurs des conditions de sédimentation. Des analyses de la teneur en cadmium de plusieurs échantillons de roches ont été réalisées et comparées à des résultats obtenus antérieurement par des auteurs helvétiques dans le Jura suisse. La teneur en Cd dans ces roches jurassiques varie très largement entre 0,02 et 8,15 mg/kg. Il semble que les sédiments néritiques et littoraux, liés à une activité biologique intense, présentent fréquemment des anomalies en cadmium.

L'origine géogène du cadmium est certaine, mais ce cadmium hérité est susceptible de transferts importants au sein des couvertures pédologiques, transferts qui seuls peuvent expliquer l'extrême variabilité spatiale observée aujourd'hui, y compris selon l'axe vertical. Pour un horizon, on doit envisager : - des pertes par lessivage vertical ou latéral, surtout en sols acides, proportionnelles aux flux d'eau traversant les sols ou y circulant ; - des apports latéraux, toujours possibles s'il y a un amont ; - et le recyclage biogéochimique « sur place » (absorption racinaire en profondeur, décomposition des organes végétaux aériens en surface).

Des études détaillées sont menées actuellement sur des toposéquences dans le haut Jura.

Mots clés

Cadmium, qualité des sols, France

SUMMARY

NATURAL CADMIUM ANOMALIES IN FRENCH SOILS

Many natural cadmium anomalies have now been detected in France. This article provides a first list of them, investigates their spatial distribution and furthers research into the precise origins of these anomalies. Cadmium concentrations which are very much higher than the 2 mg/kg threshold can be measured locally without having to invoke man-made « pollution », even though investigation of the quality of the crops produced from these anomalous soils is of some interest.

Two populations were first investigated. One consists of 1310 upper and deep horizons taken from beneath arable land or forest, which are fully identified as regards location, parent material and pedogenesis. The other consists of 11,414 samples of ploughed surface horizons obtained from 86 departments. Of the total of 10,650 cadmium analyses, 8,530 are properly located with geographical coordinates, but information relating to the soils and the underlying rocks is poor or absent.

The processing of these two sets of data shows that cadmium anomalies are most often associated with the presence of Jurassic or Cretaceous limestones in Poitou-Charentes, Berry, Burgundy, Champagne and Jura, and it would seem that some limestone facies are frequently associated with anomalies (bioclastic, chalky, reef and oolitic limestones).

More detailed investigations were performed in three selected areas of Lower Burgundy and the Jura to check the hypothesis of the essential role of the underlying limestone facies. The geogenic origin of cadmium anomalies has been confirmed, as is the predominant influence of the facies, itself an indicator of sedimentation conditions. The cadmium content of several rock samples was analysed and compared with results obtained previously by Swiss authors in the Swiss Jura. The Cd content of these Jurassic rocks varies widely between 0.02 and 8.15 mg/kg. It would appear that neritic and littoral sediments which are associated with intense biological activity frequently show cadmium anomalies.

The geogenic origin of the cadmium is without doubt, but this inherited cadmium is likely to undergo significant transfer within soil mantles. These transfers alone can explain the extreme spatial variability now observed, including that in the vertical axis. In a given horizon consideration must be given to: - losses due to vertical or - lateral leaching, above all in acid soils, in proportion to the flow of water passing through the soils or circulating within them; lateral inputs, which are always possible when in a down-gradient position; - and « in situ » biogeochemical recycling (absorption by roots at depth, decomposition of upstanding plant material at the surface).

Detailed investigations are currently in progress on toposequences in the high Jura.

Key-words

Cadmium, soil quality, France

RESUMEN

ANOMALÍAS NATURALES EN CADMIUM EN LOS SUELOS DE FRANCIA

Actualmente, numerosas anomalías naturales en cadmio han sido detectadas en Francia. Este artículo hace un primer inventario, estudia su repartición espacial y profundiza la investigación de los orígenes precisos de estas anomalías. Localmente, se puede medir contenidos en cadmio muy superiores al umbral de 2mg/kg sin tener que invocar una contaminación antrópica, aun si un estudio de la calidad de las cosechas producidas sobre estos suelos presentan un cierto interés.

Dos poblaciones fueron estudiadas. La primera comporta 1 310 horizontes superiores y profundos, tomados bajo cultivos o bajo bosque, perfectamente identificados por su localización, su material madre, y su pedogénesis. La segunda es constituida por 11 414 muestras de superficie de suelos cultivados, proviniendo de 86 departamentos. Sobre los 10 650 análisis en cadmio total, 8 530 son correctamente localizadas en coordenadas geográficas, pero las informaciones relativas a los suelos y las rocas subyacentes son pobres o ausentes.

El tratamiento de estos dos conjuntos de datos demuestra que las anomalías en cadmio están a menudo asociadas a la presencia de rocas calcáreas del Jurásico o del Cretáceo en Poitou-Charentes, Berry, Bourgogne y Jura, ciertas formas de calizas parecen estar frecuentemente asociadas a las anomalías (calizas bioclásticas, de arrecifes, oolíticas).

Para investigar una hipótesis del papel esencial de las formas de calizas subyacentes, estudios detallados fueron efectuados en tres sectores seleccionados en baja Bourgogne y en el Jura. El origen geológico de las anomalías en cadmio fue confirmado, así que la influencia mayor de las formas, ellas mismas son indicadores de las condiciones de sedimentación. Análisis del contenido en cadmio de varias muestras de rocas fueron realizados y comparados a los resultados obtenidos anteriormente por autores helvéticos en el Jura suizo. El contenido en cadmio en las rocas jurásicas varía muy ampliamente entre 0,02 y 8,15 mg/kg. Parece que los sedimentos neríticos y litorales, ligados a una actividad biológica intensa, presentan frecuentemente anomalías en cadmio.

El origen geológico del cadmio es seguro, pero este cadmio heredado es susceptible de transferencias importantes en el seno de las cubiertas pedológicas, transferencias que si mismas pueden explicar la extrema variabilidad espacial observada ahora, incluyendo el eje vertical. Para un horizonte, se deben considerar: - pérdidas por lixiviación vertical o lateral, sobre todo en suelos ácidos, proporcionales a los flujos de agua que atraviesen los suelos o que circulan; - aportes laterales, siempre posibles si existe un aguas arriba; - y el reciclaje biogeoquímico "en el lugar" (absorción radicular en profundidad, decomposición de los residuos vegetales aéreos en la superficie).

Estudios detallados son realizados actualmente sobre toposecuencias en el alto Jura.

Palabras claves

Cadmium, calidad de los suelos, Francia.

Dans le contexte actuel de l'agriculture mondiale (concurrence économique exacerbée, pression croissante des consommateurs), 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.).

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 est en tête de la liste des métaux potentiellement toxiques et devant donc être surveillés dans tous les compartiments de notre environnement.

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 (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) ou à des références étrangères. Il est plus raisonnable d'estimer d'abord le fond pédo-géochimique naturel local (Baize, 1996, 1997a, 1997b, 1997c).

A ce jour, de nombreuses anomalies naturelles en cadmium ont été détectées en France (Baize et Chrétien, 1994; Baize, 1997a) comme dans le Jura Suisse (Atteia *et al.*, 1994, 1995; Okopnik, 1997; Dubois *et al.* 1998).

Il est temps 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. En effet, 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 ne va pas cesser de croître dans l'avenir. En d'autres termes, il faut prendre conscience qu'on peut observer localement des teneurs en cadmium très supérieures au seuil de 2 mg/kg 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).

Cet article fait donc le point des connaissances actuelles sur les teneurs totales en cadmium dans les sols français. A cette fin, plusieurs populations d'analyses ont pu être rassemblées et traitées :

- la population « ASPITET 1998 » ;
- la population « ADEME 1998 » ;

- des populations à effectifs beaucoup plus restreints, dont l'échantillonnage a été volontairement « ciblé » sur des secteurs suspectés d'anomalies naturelles (« terres d'Aubues » ; « Naisey Bouclans » ; « Les Fourgs »). Ces trois populations font partie de la population générale « ASPITET 1998 ».

PRÉSENTATION DES POPULATIONS ET DES MÉTHODES

La population ASPITET 1998

Cette population correspond à celle déjà présentée par Baize (1997a - pages 59 à 66) mais complétée par de nombreux prélèvements supplémentaires, puisque son effectif a plus que doublé, passant de 580 horizons à 1310. Le mode d'échantillonnage est resté le même. Rappelons seulement les points essentiels : 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 706 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 de 40 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. En effet, sur les 706 sites étudiés, 288 sont localisés dans le département de l'Yonne (surtout dans sa moitié sud) et 100 (correspondant à 197 échantillons) proviennent d'un secteur de 53000 ha situé au sud du département de l'Indre (feuille La Châtre).

Les sols issus de roches cristallines ou cristallophylliennes 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 anthropique majeure, ont été éliminées des traitements statistiques.

Les analyses de cadmium ont été réalisées pour 1253 horizons. Pour ces échantillons, sont également disponibles des

données de caractérisation pédologiques (carbone organique, CEC, pH-eau, fer total, calcaire total) et les concentrations totales en autres éléments traces (toujours Cu, Cr, Mn, Ni, Pb, Zn; souvent As, Co, Hg, Se, Tl). Toutes ces analyses ont été réalisées dans un seul et même laboratoire, celui de l'INRA à Arras; entre 1988 et 1998.

La mise en solution a été faite selon la norme AFNOR X 31-147 (extraction par HF et HClO₄ concentrés). Cd a été dosé par spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électro-thermique. Le seuil de détection est à 0,02 mg/kg.

La population ADEME 1998

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 INRA d'Orléans se sont associées pour réaliser la collecte puis le traitement de ces données, au plan national (Deslais et Baize, 1997).

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 pédo-géochimique 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 (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) mais également les analyses de caractérisation courantes du sol (granulométrie, pH, CEC, carbone, calcaire total, etc.), 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 de collecte 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. En toute rigueur, il faudrait traiter ces deux types de données séparément.

