



DOCUMENT PUBLIC

Fonds géochimique naturel
État des connaissances à l'échelle nationale

Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 99-F-269

juin 2000
BRGM/RP-50158-FR





DOCUMENT PUBLIC

Fonds géochimique naturel
État des connaissances à l'échelle nationale

Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 99-F-269

D. Darmendrail
avec la collaboration de
D. Baize, J. Barbier, P. Freyssinet, C. Mouvet, I. Salpéteur, P. Wavrer

juin 2000
BRGM/RP-50158-FR



Mots clés : Fonds géochimique, Éléments-traces, Sols, Sédiments, État des connaissances, Programmes en cours.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Darmendrail D., Baize D., Barbier J., Freyssinet P., Mouvet C., Salpéteur I., Wavrer P. (2000) - Fonds géochimique naturel : État des connaissances à l'échelle nationale - BRGM/RP-50158-FR. 93 p., 24 fig., 14 tabl.

© BRGM, 2000, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la politique nationale en matière de gestion et réhabilitation de sites et sols pollués, le Ministère chargé de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire a entrepris l'élaboration de guides méthodologiques et techniques présentant les différents outils nécessaires à une approche cohérente et homogène dans le domaine de l'évaluation des sites et sols pollués. L'objet de ce rapport consiste à présenter l'état des connaissances et les données disponibles sur le fonds géochimique naturel des sols en France.

On peut identifier quatre domaines principaux nécessitant l'utilisation du fonds géochimique naturel :

- la définition de valeurs guides dans les environnements industriels ;
- l'identification du contexte géochimique pouvant influencer la qualité des eaux souterraines ;
- la définition de valeurs guides réglementaires pour les sols agricoles (horizon de surface), notamment dans le cadre des plans d'épandages des boues de stations d'épuration et autres déchets ;
- la définition du niveau de contamination des sols agricoles et forestiers par toutes les activités humaines (agricoles, industrielles, minières, domestiques), anciennes ou récentes.

Ces quatre domaines nécessitent la détermination de valeurs guides du fonds géochimique naturel, puis, pour les domaines 3 et 4 du fonds pédo-géochimique naturel. Mais ils font appel à des définitions différentes de la notion de sol et de fonds géochimique naturel, ce qui peut générer des incompréhensions voire une mauvaise utilisation des données disponibles. Il convient donc de définir un cadre précis à l'échelle nationale pour l'utilisation et la mise à disposition de ce type de données.

Ce rapport décrit le contenu de plusieurs types de bases de données à l'échelle nationale et régionale :

- les données de l'inventaire minier national (sols et sédiments) réalisé par le BRGM ;
- les données du programme INRA-ASPITET (approche pédologique et typologique) ;
- la collecte de données nationale (base ANADEME) sur les sols avant épandage de boues de stations d'épuration (programme ADEME-INRA) ;
- le test méthodologique de La Châtre (Indre) comparant une approche basée sur une typologie pédo-géologique et une approche systématique de géochimie sols et sédiments (programme GESSOL, BRGM et INRA) ;
- la constitution de bases de données de références des sols agricoles en région Lorraine (projet INPL, autour des sites industriels) et Nord - Pas-de-Calais (programme INRA).

Une importante masse de données géochimiques sur les sols est d'ores et déjà disponible et cela sur de grandes surfaces à l'échelle du territoire. Ces bases de données couvrent probablement la moitié du territoire national et peuvent fournir d'ores et déjà une information utile et significative sur la notion de fonds géochimique pour nombre de contextes géologiques et pédologiques. Il faut toutefois préciser que certaines zones du territoire sont très peu, voire non couvertes par ces données.

La base de données de l'inventaire minier national

L'inventaire minier national est la plus grande base de données géochimiques disponible (280 000 analyses). Les investigations géochimiques ont été focalisées sur les zones connues pour receler des minéralisations, à savoir les massifs hercyniens (Massifs central et armoricain, Vosges) et leurs marges sédimentaires, en particulier Morvan, Cévennes et Marche, soit 101 540 km². Quelques secteurs des Pyrénées et des Alpes ont également été couverts. En revanche, les grands bassins sédimentaires d'Aquitaine, du couloir rhodanien et du Bassin parisien, ne sont pas informés. Cette base de données présente l'avantage d'être le résultat d'une approche systématique et standardisée sur le plan de l'échantillonnage. Elle couvre de vastes surfaces avec une forte densité d'échantillons (0,5 à 3 par km²). Cette base fournit une information relativement fiable des caractéristiques du sol entre 30 et 50 cm de profondeur mais exclut l'horizon humifère de surface. Les études statistiques ont montré que les signaux géochimiques des sédiments de ruisseaux et des sols étaient relativement comparables sur une échelle locale. L'ensemble des données de cette base serait donc valorisable pour définir certaines valeurs guides. La base de l'inventaire minier présente toutefois certains désavantages :

- elle ne couvre pas les principales zones industrialisées du territoire ;
- la base a été conçue pour une finalité minière et certains des principaux éléments traces sensibles en environnement comme Se, Tl, Hg, ... n'y figurent pas ;
- les sols ne représentent que 20 % environ des prélèvements ;
- les analyses ont été réalisées à une période où les limites de détections étaient relativement élevées et avoisinaient 10-20 ppm, ce qui est trop élevé pour une utilisation dans les domaines 3 et 4.