L'absence de certains paramètres (tels que granulométrie ou calcaire total) est courante dans les différents résultats d'analyses recueillis. Ce sont pourtant des renseignements précieux. Cette information incomplète résulte des différentes habitudes et pratiques des organismes réalisant des plans d'épandage. Dans la plupart des cas, le repérage géographique en coordonnées Lambert a dû être réalisé à partir de photocopies de fonds topographiques à 1/25 000 ou 1/50 000.

Les informations relatives au type de sol sont en général totalement manquantes ou faiblement informatives. De même, les informations relatives à la géologie restent également très succinctes. Certes, la connaissance des coordonnées géographiques permet de pointer la parcelle sur la carte géologique correspondante mais cela est généralement très insuffisant, surtout dans le cas des cartes anciennes qui ne représentent pas les formations superficielles.

A 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. Nous disposons de 10 650 analyses de cadmium total dont 8 530 sont correctement localisées en coordonnées géographiques.

Différences entre les deux populations

Les deux populations « ASPITET 1998 » et « ADEME 1998 » présentent de grandes dissemblances : elles nous apporteront donc probablement des informations différentes.

La population « ASPITET 1998 » ne présente pas un effectif très grand et sa répartition géographique est irrégulière, mais elle offre l'avantage de rassembler des échantillons ayant tous été analysés par les mêmes méthodes, dans un seul laboratoire. Elle mêle des sols cultivés et des sols forestiers, des horizons de surface humifères et des horizons profonds ou semi-profonds, tous bien caractérisés aux plans pédologiques et géologiques.

La population ADEME 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

- données très nombreuses (10 650 échantillons), assez bien réparties sur 86 départements;
- coordonnées géographiques des prélèvements connues pour 8 530 échantillons; les valeurs pourront donc être positionnées sur des cartes;
- prélèvements réalisés sur une période de six ans, permettant une photographie presque instantanée de l'état des sols;
- prélèvements effectués avant les campagnes d'épandages de boues (du moins en théorie).

Obstacles à l'interprétation des résultats

- analyses provenant de nombreux laboratoires très divers, utilisant des méthodes d'analyses différentes;
- échantillonnage biaisé, privilégiant les sols de plateau et de grande culture, 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;
- pas de renseignement sur le type de sol ni indication sur la nature des matériaux sous-jacents;
- informations complémentaires (données granulométriques - teneurs en carbone - taux de calcaire - CEC, etc.) souvent manquantes;
- aucune connaissance analytique des autres horizons non situés en surface.

Méthodes statistiques - Définitions

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 »). Cette approche 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.

Lors du traitement des très nombreuses données recueillies pour leur Atlas Pédogéochimique d'Angleterre et du Pays de Galles, McGrath et Loveland (1992) ont montré que, pour tous les 19 éléments analysés, la vibrisse inférieure était proche de la valeur minimale et qu'il n'existait aucun « outlier » inférieur.

Utilisée couramment par les spécialistes suisses (Meyer, 1991), la « gamme des valeurs fréquentes » (GVF) est comprise entre le premier et le neuvième décile : elle regroupe donc 80 % des valeurs observées.

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

Découpage territorial en « petites régions naturelles intra-départementales »

Les « petites régions agricoles » (PRA) servent de bases territoriales aux statistiques du SCEES (Ministère de l'Agriculture) et de l'INSEE. Ce découpage de l'espace rural français ne rend pas toujours bien compte des véritables « petites régions naturelles » (PRN) mais il est disponible depuis longtemps (SCEES et INSEE, 1982) et désormais sous une forme informatisée, alors que la cartographie des PRN pour l'ensemble de la France reste à faire.

Nombreuses sont les PRA qui se prolongent sur plusieurs départements (par exemple la Champagne crayeuse qui recoupe Aube, Marne, Ardennes, Aisne, et Yonne). Dans notre cas, le découpage territorial correspond au croisement entre PRA et départements : soit des « petites régions agricoles intra-départementales » (PRA/ID). Ainsi, la Champagne crayeuse de l'Aisne, est distincte de la Champagne crayeuse de la Marne, de même, la Beauce du Loiret est traitée séparément de la Beauce d'Eure-et-Loir et de celle de l'Essonne. Rappelons que des sols originaires d'une même PRA peuvent être très différents, aussi bien quant à leur roche-mère, leur composition granulométrique, leur teneur en carbone, en fer, en calcaire, etc.

DÉTECTION ET LOCALISATION DES ANOMALIES

La population ASPITET 1998

Valeurs statistiques principales

(cf. tableau 1 et figure 1)

La médiane obtenue sur cette population est de 0,20 mg/kg et 80 % des valeurs se situent entre 0,03 et 1,18 mg/kg. N'oublions pas qu'il s'agit d'une population qui mêle des horizons humifères de surface, en général plus riches en cadmium que les horizons profonds du même solum (Baize, 1997a) et des horizons plus ou moins profonds, fort peu humifères.

L'histogramme présenté à la figure 1 montre une répartition des valeurs plutôt bi-modale (même s'il faut tenir compte d'un changement d'intervalle de classes). La vibrisse supérieure vaut 1,09 mg/kg, d'où l'existence de 144 outliers, près de 11 % de l'effectif étudié. L'abondance des « valeurs aberrantes » dans cette population tient au fait que nous avons beaucoup travaillé dans des régions de plateaux calcaires et que, depuis plusieurs années, nous nous sommes focalisés sur des secteurs repérés comme anomalies naturelles.

Corrélations entre le cadmium et les autres variables (Tableau 2)

Dans cette population, le cadmium est assez mal corrélé avec les autres variables. Les coefficients sont hautement

Tableau 1 - Données statistiques élémentaires pour le cadmium. Population ASPITET 1998 (tous types d'horizons - cultures et forêts) et population ADEME 1998 (horizons de surface de sols cultivés).

Table 1 - Unprocessed statistical data for cadmium. ASPITET 1998 population (all types of horizons - cultivated and forest) and ADEME 1998 population (surface horizons of cultivated soils).

	ASPITET 1998	ADEME 1998
nb	1253	10650
minimum	< 0,02	0,01
1 ^{er} décile	0,03	0,12
1 ^{er} quartile	0,08	0,20
médiane	0,20	0,30
3 ^e quartile	0,49	0,44
9 ^e décile	1,18	0,69
vibrisse sup.	1,09	0,80
maximum	11,53	17,10
nb d'outliers	144	738

Tableau 2 - Population ASPITET 1998. Corrélations entre le cadmium et les autres variables. Toutes sont significatives au seuil de 1% sauf avec le calcaire total.

Table 2 - ASPITET 1998 population. Correlations between cadmium and other variables. All are significant at the 1% threshold except for total CaCO₃.

	r	nb
Taux d'argile	0,31	1236
Carbone organique	0,13	1139
CEC	0,33	1168
Profondeur	0,15	1228
Calcaire total	0,02	1235
Fer total	0,32	1182
Cuivre total	0,17	1195
Chrome total	0,11	1197
Nickel total	0,17	1235
Plomb total	0,14	1198
Zinc total	0,19	1188
Manganèse total	0,36	1102

Figure 1 - Population ASPITET 1998. Histogramme du cadmium total.

Figure 1 - ASPITET 1998 population. Total cadmium histogram.

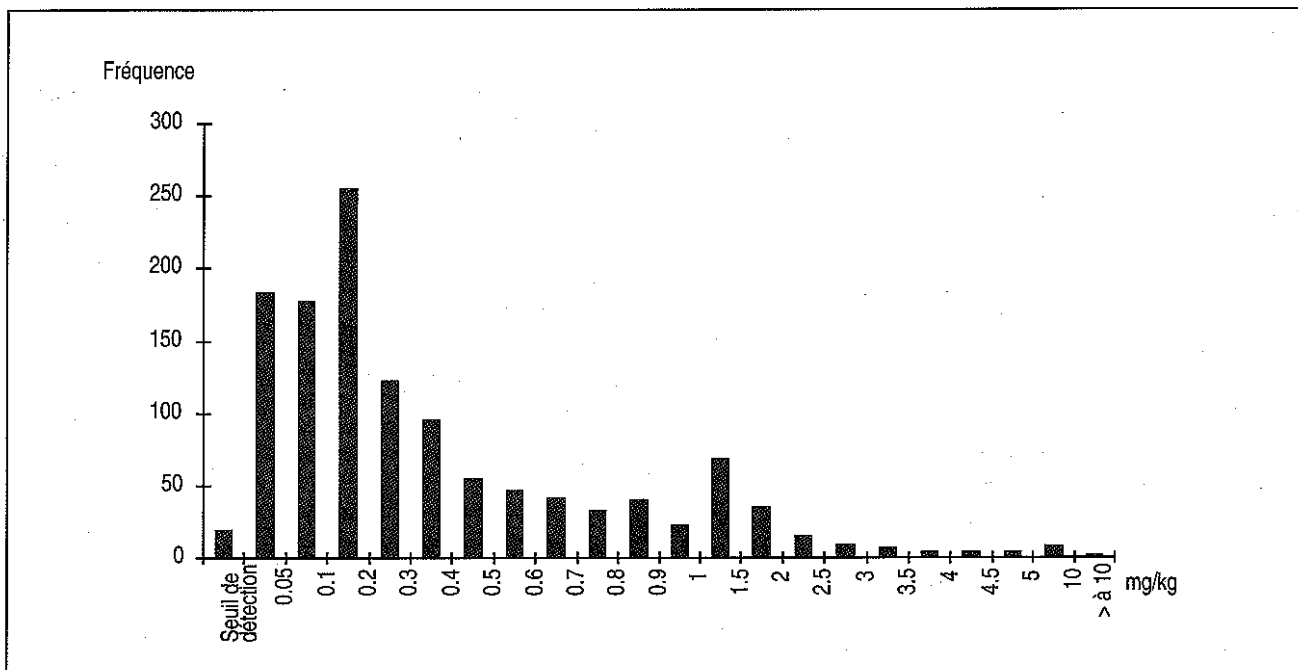


Tableau 3 - Présentation succincte des 144 « valeurs aberrantes » (« outliers »). Dénomination schématique; région naturelle ou secteur géographique (départements); nombre d'outliers et effectif total de chaque "famille" dans la population ASPITET 1998.

Table 3 - Brief presentation of the 144 outliers. Schematic identification; natural region or geographical sector (Départements); number of outliers and total number in each « family » within the ASPITET 1998 population.

Familles pédo-géologiques	Localisation (département)	nombre d'outliers	sur un effectif de
« Terres d'Aubues » sur divers calcaires (cf. tableau 6)	Basse Bourgogne (89)	29	131
Sols sur calcaires oolithiques rauraciens	Naisey-Bouclans (25)	23	38
Sols sur calcaires sinémuriens à gryphées arquées	Auxois (21 - 89)	19	58
Sols d'argiles à chailles (sur calcaires calloviens)	Basse Bourgogne (58 - 89)	19	59
Sols sur calcaires bathoniens et calloviens	Varzy (58)	10	14
Sols calcaires sur calcaires récifaux crayeux de Mailly-le-Château (Oxfordien)	Clamecy (58 - 89)	8	12
Sols sur calcaires rauraciens oolithiques (pour la plupart)	Les Fourgs (25)	7	8
Sols sur calcaires hettangiens	La Châtre (36)	6	8
Sols minces sur calcaires bathoniens	Ruffec (16)	6	6
« Terres rouges du Poitou »	Poitou (86)	4	12
Argile de décarbonatation (horizons profonds au contact de calcaires récifaux)	Sundgau (90)	2	2
Sols sur calcaires sinémuriens	La Châtre (36)	1	12
Sols sur calcaires durs oxfordiens	Champagne Berrichonne (18 - 36)	1	17
Sols sur marno-calcaires kimméridgiens	Aunis (17)	1	13
Sols sur calcaires à gryphées géantes du Domérien supérieur	Avallonnais (89)	1	11

Sols limono-argileux liés au Lias silicifié	Avallonnais (89)	3	30
Divers	Diverses	4	

		144	

significatifs (au seuil de 1 %) mais la variance expliquée demeure faible. Les meilleures corrélations sont avec le manganèse, le fer, la CEC et le taux d'argile.

Qui sont les outliers ?

Il est intéressant d'examiner attentivement qui sont les 144 échantillons « outliers », c'est à dire de considérer leur région d'origine et la « famille pédo-géologique » à laquelle ils appartiennent, incluant la nature de la roche sous-jacente (tableau 3). On notera que ces « valeurs aberrantes » correspondent aussi bien à des sols cultivés qu'à des sols forestiers, à des horizons de surface qu'à des horizons profonds.

On remarquera surtout que toutes les familles du tableau 3 sauf les deux dernières, soit 137 « valeurs aberrantes » sur un total de 144, correspondent à des sols liés d'une manière ou d'une autre à des calcaires de tous les étages du Jurassique (depuis l'Hettangien jusqu'au Portlandien). Il peut s'agir : de sols développés dans de vieux ou très vieux matériaux résiduels, argileux et riches en fer, provenant de la

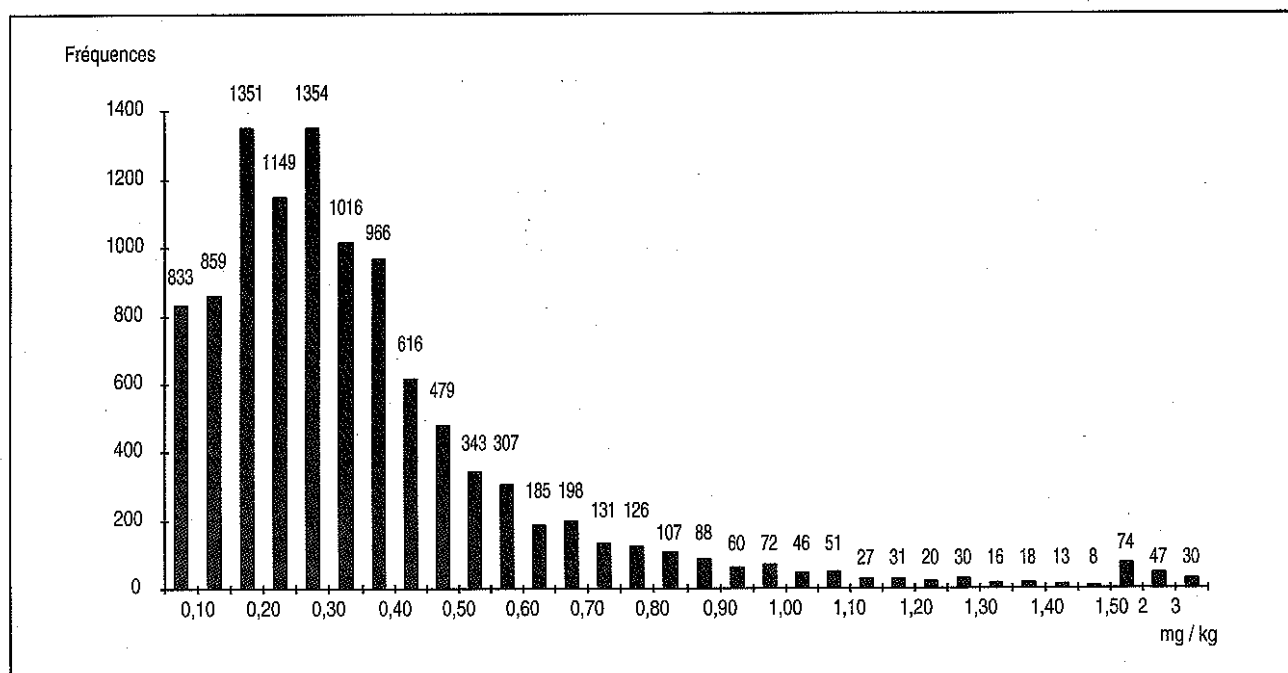
décarbonatation de calcaires jurassiques à une échelle de temps géologique (Terres Rouges du Poitou; sols issus d'argiles à Chailles; « terres d'Aubues »; « terres noires » et « sols marron » de la plate-forme sinémurienne; « argiles de décarbonatation » situées sous la couverture limoneuse du Sundgau, au contact des calcaires sous-jacents); de sols beaucoup plus récents, décarbonatés, comme ceux du Jura (secteurs de Naisey Bouclans ou forêt communale des Fourgs); de sols minces toujours calcaires, voire très calcaires, tels ceux issus des calcaires récifaux de Mailly-le-Château, près de Clamecy (Nièvre), ou ceux sur calcaires bathoniens localisés à Ruffec (Charente).

Dans aucun de ces 144 cas, nous n'avons de raisons de suspecter une influence humaine qui expliquerait des concentrations en cadmium supérieures à 1,09 mg/kg.

Les quelques cas de pollution avérée

Ils ont été, pour la plupart, signalés dans l'ouvrage « Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les

Figure 2 - Population ADEME 1998. Histogramme du cadmium total.
Figure 2 - ADEME 1998 population. Total cadmium histogram.



sols » (Baize, 1997a). Les valeurs obtenues figurent au tableau en annexe A, elles sont présentées pour permettre des comparaisons avec les anomalies naturelles.

En ce qui concerne l'échantillon prélevé à Évin-Malmaison, dans un secteur notoirement pollué par au moins deux grosses sources industrielles (Godin *et al.*, 1985), des travaux récents ont montré que les teneurs en cadmium variaient largement en fonction de la distance aux sources et de l'occupation du sol. Les deux valeurs les plus élevées culminent à 20,95 et 35,4 mg/kg dans les horizons de surface organo-minéraux de deux friches (Sterckeman *et al.*, 1997).

Conclusions pour la population ASPITET 1998

Dans cette population la plupart des « valeurs aberrantes » sont liées à l'existence de divers calcaires jurassiques. Mais deux cas sont certainement à distinguer. L'influence directe de la composition des roches sous-jacentes constitue un véritable « héritage géochimique » conservé dans les sols jeunes encore calcaires ou bien fortement concentré dans les sols les plus anciens, riches en oxydes de fer et de manganèse. L'autre origine explique bon nombre de valeurs aberrantes très fortes. C'est la minéralisation de roches sédimentaires par l'action de remontées d'eaux hydrothermales, sur des durées extrêmement longues, au contact des massifs anciens. C'est le cas des « terres noires » et « sols marron » de la plate-forme sinémurienne en Terre-Plaine et Auxois, au contact du Morvan (Baize et Chrétien, 1994; Baize, 1997a).

La population ADEME 1998

Valeurs statistiques principales (tableau 1)

Rappelons que cette population rassemble 10650 analyses de cadmium total originaires de 86 départements (horizons de surface de sols agricoles).

Les quartiles sont de 0,20 et 0,44 mg/kg, la médiane de 0,30 mg/kg. La « gamme de valeurs fréquentes » (rassemblant 80 % des valeurs) est comprise entre 0,12 et 0,69 mg/kg. L'histogramme de la *figure 2* montre que les valeurs modales se situent entre 0,15 et 0,30 mg/kg mais que nombre de valeurs sont supérieures à 0,60. La vibrisse supérieure vaut 0,80 mg/kg, ce qui fait apparaître 738 « valeurs aberrantes » (soit 7 % de l'effectif total étudié).

Cette population est certainement bien représentative de l'état des sols cultivés français au cours des années 1990, ou du moins de ceux pouvant raisonnablement recevoir des épandages de boues d'épuration. Son échantillonnage n'a pas été plus ou moins biaisé par la recherche volontaire d'anomalies naturelles.