Le programme ADEME / INRA – base ANADEME

Ce programme, financé par l'ADEME et supervisé par l'unité Science du Sol de l'INRA Orléans visait à établir un « état » des sols français en zones rurales, dans les années 90 à partir des analyses totales en éléments traces réalisées avant épandage de boues de stations d'épuration. Dans ce cadre, de nombreuses analyses des « métaux lourds » dans les sols ont été effectuées sur tout le territoire national. L'ADEME et l'INRA se sont associés pour engager un travail de collecte et de traitement des données disponibles au plan national. Cette base de données est en cours de réalisation. La base contient 11 397 analyses sur 8 522 sites correctement géoréférencés et répartis irrégulièrement sur 86 départements. Elle regroupe environ 153 000 valeurs analytiques. Les paramètres collectés sont Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn, mais également les analyses de caractérisation courantes du sol (granulométrie, pH, CEC, carbone, calcaire total, etc.).

La base de données du programme INRA-ADEME (ANADEME) présente l'avantage d'être conçue à une échelle nationale. Elle est conçue pour une finalité de gestion des sols agricoles dans le cadre des procédures d'amendement des sols. Les teneurs mesurées correspondent aux 30 premiers centimètres du sol, donc à des horizons qui ont été le réceptacle de toutes les contaminations agricoles diffuses, retombées atmosphériques et, éventuellement, de pollutions locales. Il est donc impossible, avec cette base, de remonter valablement au fonds pédo-géochimique naturel. Tout au plus, peut-on constater des tendances naturelles régionales. La base contient de nombreuses analyses, mais présente l'inconvénient de rassembler des données hétérogènes sur le plan de l'échantillonnage et des méthodes d'analyse. La gamme d'éléments traces analysés est restreinte, mais correspond aux principaux métaux à surveiller en matière environnementale à l'exception de certains éléments comme As, Sb, Sn,...

Le programme INRA – ASPITET

Ce programme « Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Éléments Traces », développé dans le cadre d'une Action Incitative Programmée de l'INRA baptisée « ECOPOL », vise à montrer l'intérêt d'une approche pédologique pour l'acquisition de données et l'interprétation des teneurs en éléments traces dans les sols. Les objectifs du programme ASPITET sont de :

- fournir des références sur les teneurs totales en éléments traces métalliques mesurées dans divers sols français ;
- proposer et expliquer des démarches d'interprétation applicables partout.

La démarche consiste à utiliser les concepts et les acquis de la pédologie, en jugeant qu'il n'est pas raisonnable de traiter des éléments traces métalliques dans les sols en ignorant ou en négligeant les connaissances acquises par cette science. La base contient actuellement 1310 horizons de sols. Les analyses portent sur Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn et souvent As, Co, Hg, Se, Tl. Les prélèvements ne concernent que des sols de zones rurales. Aucun échantillon n'a été prélevé dans des secteurs urbains ou industriels. Les échantillons proviennent d'une quarantaine de départements français 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.

La base ASPITET a permis de mettre au point des stratégies d'interprétation et d'extrapolation spatiale (dite approche typologique). La méthode présente l'avantage de réduire fortement le nombre d'analyses, mais nécessite en préalable une cartographie pédologique détaillée et une bonne connaissance de la lithologie sous-jacente. La base de données est constituée d'analyses récentes avec une bonne limite de détection, mais se focalisant sur un nombre réduit de métaux. Cette méthode d'extrapolation peut être efficace pour des éléments-traces dont le fonds géochimique est déterminé par la lithologie (ex : Cr, Ni, Co, Ba, Zr, Ti, Li, B, Ba, Terres Rares...). En revanche, elle est relativement approximative pour les éléments traces (ex : As, Se, Cu, Pb, Zn, Mo, W, Cd, Tl, ...) plutôt influencés par d'autres phénomènes géologiques comme l'hydrothermalisme, le métamorphisme, les discontinuités structurales, etc. Cette méthode peut être envisagée dans les régions où la lithologie est relativement monotone et constituée de roches à faibles variations du fonds géochimique (ex : craie, grès,...).

Les études spécifiques à l'échelle locale ou régionale

Il existe plusieurs études locales ou régionales ayant conduit à acquérir des données géochimiques à une échelle locale ou régionale. Certaines sont décrites dans ce rapport comme par exemple :

- le test méthodologique de La Châtre (Indre) où l'approche typo-pédologique de l'INRA et celle du BRGM basée sur les techniques de géochimie d'exploration minière ont été comparées (programme MATE/GESSOL) ;
- la région Lorraine où, dans le cadre des programmes de requalification des friches industrielles, des analyses de certaines formations géologiques largement répandues dans la région ont été réalisées par le BRGM ;
- une étude de l'INRA des sols dans l'Avallonnais (département de l'Yonne) ;
- le projet de référentiel pédo - géochimique pour la région Nord - Pas-de-Calais par l'INRA et l'Institut Supérieur d'Agronomie de Lille.

Recommandations

Il convient de définir un cadre précis à l'échelle nationale pour l'utilisation et la mise à disposition de valeurs guides du fonds géochimique naturel. Cela nécessite de gérer l'information existante non pas seulement sur la base d'un critère de proximité géographique entre le besoin et les données disponibles, mais aussi en fonction d'une approche comparative en tenant compte de la lithologie et de la pédologie.

Dans le cadre d'une application de type 3 (valeurs guides pour sols agricoles / plans d'épandages de boues) ou 4 (niveau de contamination des sols agricoles et forestiers), il s'agira de déterminer des fonds pédo-géochimiques naturels des différents types de sols qui peuvent coexister sur des territoires de petite extension. Ils seront nécessaires pour déterminer l'impact à moyen ou long terme de certaines pratiques telles que les amendements ou les traitements.

Pour gérer les valeurs guides du fonds géochimique naturel à l'échelle du territoire pour les domaines d'application 1 (valeurs guides des sols en environnement industriel) et 2 (contexte géochimique influençant la qualité des eaux), on peut imaginer la constitution d'un site internet (de type BSS ou BASIAS) contenant l'information des bases de données de l'inventaire minier, avec un lien vers la base ANADEME, ces deux bases étant relativement complémentaires sur le plan de la couverture géographique. Il conviendrait de définir une procédure de définition des valeurs guides locales du fonds géochimique à partir des données disponibles dans ces bases en y associant d'autres informations comme la lithologie et la pédologie.

Dans les zones où l'on ne dispose actuellement d'aucune donnée de référence, que ce soit en sols ou en sédiments de ruisseaux, on recommande une approche guidée par les besoins locaux et non la mise en place d'une couverture systématique visant à définir un fonds géochimique naturel à l'échelle du territoire. Dans le cadre de procédures de type

« évaluation simplifiée des risques » sur un site (potentiellement) pollué, et dans des secteurs à forte concentration de ces types de sites, on recommande la mise en place d'une couverture géochimique systématique en fonction des besoins locaux sur la base de coupures IGN à 1/50 000. On peut proposer un échantillonnage des sols suivant une densité de l'ordre de 1 éch./10 km² à préciser en fonction de la diversité géologique et pédologique régionale. Les protocoles d'échantillonnages devront être regroupés dans un guide méthodologique diffusé à l'échelle nationale et associé aux guides méthodologiques développés dans le cadre de la politique nationale en matière de gestion des sites pollués.

Dans les secteurs à faible densité de sites potentiellement pollués, une définition régionale du fonds géochimique ne s'impose pas. On recommande alors de définir le fonds géochimique naturel du site concerné, comme mentionné dans le cadre de la procédure ESR. Les données acquises ponctuellement devraient alors faire l'objet d'une collecte et d'une mise à disposition par un organisme de référence, sur le même principe que pour la Banque de Données du Sous-sol (B.S.S.).

Les actions suivantes sont préconisées dans le cadre de l'approche nationale « sites et sols pollués » :

- constitution d'une structure nationale d'hébergement des bases de données relatives au fonds géochimique naturel, sur un principe analogue à la BSS ou à BASIAS ;
- mise à disposition sur internet d'un SIG contenant des données de l'inventaire minier national après homogénéisation et corrections statistiques des données géochimiques existantes ;
- établissement de liens avec la base ANADEME en accord avec l'INRA et l'ADEME ;
- publication d'un guide méthodologique sur les techniques d'échantillonnage et les méthodes analytiques adaptées à la définition du fonds géochimique naturel adaptées aux problématiques de sites pollués et de protection des ressources en eau ;
- mise en place d'un protocole pour la cartographie du fonds géochimique naturel dans les zones à fortes concentrations de sites potentiellement pollués et identification des secteurs nécessitant cette approche ;
- mise en place d'un protocole de collecte systématique des données de fonds géochimique naturel recueillies dans le cadre d'études ponctuelles de sites dans les zones à faible densité de sites potentiellement pollués.