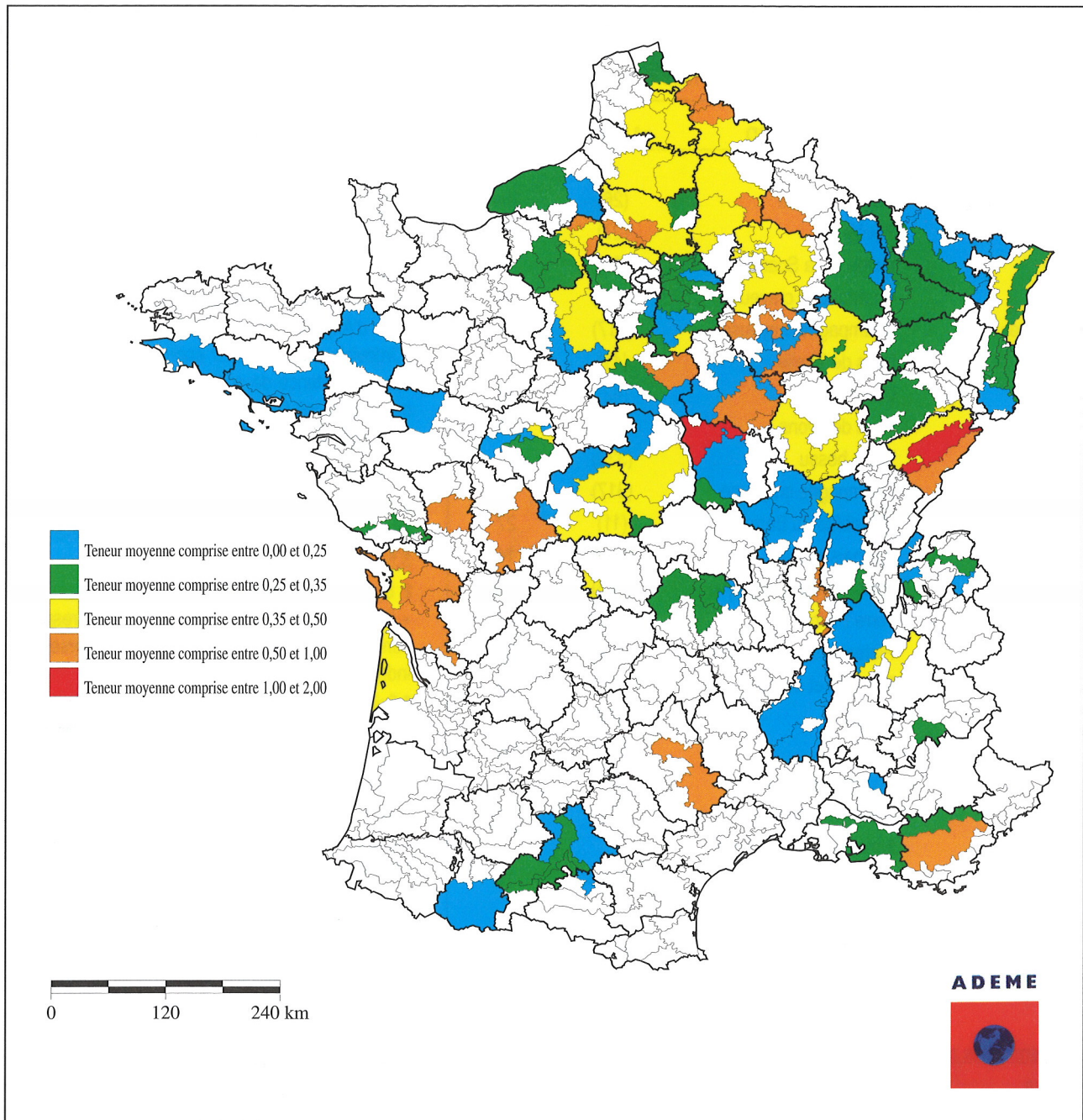
Où sont situés les outliers ?

La carte de la *figure 3* présente leur localisation par « petites régions agricoles intra-départementales » (PRA/ID); elle est complétée par le *tableau 4*.

Ces 24 PRA/ID peuvent être regroupées en quatre grandes catégories :

Figure 4 - Carte des valeurs moyennes calculées par « petites régions agricoles intra-départementales » (PRA/ID). Population ADEME 1998.

Figure 4 - Map of the mean values calculated per « intra-Département agricultural regions » ADEME 1998 population.



- des secteurs d'affleurements de calcaires jurassiques ou crétacés (l'Aunis, les Saintonges agricole et viticole, la Champagne Berrichonne, la Bourgogne Nivernaise, les Plateaux moyens et supérieurs du Jura, les Plateaux de Bourgogne, le Vignoble du Barrois);

- la Champagne crayeuse de quatre départements;

- des zones situées à proximité de grandes agglomérations ou de secteurs industriels (la Région de Lille, la Pévèle, la Plaine de la Scarpe);

- des plateaux limoneux tels le Vexin normand, le Pays de Lyons, le Plateau Picard, le Saint-Quentinnois Laonnais.

Seuls échappent à ce classement :

- l'Auxois de l'Yonne, zone de contact entre plaine sédimentaire et zone de socle, connue pour ses minéralisations importantes (Baize et Chrétien, 1994); le Boischaut du Sud, également zone de contact entre le Bassin parisien et la Marche, aux roches et aux sols variés;

- la Beauce d'Eure-et-Loir;

- la zone fruitière et viticole du Lyonnais.

Qui sont les outliers ? - Teneurs naturelles ou pollutions ?

Il serait lassant et peu fructueux de s'intéresser individuellement aux 738 « valeurs aberrantes ». Pour simplifier on s'intéressera seulement à quelques unes des 77 valeurs supérieures à 2 mg/kg (seuil de la norme AFNOR). Chaque cas mériterait une discussion pour savoir si l'origine de chaque valeur élevée ou très élevée résulte de phénomènes naturels ou d'une action anthropique. Mais nous disposons rarement des informations nécessaires à une telle discussion, par exemple sur l'existence d'établissements industriels (anciens ou toujours en activité) susceptibles d'avoir pollué. Afin de respecter une certaine confidentialité, nous resterons peu précis quant à la localisation de plusieurs anomalies.

Anomalies naturelles

Certains échantillons font partie de la population ASPITET 1998 et ont déjà fait l'objet de commentaires ci-dessus en tant qu'« outliers » à l'échelle nationale. Ce sont les 14 échantillons prélevés dans les environs de Clamecy, d'Avallon et de La Châtre.

■ 5 « outliers » proviennent de « terres rouges du Poitou » prélevées sur la commune de l'Heuil et déjà évoquées au tableau 3. Ce ne sont pas les mêmes échantillons et le laboratoire d'analyse est différent, mais ils proviennent du même secteur.

■ L'échantillon de Thostes (Côte d'Or) est localisé dans un secteur liasique connu pour ses silicifications associées à un minerai de fer et à diverses minéralisations, au contact du Morvan.

■ 24 « outliers » supérieurs à 2,0 mg/kg proviennent du département du Doubs, et particulièrement de la zone située à l'est de Besançon : secteur de Naisey, Glamondans, Tarcenay, Mamirolle, Trépot, Valdahon, Vercel... Il s'agit certainement de

Tableau 4 - « Petites régions agricoles intra-départementales » présentant plus de 6 « valeurs aberrantes ».

Table 4 - « Intra-Département agricultural regions » having more than 6 outliers.

Nombre d'outliers	Petites régions agricoles intra-départementales
51 ou plus	Plateaux moyens du Jura (Doubs)
De 26 à 50	Plateaux de Bourgogne (Yonne) Saintonge viticole (Charente Maritime)
De 16 à 25	Auxois de l'Yonne (Terre Plaine) Région de Lille (Nord) Pévèle (Nord) Vexin normand (Eure)
De 11 à 15	Bourgogne Nivernaise (Nièvre) Plaine de la Scarpe (Nord)
De 6 à 10	Pays de Lyons (Eure) Saint-Quentinnois Laonnais (Aisne) Plateau picard (Somme) Beauce (Eure-et-Loir) Zone fruitière et viticole du Lyonnais (Rhône) Boischaut du Sud (Indre) Champagne crayeuse (Aisne) Champagne crayeuse (Ardennes) Champagne crayeuse (Marne) Champagne crayeuse (Aube) Vignoble du Barrois (Aube) Champagne Berrichonne (Cher) Aunis (Charente Maritime) Saintonge agricole (Charente Maritime) Plateaux supérieurs du Jura (Doubs)

la manifestation de l'anomalie générale observée dans les sols des plateaux du Jura français et suisse.

■ Une commune au nord de Royan (Charente Maritime). Une valeur atteint 2,13 mg/kg. 9 autres valeurs voisines vont de 0,35 à 1,67, soit une moyenne de 1,32 pour les dix échantillons alors que les teneurs en les autres éléments traces sont très faibles. C'est une zone de sols calcaires issus de calcaires crayeux blancs à débris de spongiaires et bryozoaires du Campanien moyen et supérieur (terres de Champagne).

■ Une commune à l'est de Parthenay (Deux Sèvres). Selon la carte géologique, la formation géologique est constituée de diatexites et de métatexites à muscovite et sillimanite dans un contexte général faillé de leucogranites à un ou deux micas. Divers gîtes minéraux sont signalés à quelques kilomètres (autunite, oxydes de fer, cassitérite). S'agit-il, à nouveau, de minéralisations localisées ou d'une richesse particulière de la roche ?

Figure 3 - Carte du nombre d'outliers par « petites régions agricoles intra-départementales ». Population ADEME 1998.
Figure 3 - Map of number of outliers per « intra-Département agricultural regions ». ADEME 1998 population.