Sommaire

Introduction	15
1. Inventaire minier national	17
1.1. Secteurs couverts par l'inventaire minier national.....	17
1.2. Techniques de prélèvement adoptées et mise en œuvre	17
1.2.1. Le choix des milieux d'échantillonnage	17
1.2.2. Protocoles d'échantillonnage	20
1.3. Les analyses	22
1.3.1. La spectrométrie d'étincelle	22
1.3.2. La spectrométrie à plasma	24
1.4. Accès aux données de l'inventaire minier national	26
1.5. Qualité des mesures	26
1.5.1. Influence de la nature des échantillons	26
1.5.2. Influence de l'attaque chimique des échantillons	27
1.5.3. Autres sources d'erreurs	28
1.5.4. Conséquences sur l'emploi des données	28
1.6. Recommandations pour l'utilisation des données	30
1.6.1. Sélection des données	30
1.6.2. Utilisation des données	30
1.7. Conclusions	32
2. Le programme INRA-ASPITET	35
2.1. Objectifs initiaux du programme.....	35
2.2. Les méthodes mises en œuvre (prélèvements, analyses)	36
2.2.1. La population étudiée	36
2.2.2. Méthodes et techniques employées.....	38

2.3. Résultats obtenus	39
2.3.1. Utilisations effectives	39
2.3.2. Utilisations potentielles	40
2.3.3. Disponibilités des données	40
3. Le programme ADEME / INRA	41
3.1. Objectifs initiaux du programme	41
3.2. Les méthodes mises en œuvre (prélèvements, analyses)	41
3.2.1. Points positifs	44
3.2.2. Obstacles à l'interprétation des résultats	44
3.3. Résultats obtenus	45
3.3.1. Utilisations effectives	45
3.3.2. Utilisations potentielles	45
3.3.3. Disponibilités des données	45
4. Les études spécifiques à l'échelle locale ou régionale	49
4.1. Le test méthodologique de La Châtre (Indre)	49
4.1.1. Les objectifs initiaux du programme	49
4.1.2. Les méthodes mises en œuvre	50
4.1.3. Les principaux résultats obtenus	53
4.2. Référentiel géochimique des sols autour des friches industrielles de la région Lorraine	54
4.2.1. Problématique et objectifs de l'étude	54
4.2.2. Les sites choisis	63
4.2.3. Les moyens mis en œuvre	65
4.2.4. Résultats obtenus	65
4.2.5. Conclusions et devenir du programme	73
4.3. Etude des sols en Avallonnais (Yonne)	73
4.3.1. Démarche entreprise	73
4.3.2. Travaux réalisés	74
4.3.3. Principaux résultats	75
4.3.4. Conclusions - Perspectives ultérieures	75

4.4. Référentiel pédo-géochimique en région Nord - Pas-de-Calais	80
5. Conclusion - recommandations	83
Bibliographie.....	91

Liste des figures

Fig. 1 - Localisation des informations acquises lors de l'inventaire minier national ..	18
Fig. 2 - Localisation des échantillons de l'inventaire par technique d'analyse	25
Fig. 3 - Comparaison entre la lithologie et la distribution des teneurs en Cr du sol dans le massif des Vosges.....	29
Fig. 4 - Comparaison entre la lithologie et la distribution des teneurs en Ba du sol dans le massif des Vosges.....	31
Fig. 5 - Carte de synthèse des teneurs en As dans les sols et sédiments de ruisseaux du Limousin.	33
Fig. 6 - Localisation des prélèvements du programme INRA-ASPITET.....	37
Fig. 7 - Histogramme du Cd pour 1340 échantillons de sols du programme INRA-ASPITET.....	38
Fig. 8 - Localisation des échantillons collectés au cours du programme ADEME-INRA	43
Fig. 9 - Carte des valeurs moyennes en Cd par petites régions agricoles (programme INRA-ADEME)	46
Fig. 10 - Histogramme du Cd (11000 échantillons, programme INRA/ADEME).....	47
Fig. 11 - Estimation des taux de Pb en surface des sols agricoles de Seine-et-Marne ..	48
Fig. 12 - Exemple de séquence de limons échantillonné en séquence continue sur la vallée de l'IGNERAIE (La Châtre).....	51

Fig. 13 - Comparaison de la répartition de Pb à partir de la cartographie des formations pédo-géochimiques (a) et de l'échantillonnage de sédiments par bassin versant (b).....	56
Fig. 14 - Comparaison des bassins anomaux en plomb prélevés à des époques et des densités différentes (La Châtre).....	57
Fig. 15 - Comparaison des bassins anomaux en arsenic prélevés à des époques et des densités différentes (La Châtre).....	58
Fig. 16 - Répartition des teneurs moyennes en Pb dans les roches, sols sédiments par étage stratigraphique (La Châtre)	59
Fig. 17 - Gamme de teneurs en Cu, Pb, Zn et moyenne géométrique pour les différents milieux échantillonnés (test La Châtre).....	60
Fig. 18 - Gamme de teneurs en Cr, Ni, As, Cd et moyenne géométrique pour les différents milieux échantillonnés (test La Châtre).....	61
Fig. 19 - Comparaison des variogrammes normés pour Fe, Cr, Pb, des trois milieux échantillonnés (test La Châtre).....	62
Fig. 20 - Histogrammes de As, Cd, Cr, Co (a) secteur des vallées ferrifères, (b) secteur de la plaine de la Moselle, (c) secteur du bassin houiller	70
Fig. 21 - Histogrammes de Pb, V, Zn et phénol (a) secteur des vallées ferrifères, (b) secteur de la plaine de la Moselle, (c) secteur du bassin houiller	71
Fig. 22 - Histogrammes de Cu, Hg, Ni et CN (a) secteur des vallées ferrifères, (b) secteur de la plaine de la Moselle, (c) secteur du bassin houiller	72
Fig. 23 - Teneurs en cuivre des sols de l'Avallonnais classés par familles pédo-géologiques	76-77
Fig. 24 - Teneurs observées dans les « sols marron » de la plate-forme sinémurienne (Avallonnais).....	79

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Répartition des techniques d'analyses employées.....	22
Tabl. 2 - Eléments analysés et seuils de détection analytique en spectrométrie à plasma DCP et ICP et au quantomètre	23
Tabl. 3 - Teneurs totales en éléments traces métalliques, fer et manganèse dans les sols français (programme INRA-ASPITET, 815 éch.)	40
Tabl. 4 - Résultats statistiques des éléments Cr, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn pour la population de sols collectés dans le programme ADEME/INRA	42
Tabl. 5 - Procédures employées dans le cadre du projet sur le secteur de La Châtre....	52
Tabl. 6 - Moyennes géométriques des éléments Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, As, Cd pour les différents milieux échantillonnés (test de la Châtre)	55
Tabl. 7 - Bilan des différentes approches du fonds géochimique dans la région de La Châtre	55
Tabl. 8 - État comparatif des références « qualité des sols » en Hollande, au Québec et en Allemagne	64
Tabl. 9 - Résultats statistiques pour chaque groupe de sites	67
Tabl. 10 - Comparaison des niveaux guides allemands et des teneurs maximales des secteurs lorrains	68
Tabl. 11 - Teneurs maximales par couches géologiques	69
Tabl. 12 - Caractéristiques des loess du Nord - Pas-de-Calais	82
Tabl. 13 - Synthèse des bases de données nationales ou régionales	87
Tabl. 14 - Éléments analysés sur les principales bases de données	88

Introduction

Dans le cadre de la politique nationale en matière de gestion et réhabilitation de sites et sols pollués, le Ministère chargé de l'Environnement a entrepris l'élaboration de guides méthodologiques et techniques présentant les différents outils nécessaires à une approche cohérente et homogène. Parmi ceux-ci, l'évaluation simplifiée des risques (Guide ESR, MATE, 2000) fait, à de nombreuses reprises, appel à la connaissance du « fonds géochimique naturel » ou du « bruit de fond » pour apprécier la qualité des sols présents au droit des sites étudiés.

Ces notions servent de références dans le cadre de la politique nationale de gestion et réhabilitation de sites et sols pollués, mais aussi à d'autres documents à caractère réglementaire, notamment ceux relatifs à l'épandage de boues de stations d'épuration urbaine (STEP). La connaissance du fonds géochimique naturel permet d'estimer l'ampleur des apports anthropogènes et constitue une base de référence pour demander aux responsables de ces apports de procéder aux études ou travaux de réhabilitation (si besoin est).

Il existe un besoin en matière d'état des connaissances et des données disponibles sur le fonds géochimique naturel des sols en France. C'est l'objet de ce rapport qui présente les différentes approches menées à l'échelle nationale. En effet, depuis de nombreuses années, différentes méthodologies ont été appliquées sur des secteurs du territoire national en vue d'apprécier la qualité des sols. Seront donc présentées successivement les données acquises dans le cadre de différents programmes :

à l'échelle nationale :

- les données de l'inventaire minier national (sols et sédiments) réalisé par le BRGM ;
- les données du programme INRA-ASPITET (approche pédologique et typologique) ;
- la collecte de données nationales sur les sols avant épandage de boues de STEP (programme ADEME-INRA).

aux échelles régionales et locales :

- le test intercomparatif de La Châtre (Indre) entre une approche basée sur une typologie pédo-géologique et une approche systématique de géochimie sols et sédiments (programme GESSOL, BRGM et INRA) ;
- la constitution de bases de données de références autour de sites industriels en région Lorraine et Nord - Pas-de-Calais (programme INRA).