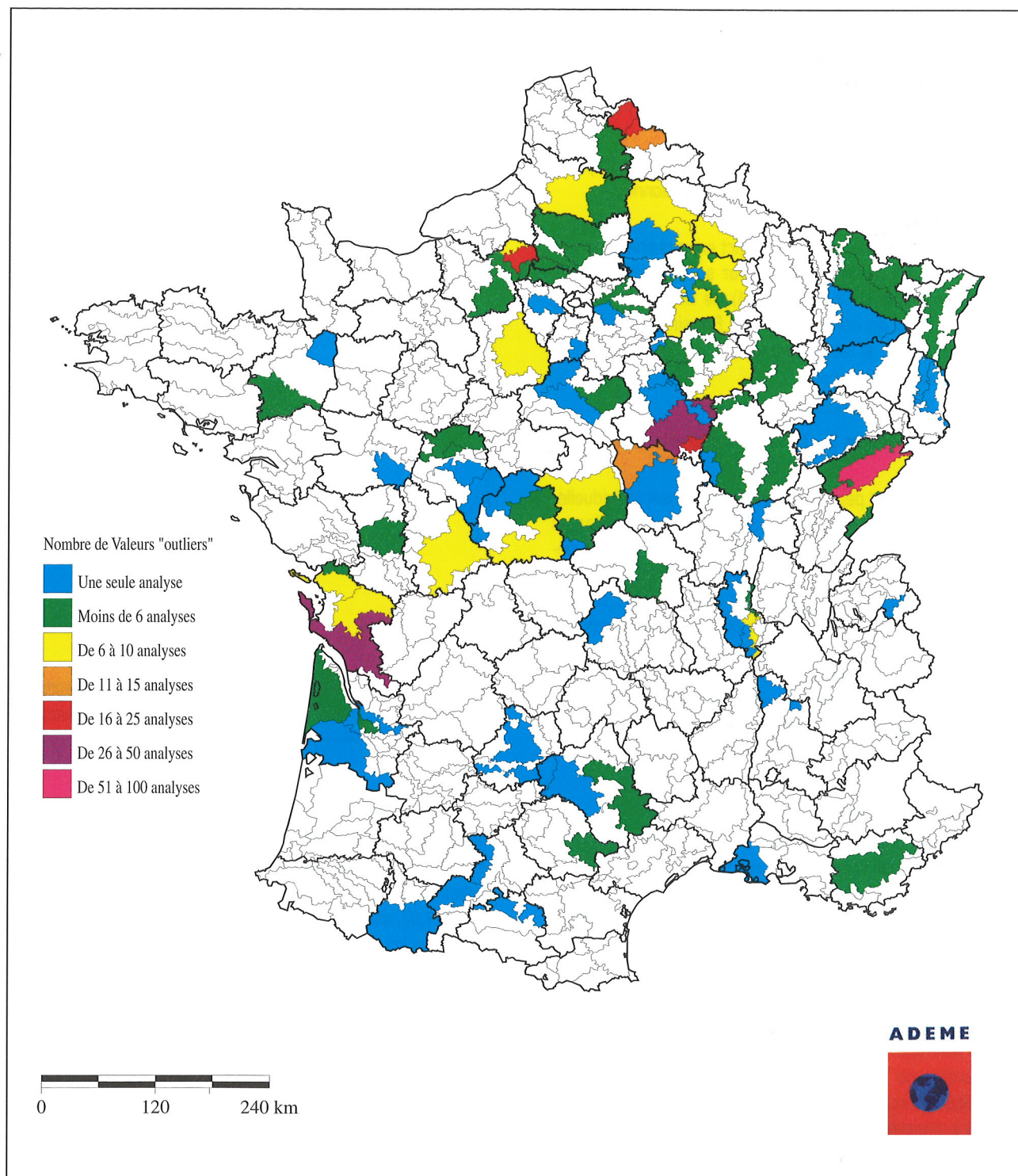


Tableau 5 - Les 24 « petites régions agricoles intra-départementales » pour lesquelles la moyenne des analyses est comprise entre 0,50 et 1,00 mg/kg (en orange sur la carte) et les 2 pour lesquelles cette moyenne est supérieure à 1,00 mg/kg (en rouge).

Table 5 - The 24 « intra-Département agricultural regions » in which the mean for the analyses lies between 0.50 and 1.00 mg/kg (in orange on the map) and the 2 in which this mean is above 1.00 mg/kg (in red).

Département	Nom de la PRA/ID	n° INSEE	Nb valeurs
0,50 < moyenne < 1,00 mg/kg			
Nord	Région de Lille	(26)	164
	Pévèle	(27)	99
	Vallée de la Scarpe	(28)	154
Aisne	Champagne crayeuse	(317)	14
Ardennes	Champagne crayeuse	(317)	11
Oise	Pays de Thelle	(41)	19
	Clermontois	(42)	16
Eure	Pays de Lyons	(50)	32
	Vexin bossu	(330)	29
Aube	Champagne crayeuse	(317)	21
	Vignobles du Barrois	(11)	27
Loiret	Gâtinais pauvre	(338)	14
Yonne	Plateaux de Bourgogne	(186)	129
	Terre Plaine	(442)	84
Doubs	Plateaux supérieurs du Jura	(452)	21
Vienne	Brandes et Brenne	(438)	48
Deux Sèvres	Gâtine	(368)	20
	Aunis	(374)	48
Charente Maritime	Saintonge agricole	(375)	43
	Saintonge viticole	(377)	109
	zone fruitière et viticole du Lyonnais	(200)	16
Rhône	zone de grande culture entre Saône et Beaujolais	(197)	11
	Aveyron	Grands Causses	(411)
Var	Coteaux de Provence	(468)	25
Moyenne des analyses > 1,00 mg/kg			
Nièvre	Bourgogne Nivernaise	(185)	27
		<i>moyenne = 1,11</i>	
Doubs	Plateaux moyens du Jura	(450)	126
		<i>moyenne = 1,26</i>	

■ Une commune au nord-ouest de Limonest (Rhône). Alluvions récentes de la vallée de l'Azergues. Interprétation possible : à moins de 10 km en amont existent les gîtes minéraux stratiformes de Chessy et de Sain Bel situés sur la vallée de l'Azergues ou de son affluent la Brévenne. Selon la carte géologique feuille Tarare, ce sont des « amas sulfurés exhalatifs sédimentaires » exploités pendant plusieurs siècles, particulièrement pour le cuivre et le zinc. Rappelons que Cd est une impureté des minerais sulfurés, surtout de la blende.

■ Sud du département d'Ille-et-Vilaine. Une parcelle dont la concentration en cadmium atteint 5,00 mg/kg est située sur un affleurement des « schistes ardoisiers d'Angers » ou « schistes à Calymènes » de l'Ordovicien. Cette valeur anormale pourrait être liée à l'existence de cristallisations de pyrite et de minéralisations Pb Zn As plus localisées (cf. notice de la carte géologique).

Pollutions industrielles ou autres

■ Saône-et-Loire. Une parcelle, située au coeur d'une zone industrielle, montre une teneur de 5,51 mg/kg.

■ Eure-et-Loir. Luvisols développés dans des « limons des plateaux ». Teneurs en Cd respectivement de 3,65 et 8,90 mg/kg. Un déversement industriel illicite est possible.

■ Près de Sébazac (Aveyron). Sols argileux lourds développés dans des marnes et calcaires marneux du Carixien. Après retour aux informations fournies par la Chambre d'Agriculture, on constate que 4 parcelles voisines ont été analysées. Deux d'entre elles ont déjà reçu des boues (à raison de 15 t/ha) : les taux de cadmium y sont de 2,20 et 0,91 mg/kg tandis que celles qui n'ont jamais reçu de boues présentent des teneurs de 0,43 et 0,69. Dans de tels cas et sans connaissance précise du niveau du fond pédo-géochimique local, il est difficile de faire la part du naturel et des épandages antérieurs.

■ Dieuze (Moselle) - Trois parcelles envisagées pour des épandages montrent une pollution manifeste en cadmium et deux d'entre elles également une nette pollution en Cu, Hg, Pb et Zn.

	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn
Dieuze 1	3,10	26,6	1,18	37,0	67,5
Dieuze 2	6,70	170,3	3,30	238	531
Dieuze 3	17,10	663,0	3,40	369	1440

Ces valeurs très élevées sont probablement à mettre en relation avec l'activité déjà ancienne d'une usine de produits chimiques, située à moins de 2 km.

Cartographie des valeurs moyennes calculées par « petites régions agricoles intra-départementales »

Nous avons calculé la moyenne des valeurs obtenues pour chaque PRA/ID où nous disposons d'au moins 10 analyses. Ainsi a été construite la carte de la figure 4 et le tableau 5 lesquels suscitent les commentaires suivants. 24 PRA/ID figurent en orange car la moyenne des teneurs en cadmium y sont comprises entre 0,50 et 1,00. Deux PRA/ID figurent en rouge car la moyenne des valeurs mesurées y est supérieure à 1,00 mg/kg (respectivement 1,11 pour la Bourgogne Nivernaise et 1,26 pour les plateaux moyens du Jura).

On retrouve donc approximativement les mêmes PRA/ID que lors de l'étude de la localisation des outliers : de nombreuses zones d'affleurement de calcaires jurassiques, dont certaines déjà évoquées dans le cas de la population ASPITET 1998. Ce qui est plus nouveau ou se confirme : les craies de Champagne et les calcaires crayeux crétacés de Saintonge.

Nous allons approfondir successivement quelques cas pour voir si ces valeurs moyennes calculées par PRA/ID sont significatives et apportent une information nouvelle.