Ce rapport précise les conditions d'obtention de ces différentes données et leurs conditions d'utilisation dans le cadre de l'approche nationale nécessitant un référentiel en matière de qualité des sols.

1. Inventaire minier national

Il existe, sur une grande part du territoire français, d'abondantes données sur la répartition *naturelle* des éléments, métalliques ou non, dans l'environnement. L'objectif de la couverture géochimique de l'inventaire minier national était de repérer toutes les « anomalies géochimiques » de quelque importance, c'est-à-dire susceptibles de correspondre à des gîtes minéraux d'intérêt économique potentiel.

Actuellement, on peut estimer qu'un peu moins de 20 % du territoire national a fait l'objet d'investigations systématiques, avec une densité de mesures qui est de l'ordre de 2 à 4 échantillons par chaque kilomètre carré. Localement, la densité est bien supérieure et peut atteindre 400 échantillons au kilomètre carré. Les zones couvertes se situent essentiellement dans les massifs anciens, Bretagne, Massif central, Vosges, et également à un moindre titre dans les Alpes et les Pyrénées. Ces investigations géochimiques ont été menées pour déceler des gisements métallifères sur le territoire national.

1.1. SECTEURS COUVERTS PAR L'INVENTAIRE MINIER NATIONAL

Les investigations géochimiques ont été focalisées sur les zones connues pour receler des gisements métallifères, à savoir les massifs hercyniens et leurs marges sédimentaires, en particulier Morvan, Cévennes et Marche, soit 101 540 km² environ. Les grands bassins sédimentaires d'Aquitaine, du couloir rhodanien et du Bassin parisien, n'ont donc pas été couverts (cf. fig. 1).

Ces investigations ont été faites par échantillonnage systématique, à une maille telle qu'un gîte minéral important subaffleurant soit détecté avec une très forte probabilité.

1.2. TECHNIQUES DE PRÉLEVEMENT ADOPTÉES ET MISE EN OEUVRE

1.2.1. Le choix des milieux d'échantillonnage

Mis à part le cas des gisements dits « cachés » ou profonds, la présence de fortes teneurs en métaux (ou en d'autres éléments) dans les roches, en relation avec les minéralisations, se traduit en général par des *teneurs élevées dans les sols* sus-jacents.

Ces zones de fortes teneurs en éléments dans les sols sont appelées *anomalies*, et le principe de la prospection géochimique des gîtes métallifères, est précisément de les mettre en évidence.

"BANQUE DES DONNEES GEOCHIMIQUES"

Localisation des informations

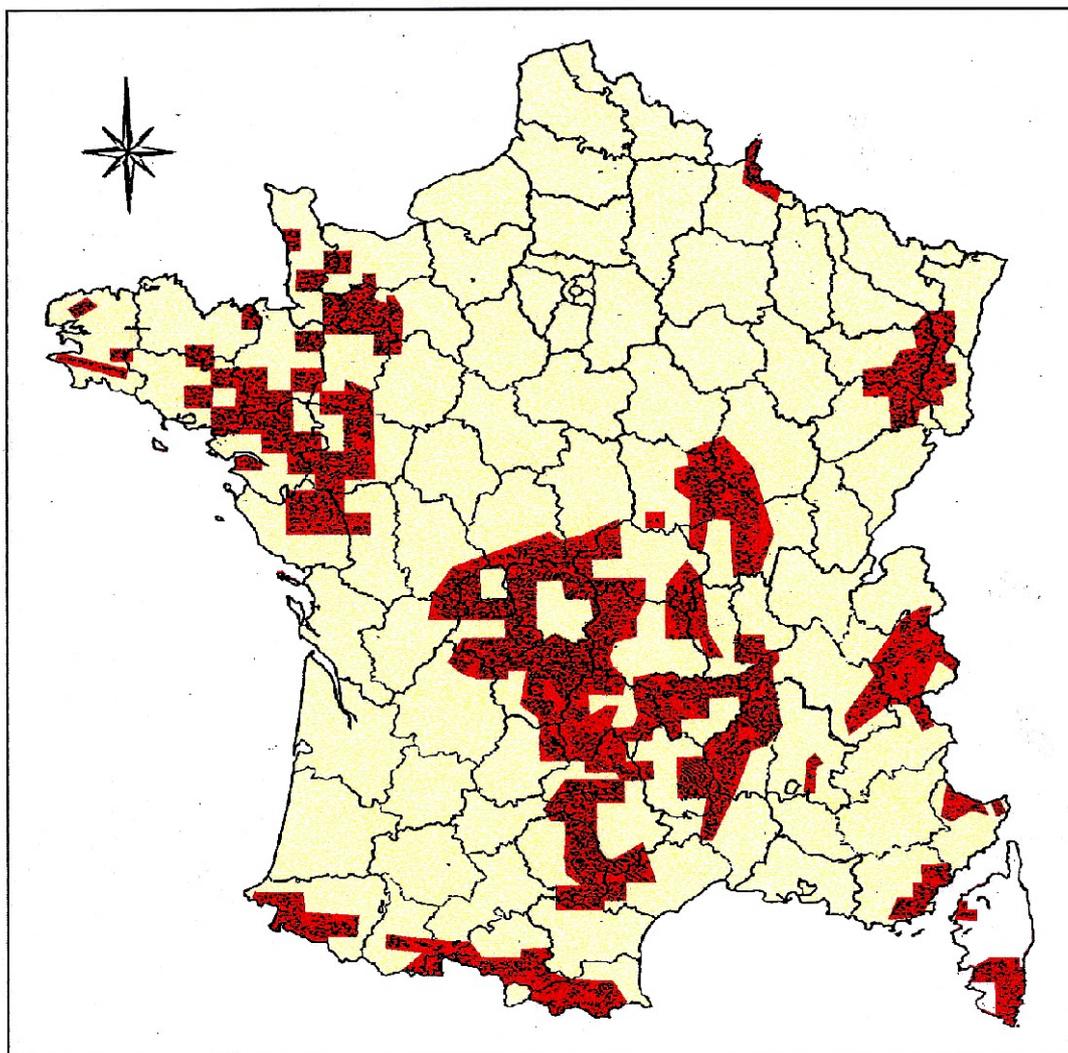


Fig. 1 - Localisation des informations acquises lors de l'inventaire minier national.

a) Les sols comme milieu d'échantillonnage : des avantages multiples

Le prélèvement de sols présente de nombreux avantages. A la différence de prélèvements de roches en affleurement, il peut se faire pratiquement n'importe où, et est bien plus économique que le prélèvement de roches par forage. Enfin, il n'implique pas un broyage dispendieux avant l'analyse, si celle-ci est faite sur une fraction suffisamment fine.

Le principal avantage du prélèvement de sols par rapport aux roches en prospection géochimique est lié aux processus de dispersions chimiques ou mécaniques se développant dans les sols. Ces phénomènes permettent la formation de halos de dispersion de plusieurs dizaines à centaines de mètres d'extension par rapport à une source plus restreinte localisée dans le substratum rocheux.

La dispersion mécanique dans le sol est tantôt liée à des mouvements de terrain le long des pentes, tantôt activée par l'érosion naturelle. Elle est donc fortement dépendante des conditions géomorphologiques locales, voire paléoclimatiques (solifluction).

La dispersion chimique dans les sols résulte des processus pédogénétiques de formation des sols aux dépens du substratum. Bien souvent, les minéraux primaires des minéralisations (ex. : sulfures, ...) font l'objet d'une altération à l'interface roche-sol. Ces réactions induisent une solubilisation de certains éléments qui peuvent migrer dans les sols sous forme soluble ou colloïdale. Les espèces remobilisées sont piégées sous forme de minéraux dits « secondaires » ou adsorbées sur des argiles, des oxydes ou de la matière organique du sol.

Les densités d'échantillonnage en sol à l'échelle régionale sont d'environ 1 à 5 échantillons/km².

b) L'échantillonnage des alluvions en tête de bassins

L'extension des halos ou dispersion en sol n'excède pas en général la dimension des interfluves. C'est pourquoi à l'échelle régionale, on privilégie généralement le prélèvement et l'analyse de sédiments de ruisseaux ou petites rivières.

Dans ce cas, le signal géochimique recherché correspond à celui du produit d'érosion intégrant la surface de bassin versant. L'échantillonnage ne se fait plus selon un maillage régulier, mais est prédéfini en fonction de la hiérarchisation du réseau hydrographique et de la densité d'échantillon au kilomètre carré souhaité. L'échantillon prélevé est alors considéré comme représentatif du bassin versant drainé.

Les densités d'échantillonnage pour des prélèvements de sédiments varient généralement de 2 échantillons par km² à 1 échantillon pour 10 km².

Avec cette technique, la densité d'échantillonnage est plus faible que par prélèvements de sols : c'est le point essentiel à retenir.

Cette méthode est peu performante dans deux cas de figure :

- le chevelu du réseau hydrographique n'est pas suffisamment étoffé pour atteindre la densité d'échantillonnage souhaitée ;
- des pollutions anthropiques transitent de façon préférentielle le long du réseau hydrographique et masquent le signal naturel.