Le cas de la Champagne crayeuse de l'Aisne

20 valeurs s'échelonnant de 0,30 à 0,97 moyenne = 0,63, médiane = 0,60

La moyenne est bien représentative de cette population. Les moyennes de la

Tableau 6 - Saintonge viticole de Charente Maritime. Valeurs outliers et roches sous-jacentes

Table 6 - Saintonge viticole in Charente Maritime. Outlier values and underlying rocks

Nombre d'outliers	Effectif	Age et faciès des roches sous-jacentes
Campanien 29/38		
5	6	Campanien supérieur - calcaires crayeux blancs
18	25	Campanien moyen - calcaires à silex
6	7	Campanien inférieur - calcaires argileux tendres
Santonien 7/29		
3	7	calcaires argileux
4	8	calcarénites tendres et calcaires crayeux à silex
0	12	calcaires blanc-gris à glauconie
0	2	calcaires crayeux argileux
1	28	Coniacien - calcaires sableux
1	6	Turonien sup. - calcaires sublithographiques

Champagne crayeuse de l'Ardennes et de celle de l'Aube excèdent 0,50 mais pas celle de la Marne (valeur = 0,49). On peut penser que ces teneurs relativement élevées en cadmium correspondent à des sols crayeux et qu'une influence des craies (matériaux sédimentaires entièrement d'origine biologique) est à rechercher.

Le cas de la région des Brandes de la Vienne

48 valeurs s'échelonnant de 0,04 à 3,52

moyenne = 0,59, médiane = 0,21

Ces échantillons proviennent d'une zone située au sud de la ville de Poitiers étudiée pour l'épandage des boues du district. Neuf valeurs, comprises entre 1,24 et 3,52 mg/kg (moyenne 2,29), proviennent toutes de la commune d'Iteuil et sont responsables de cette moyenne générale supérieure à 0,50. Elles correspondent à des « terres rouges du Poitou », paléosols ferrallitiques très chargés en fer et en de nombreux éléments traces métalliques. Si l'on considère seulement les 39 autres résultats, provenant de 15 autres communes, la moyenne s'abaisse à 0,20 mg/kg. Nous sommes ici en présence d'une valeur moyenne n'ayant pas de signification pour l'ensemble de la PRA.

Le cas de la Gâtine des Deux Sèvres

20 valeurs s'échelonnant de 0,37 à 3,35

moyenne = 0,85, médiane = 0,66

La moyenne est assez bien représentative de cette population (une valeur de 3,35 pèse cependant assez lourd dans le calcul de la moyenne).

Ces échantillons proviennent d'un secteur assez petit, étudié pour préparer l'épandage des boues de la ville de Parthenay. C'est une zone de granites avec quelques indices de gîtes minéraux. Ce pourrait être une anomalie naturelle en cadmium, la seule que nous ayons pu déceler qui soit liée à des roches cristallines.

Le cas de la Saintonge viticole de Charente Maritime

109 valeurs disponibles dont 38 valeurs outliers à l'échelon national (> 0,80 mg/kg). La moyenne vaut 0,59; la médiane est égale à 0,38.

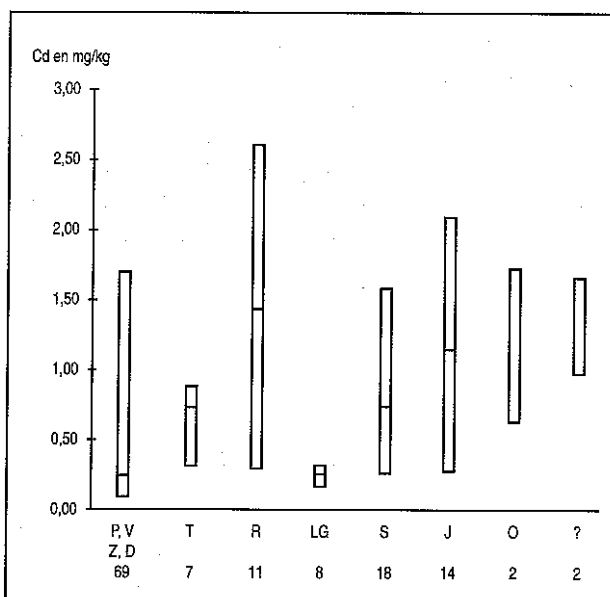
Tableau 7 - Classification des 131 échantillons de « terres d'Aubues » en fonction du faciès des calcaires sous-jacents; « nombre des valeurs aberrantes » au plan national et effectif total de chaque catégorie.

Table 7 - Classification of the 131 samples from the "terres d'Aubues" according to the facies of the underlying limestones; number of outliers on a national scale and total number in each category.

Nom de la formation et étage	nb « outliers »	Effectif	Symbole
Calcaires sublithographiques, souvent à joints marneux			
calcaires du Barrois (Portlandien)			P
calcaires de Vermenton (Oxfordien)	6	69	V
calcaires de Bazarnes (Oxfordien)			Z
calcaires en plaquettes (Bathonien)			D
Calcaires récifaux			
calcaires crayeux de Tonnerre (Kimméridgien)	0	7	T
calcaires de Mailly-le-Château crayeux ou cristallins très dur (Oxfordien)	9	11	R
calcaires de Lézinnes et Gland (Oxfordien)	0	8	LG
calcaires à spongiaires (Oxfordien)	5	18	S
Calcaires bioclastiques			
calcaires à entroques (Bajocien)	7	14	J
Calcaires à oolithes ferrugineuses (Oxfordien)			
	1	2	O
Faciès inconnu			
	1	2	?
totaux :	29	131	

Figure 5 - Teneurs en cadmium des « terres d'Aubues » classées en 8 catégories de faciès. Minimums / médianes / maximums.

Figure 5 - Cadmium contents of the « terres d'Aubues », classified into 8 facies categories - minima/medians/maxima.



familles présentent des médianes élevées, très supérieures à celle calculée pour les calcaires durs à grain fin. Ce sont :

- le calcaire récifal crayeux de Mailly-le-Château médiane = 1,42
- le calcaire bioclastique à entroques médiane = 1,13
- le calcaire récifal crayeux de Tonnerre médiane = 0,72
- les calcaires à spongiaires médiane = 0,72
- divers calcaires durs à grain fin médiane = 0,24
- les calcaires de Lézinnes et Gland médiane = 0,24

Les « terres d'Aubues » développées au-dessus du calcaire récifal crayeux de Mailly-le-Château sont 9 fois sur 11 des « outliers » par rapport à la population ASPITET générale. Il semble donc bien que les sols issus de la décarbonatation de calcaires bioclastiques et récifaux sont très souvent nettement anormaux en cadmium. Les sédimentations néritiques, à activité biologique intense, seraient anormaux en cadmium. Mais il ne suffit pas d'être un calcaire récifal pour porter aujourd'hui des sols riches en Cd (cas des calcaires de Lézinnes et Gland).

Secteur de Naisey et Bouclans (Doubs)

Ce secteur est situé sur le premier plateau du Jura, à l'est de Besançon, à des altitudes comprises entre 450 et 480 m. Lors de l'interprétation des analyses de sols pour le plan

d'épandage des boues de Pontarlier, il a attiré notre attention comme présentant de fortes anomalies en cadmium. Un petit secteur relativement plat a alors été sélectionné pour une étude plus approfondie. Ce secteur est caractérisé par de larges affleurements de calcaires récifaux du Rauracien (le plus souvent franchement oolithique) et montre un paysage varié associant des cultures, des prairies et des forêts. Les sols varient rapidement, notamment en épaisseur (de 20 cm à plus de 1,20 m), mais ne sont pas calcaires et montrent une tendance générale à l'acidité.

38 échantillons de sols ont été prélevés correspondant à 25 sites distincts. Les analyses ont été effectuées au laboratoire INRA d'Arras (tableau 8). Des mesures complémentaires de concentrations en cadmium et fer totaux ont été réalisées sur 25 échantillons de roches calcaires sous-jacentes (cf. quatrième partie).

Forêt communale des Fourgs

Ce secteur forestier a été sélectionné a priori comme correspondant à un assez grand affleurement, en position de plateau et sous un pendage sub-horizontale, des calcaires coralligènes du Rauracien. Un tel dispositif est fort rare dans le haut Jura. Les altitudes sont comprises entre 1 100 et 1 220 m.

Dans une première phase de reconnaissance, 8 échantillons de sols ont été prélevés en huit sites distincts, dont 5 correspondant à une toposéquence. Les sols présentent des épaisseurs variant de 15 cm à 85 cm, tous non calcaires, acides ou neutres. Les roches calcaires observées sur le terrain ont montré différents faciès dont des faciès oolithiques assez grossiers et des calcaires à oncoïdes (« bancs à momies »).

Sur 8 teneurs mesurées dans cette forêt, 7 sont « outliers » à l'échelon national (tableau 9). Les valeurs les plus élevées ont été observées dans des horizons argileux jaunes en contact direct avec la roche rauracienne sous-jacente. L'hypothèse de travail est donc partiellement confirmée, mais une étude beaucoup plus approfondie est évidemment nécessaire. Une telle étude est actuellement menée en forêt communale des Fourgs par l'unité de Pédologie de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

TENEURS EN CADMIUM DE ROCHES CALCAIRES

En 1995, Tuchschnid a publié les résultats d'une analyse de 340 roches représentatives de la géologie suisse. Parmi elles, 37 roches calcaires du Mésozoïque (calcaires et « calcaires à silice ») provenant du Jura ou des Alpes. Pour ces 37 échantillons, 80 % des teneurs en cadmium sont comprises entre < 0,03 et 0,20 mg/kg; 50 % des valeurs sont comprises entre < 0,03 et 0,10 et la médiane s'établit à moins de

Tableau 8 - Résultats analytiques obtenus dans le secteur de Naisey et Bouclans (échantillons de sols pris en surface et en profondeur, sous cultures, prairies et forêts).

Table 8 - Analytical results obtained for the Naisey-Bouclans area (soil samples obtained at the surface and at depth, below arable, meadowland and forest).

	minimum	médiane	maximum
Sols (nb = 38)			
argile %	21,6	35,6	80,2
carbone %	0,27	2,19	6,27
pHeau	4,0	6,0	7,7
CEC	13,2	24,3	35,5
Fe total %	2,84	4,00	7,52
Cd total mg/kg	0,32	1,43	6,03

Tableau 9 - Résultats analytiques obtenus sur 8 échantillons de sols (différentes profondeurs et différents types de sols) dans la forêt communale des Fourgs (sous forêt de résineux).

Table 9 - Analytical results obtained from 8 soil samples (different depths and different types of soils) in the forest of Les Fourgs (conifer forest).

	minimum	médiane	maximum
argile %	22,4	47,5	63,6
carbone %	0,74	1,95	7,62
pHeau	4,8	6,8	7,9
CEC	8,5	23,6	49,4
Cd total mg/kg	0,82	3,74	9,25

0,03 mg/kg. Dans ce même document, quatre articles antérieurs cités donnent une moyenne de 0,04 - 0,03 - 0,16 et 0,09 mg/kg pour des calcaires et dolomies.

De leur côté, Kabata-Pendias et Pendias (1992) donnent une valeur moyenne de 0,035 mg/kg pour les « calcaires » et Alloway (1995) une moyenne de 0,065 pour les « carbonates ».

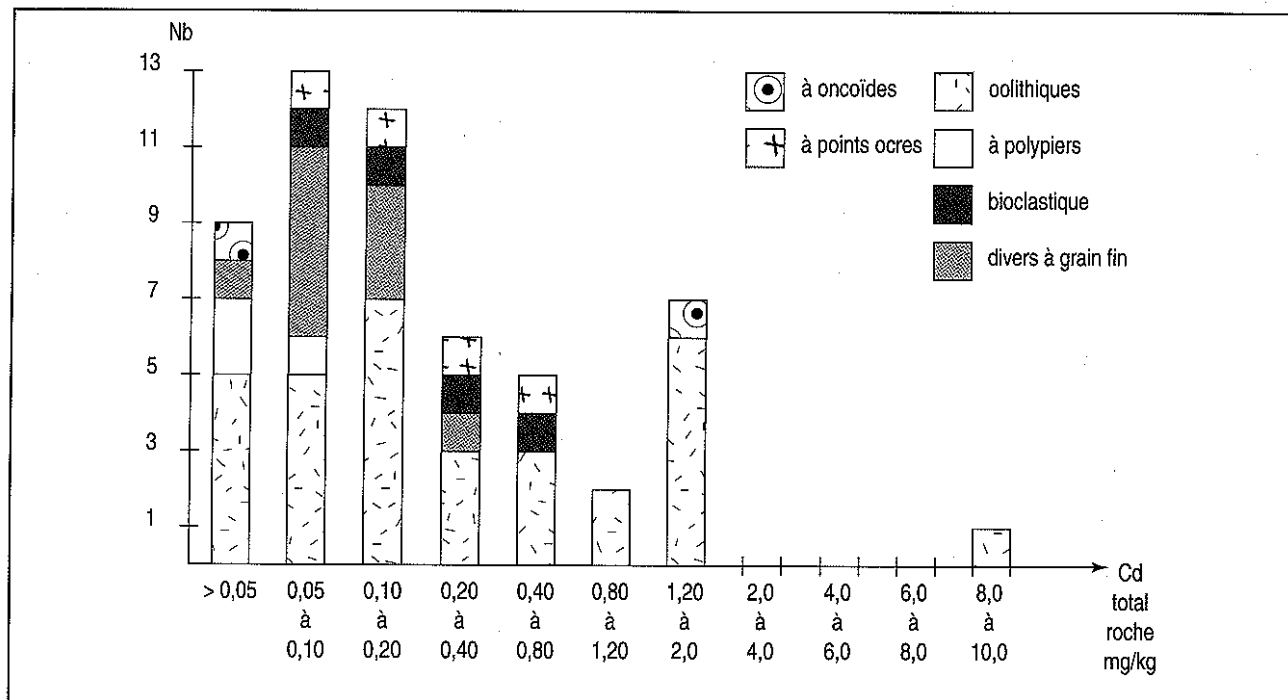
Pour notre part, nous disposons de 37 analyses faites sur des échantillons de calcaires (roches), dont 31 proviennent du Jura (Naisey Bouclans et les Fourgs). Mais nous pouvons nous référer également à des travaux helvétiques récents (Okopnik, 1997) ou en cours (Benitez, 1999) relatifs à des roches du Haut-Jura suisse (figure 6 et tableau en annexe B)

Sur ces 55 échantillons, la gamme des valeurs mesurées est très large, allant de < 0,02 jusqu'à 8,15 mg de Cd/kg de roche.

Certes, la détermination du faciès n'est probablement pas très fiable et le regroupement en ces 6 catégories est assez

Figure 6 - Teneurs en cadmium de 55 calcaires jurassiques (France et Jura suisse).

Figure 6 - Cadmium contents of 55 Jurassic limestones (France and Swiss Jura).



schématique. On constate que les calcaires « oolithiques » sont présents dans toute la gamme des valeurs mesurées mais que ce sont les seuls à contenir plus de 0,8 mg de cadmium par kilo de roche (avec un calcaire à oncoïdes, d'origine probablement algale).

Si l'on fait des calculs simplifiés sur les mêmes bases que Dubois *et al.* (1998) et avec l'hypothèse que le cadmium, libéré par la décarbonatation progressive des roches, reste adsorbé in situ sur les minéraux argileux et oxydes de fer résiduels, on obtient des teneurs en cadmium maximales dans les sols de l'ordre de 15-20 mg/kg pour une roche contenant 1,70 mg de Cd/kg et de l'ordre de 1 mg/kg pour une roche contenant 0,1 mg de Cd/kg. On voit donc que des roches relativement riches en cadmium (teneur > 1 mg/kg) peuvent constituer une importante source de cadmium géogène pour les sols résiduels issus de leur décarbonatation.

CONCLUSION GÉNÉRALE - PERSPECTIVES

De nombreuses anomalies naturelles en cadmium ont été décelées par cette première étude, très souvent associées aux calcaires jurassiques. Il en existe certainement beaucoup d'autres, notamment liées à des minéralisations sur les pourtours est et sud-est du Massif Central. Si de telles anomalies sont décelées à l'occasion de plans d'épandage de boues

d'épuration, se posera le problème de savoir quels risques existent pour demander (et obtenir) d'éventuelles dérogations auprès des services préfectoraux. Dans tous les cas, une petite investigation sera nécessaire pour trancher s'il s'agit ou non d'une anomalie naturelle, car il ne faudrait pas laisser croire au public que de telles valeurs résultent de « pollutions » d'origine humaine.

Toutes les teneurs totales observées aujourd'hui résultent d'un équilibre entre des gains et des pertes. Les valeurs naturelles fortement anormales résultent d'abord d'un héritage géogène local (à l'échelle déca- ou hectométrique) : certaines roches, nous venons de le voir, sont naturellement assez riches en cadmium, lequel peut en outre se concentrer dans les formations résiduelles de décarbonatation. Mais ensuite, à l'échelle décimétrique et métrique, ce cadmium hérité est susceptible de transferts importants au sein des couvertures pédologiques, transferts qui seuls peuvent expliquer l'extrême variabilité spatiale observée aujourd'hui, y compris selon l'axe vertical. Pour chaque horizon, on doit envisager : des pertes par lessivage vertical ou latéral, surtout en milieu acide et proportionnelles aux flux d'eau traversant les sols ou y circulant; des apports latéraux, toujours possibles s'il y a un amont; et le recyclage biogéochimique « sur place » (absorption par les racines en profondeur, transferts vers les organes aériens, puis retombées à la surface du sol).

Les concentrations en cadmium mesurées aujourd'hui sont grandement fonction du pH (ancien et actuel) et de la capacité de fixation de ce métal par l'horizon considéré, donc dépendent de la nature et de l'abondance des matières organiques, des minéraux argileux et des oxy-hydroxydes de fer et de manganèse.

Ces processus d'adsorption dans les différents horizons ou au contraire de transferts verticaux ou latéraux au sein des couvertures pédologiques méritent des études plus détaillées. De telles études sur des toposéquences sont en cours dans la forêt communale des Fourgs.

REMERCIEMENTS

A l'ADEME et à Madame Isabelle Feix pour le financement du travail de W. Deslais (contrats n° 96-75037, 97-75034 et 97-75039) et pour l'autorisation de publier certains résultats ; à Valérie Amans (Ch. Départ. Agric. Doubs), Océane Rousset (PROVAL), Christian Barneoud (Ch. Région. Agric. Doubs), Joël Moulin (Ch. Agric. Indre), J.P. Dubois et N. Benitez-Vasquez (EPF Lausanne) pour les prélèvements d'échantillons ou la communication de leurs données et informations.

BIBLIOGRAPHIE

- Alloway B.J., 1995 - Cadmium. In : Heavy metals in soils. 2nd edition. Blackie Academic and Professional. pp. 122-147.
- Atteia O., Dubois J. P. et Webster R., 1994 - Geostatistical analysis of soil contamination in the Swiss Jura. *Environmental Pollution* 86, pp 315-327.
- Atteia O., Thélin Ph., Pfeifer H.R., Dubois J.P. et Hunziker J.C., 1995 - A search for the origin of cadmium in the soil in the Swiss Jura. *Geoderma* 68, pp. 149-172.
- Baize D., 1991 - Sols et formations superficielles sur calcaires durs dans le sud-est du Bassin Parisien. Première synthèse. *Science du Sol*, 29, pp. 265-287.
- Baize D., 1996 - Teneurs totales en cadmium dans les sols français. Fonds géochimiques locaux et contaminations. 5e Journ. Étude des Sols, Rennes. pp. 155-157.
- Baize D., 1997a - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.
- Baize D., 1997b - Interpréter les teneurs totales en micro-polluants minéraux : fonds géochimiques locaux et contaminations modérées. 3e rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. COMIFER-GEMAS. Blois. pp. 181-192.
- Baize D., 1997c - Détection de contaminations modérées en éléments traces dans les sols agricoles. *Analysis Magazine* Vol. 25, 9 10, pp. 29-35.
- Baize D. et Chrétien J., 1994 - Les couvertures pédologiques de la plate-forme sinémurienne en Bourgogne. Particularités morphologiques et pédogéochimiques. *Étude et Gestion des Sols* 1, 2, pp. 7-27.
- Baize D. et Paquereau H., 1997 - Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. *Étude et Gestion des Sols* 2, pp. 77-93.
- Benitez-Vasquez N., 1999 - Speciation and bioavailability of Cd in Soils from the Swiss Jura : hypothesis about its dynamic. Thèse. E.P.F. Lausanne. à paraître.
- Deslais W. et Baize D., 1997 - Étude des éléments traces dans les sols agricoles français. Un programme ADEME/INRA. Journées techniques ADEME : Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage des boues d'épuration urbaines. pp. 241-243.
- Dubois J.P., Okopnik F., Benitez N. and Védry J.C., 1998 - Origin and spatial variability of cadmium in some soils of the Swiss Jura. *Proceedings of the 16 th World Congress Soil Science*. Montpellier.
- Godin P., Feinberg M.H. et Ducauze C.J., 1985 - Modelling of soil contamination by airborne lead and cadmium around several emission sources. *Environmental Pollution (series B)*, 10, 97-114.
- Kabata-Pendias A. and Pendias H. (1992) - Trace elements in soils and plants. 2nd edition. CRC Press, 365 p.
- Mench M., Baize D. et Mocquot B., 1997 - Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne district, Burgundy, France. *Environmental Pollution* Vol. 95, n° 1, pp. 93-103.
- Meyer K., 1991 - La pollution des sols en Suisse. Rapport du PRN « Sol ». Liebefeld-Berne, 241 p.
- McGrath S.P. et Loveland P.J., 1992 - The Soil Geochemical Atlas of England and Wales. Blackie Academic and Professional. Glasgow. 101 p. + 40 cartes en couleurs + 2 transparents.
- Okopnik F., 1997 - Relation entre la variabilité spatiale du cadmium et la couverture pédologique de la région du Mont d'Amin. Travail de fin de 3e cycle. EPFL Lausanne. 45 p. + annexes.
- SCEES, INSEE, 1982 - Carte des régions agricoles. Ministère de l'Agriculture, INSEE.
- STATGRAPHICS, 1991 - Version 5.0. STSC, Inc. Rockville, USA.
- Sterckeman T., Douay F., Proix N. et Fourrier H., 1997 - Étude d'un secteur pollué par des métaux. Nature et répartition verticale des polluants minéraux des sols. *Prog. Rech. Concertées Nord-Pas-de-Calais*.
- Tuchschild M.P., 1995 - Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall und Fluorgehalten bodenbildender Gesteine der Schweiz. BUWAL, Bern. 130 p. + annex.
- Tukey J.W., 1977 - Exploratory data analysis. Addison Wesley, Reading, Massachusetts.

Annexe A : Les quelques cas de pollution avérée. Population ASPITET Exemples de contaminations en cadmium dans des sols agricoles.

Appendix A : The few instances of proven pollution. ASPITET population.

	Cd mg/kg	pH eau	Profondeur en cm	Fond Pédo-géochimique naturel Cd
Bézu-le-Guéry	2,57	8,0	0-30	0,12
	4,96	7,9	80-90	0,08
Couhins	0,25	5,1	0-20	0,15
	0,40 **	5,2	20-40	0,10
	0,48 **	5,6	40-60	0,10
Beauvoir	0,90	8,4	0-33	0,03
	0,57	8,7	33-41	0,03
Corneilles	0,58 **	5,8	0-15	0,30 *
	1,75	6,6	33- 43	0,15
	0,30 **	7,7	120-145	0,10
Bazeville 2	4,19	7,9	0-30	0,40 *
Bazeville 3	2,29	7,8	0-30	0,40 *
Bazeville 4	2,13	8,0	0-30	0,40 *
Vélannes B	2,16	7,7	0-20	0,30 *
Vélannes A	1,55	7,6	0-30	0,30 *
Vélannes C	1,78	7,5	0-30	0,30 *
Bazeville 1	0,98	7,5	0-30	0,40 *
	0,42 **	8,0	40-60	0,10
Mortagne-du-Nord	106,80	6,3	0-3	?
	13,00	6,0	9-18	?
	8,19	5,6	23-37	?
	2,38	5,8	43-55	?
Évin-Malmaison	8,20		0-34	?

* valeurs « normales » pour des horizons labourés de ce type de sol dans cette région

** valeurs faibles en valeur absolue mais constituant cependant une anomalie d'origine humaine. Légère contamination détectée grâce à la détermination du fond pédo-géochimique naturel local.

Bézu-le-Guéry (Aisne) - Parcelle expérimentale traitée à fortes doses (118 t/ha) par des boues urbaines très chargées en métaux - Luvisol Dégradé.

Couhins (Gironde) - Vignoble de « Graves » - Sol uniformément sableux, contaminé également par le cuivre (> 100 ppm)

Beauvoir (Manche) - Polder près du Mont Saint Michel - Cultures légumières. Sol sableux calcaire. Site O.Q.S.

Corneilles en Vexin (Val d'Oise) - Agriculture intensive - Apport de boues ? Luvisol Typique de loess.

Vélannes (Vexin) - Quatre épandages de boues. Luvisol Typique de loess.

Bazeville (Beauce) - Contaminations industrielles - Sol argilo limoneux profond.

Mortagne-du-Nord (Nord) - Pelouse métallicole située à 100 m d'un ancien crassier d'une ancienne zinguerie. Sol alluvial sableux.

Évin-Malmaison (Pas de Calais). Secteur pollué par deux fonderies de métaux non ferreux. Site O.Q.S.

Annexe B : Teneurs en cadmium et taux d'insoluble de 55 calcaires jurassiques.

Appendix B : 55 rock analyses (Limestones).

	Résidu insol. %	Cd total mg/kg	Faciès et âge de la roche		Résidu insol. %	Cd total mg/kg	Faciès et âge de la roche
Le Gurnigel (Suisse)				Secteur de Naisey-Bouclans (Premier plateau du Jura - France)			
GUP 01	0,84	1,38	oolithique - Bajocien	BOUCL2	1,11	0,166	oolithique - Rauracien
GUP 01	0,82	1,62	oolithique - Bajocien	BOUCL5	0,86	0,202	oolithique - Rauracien
GUP 02	1,48	1,60	oolithique - Bajocien	1	4,83	0,108	oolithique - Rauracien
GUP 02	0,17	1,70	oolithique - Bajocien	2	1,68	0,047	oolithique - Rauracien
GUP 03	1,98	1,15	oolithique - Bajocien	3	4,98	0,124	oolithique - Rauracien
GUP 12	0,75	0,75	oolithique - Bajocien	4	4,20	0,044	oolithique - Rauracien
GUP 13	1,11	0,56	oolithique - Bajocien	6	3,50	0,254	oolithique - Rauracien
GUP 04	1,80	0,33	bioclastique - Bajocien	9	5,23	0,489	oolithique - Rauracien
GUP 14	1,74	0,14	bioclastique - Bajocien	11	5,83	1,720	oolithique - Rauracien
GUP 15	1,85	0,09	bioclastique - Bajocien	12	7,65	0,028	oolithique - Rauracien
Secteur des Fourgs (Haut Jura - France)				13	5,78	0,052	oolithique - Rauracien
JOUGN1	11,09	0,151	sublithographique - Kimméridgien	17	6,38	< 0,020	oolithique - Rauracien
LF3	0,01	0,080	oolithique - Rauracien	18	6,05	0,047	oolithique - Rauracien
LF6	0,07	0,105	oolithique - Rauracien	19	7,75	0,062	oolithique - Rauracien
LF11	2,11	1,026	banc à oncoïdes Rauracien	20	6,35	0,128	oolithique - Rauracien
LF12	1,31	0,047	banc à oncoïdes - Rauracien	22	4,43	0,057	oolithique grossier - Rauracien
LF13	1,66	0,164	quelques oolithes dans une pâte fine	23	1,53	0,140	oolithique - Rauracien
			- Rauracien	25	6,13	0,216	oolithique - Rauracien
LF14	5,65	0,082	graveleux et oolithique - Rauracien	14	9,07	0,089	à polytiers - Rauracien
Thèse de N. Benitez (Haut Jura - Suisse)				21	4,45	< 0,020	à polytiers - Rauracien
MA 1	1,40	0,04	dur - Kimméridgien	24	0,16	< 0,020	à polytiers - Rauracien
MA 2	2,50	0,09	dur - Kimméridgien	5	3,75	0,068	à grain fin - Séquanien
MA 3	2,60	0,06	dur - Kimméridgien	7	4,53	0,075	à grain fin - Séquanien
SU 11	1,10	0,22	dur - Kimméridgien	8	6,64	0,082	à grain fin - Séquanien
SU 12	1,80	0,10	dur - Kimméridgien	Secteur de Ruffec (Charente)			
DORN	0,60	8,15	dur oolithique	RUF7c	1,66	0,080	à points ocres - Bathonien sup.
44P1	1,30	1,31	oolithique - Bajocien supérieur	RUF22c	0,41	0,205	à points ocres - Bathonien sup.
44 P0	1,30	1,03	oolithique - Bajocien supérieur	RUF25d	0,19	0,103	à points ocres - Bathonien sup.
				RUF27d	0,74	0,532	à points ocres - Bathonien sup.
Basse Bourgogne				Basse Bourgogne			
				Varzy	2,91	0,415	bioclastique - Bathonien sup.
				Lichères	3,48	0,149	sublithographique - Oxfordien