La figure 1 donne une idée de la répartition de l'échantillonnage effectué dans le cadre de l'inventaire minier national.

Dans le sud du Massif central, l'échantillonnage en sol à maille quasi régulière se traduit par une sorte de trame, qui correspond à la disposition en quinconce des prélèvements. On notera aussi les diverses densités d'échantillonnage ; dans le cas où le réseau de drainage n'est pas assez dense, l'échantillonnage a été complété par des prélèvements de sols. Lorsque des pollutions étaient à craindre, par exemple dans les secteurs de vieille activité minière du Tarn et des Cévennes, on a recueilli uniquement des sols.

1.2.2. Protocoles d'échantillonnage

Les questions relatives aux analyses effectuées étant traitées au chapitre suivant, ne sont abordés ici que les points relatifs aux prélèvements et au traitement des échantillons.

a) La position des points de prélèvement

La position prévisionnelle des points d'échantillonnage a été choisie sur un fonds topographique IGN à 1/50 000, de manière à obtenir une couverture aussi continue que possible et aussi homogène quant à la densité de prélèvement. Les lieux réels de prélèvement ont pu s'en écarter légèrement, en fonction surtout de question de facilité d'accès. Les coordonnées qui figurent dans la banque de données géochimiques sont celles du prélèvement effectivement réalisé.

Les valeurs numériques attribuées aux coordonnées d'échantillonnage correspondent théoriquement à une précision hectométrique du fait du cumul d'imprécisions entre le report sur plan d'échantillonnage et la digitalisation.

b) La prise des échantillons

Les consignes d'échantillonnage sur le terrain ont été élaborées de façon assez pragmatique après les campagnes de terrain de la fin des années 60, et de quelques travaux méthodologiques.

• Profondeur d'échantillonnage en sol

La composition d'un sol varie le long d'une coupe verticale, et cette variabilité se traduit plus ou moins dans la chimie de chaque horizon. D'une façon générale, ces variations verticales sont à mettre en relation avec trois sortes de phénomènes :

- les hétérogénéités chimiques *originelles* du sous-sol, parmi lesquelles se trouvent les concentrations naturelles de plomb, zinc, cadmium, mercure, arsenic..., dont les plus riches peuvent faire l'objet d'activités extractives. Ces hétérogénéités peuvent localement conduire dans les sols à des contrastes de teneurs forts ;

- l'existence d'apports atmosphériques, volontaires (sulfatage des vignes, épandage de boues résiduelles, pesticides,...) ou non (fumées d'usines, carburants de véhicules, etc.) ;
- l'action des acides organiques du sol, qui complexent et/ou rendent plus mobiles différents constituants comme les hydroxydes de fer, les argiles, et les métaux qui leur sont associés.

Les profondeurs de prélèvement généralement recommandées se situaient entre 30 et 50 cm, c'est-à-dire sous l'horizon humifère, mais sans viser spécifiquement un horizon pédologique particulier.

• **Prélèvements en tête de bassin (« stream-sediment »)**

Dans les alluvions, les échantillons n'ont pas été pris en une seule prise ponctuelle afin d'éviter un prélèvement peu représentatif, mais en une demi-douzaine d'endroits répartis sur quelques mètres, le long du thalweg. La consigne a été d'éviter la proximité des zones hydromorphes, en raison des problèmes induits par une proportion importante de matières organiques, et de la géochimie particulière de ces zones.

c) Le séchage et le tamisage des échantillons

La déshydratation ne peut pas se faire par fort chauffage, car certains éléments comme arsenic, antimoine ou mercure, sont plus ou moins volatils. Le séchage a donc été fait dans des bacs techniques, soit à l'air à température ambiante, soit à température modérée dans des sortes d'armoires chauffantes portées à 50-60 °C. Les échantillons ont été ensuite démottés au pilon puis tamisés.

Le risque d'une pollution entre échantillons en cours de séchage, par dispersion de poussières ou de particules, peut être considéré comme nul, compte tenu de la masse des échantillons prélevés (de l'ordre du kilogramme).

L'usage est de tamiser les échantillons après séchage et de ne garder pour l'analyse que la fraction fine, usuellement moins de 125 microns (0,125 mm). Cette manière de faire, qui est quasiment un standard à l'échelle internationale en matière de prospection géochimique, a plusieurs avantages :

- une meilleure représentativité de la fraction quartée ;
- un signal géochimique plus élevé pour les éléments en trace associés aux minéraux de petite taille (argiles, oxydes de fer et de manganèse) ;
- une mise en solution directe, sans broyage préalable, du fait de la fraction fine ;
- un gain de temps et un moindre risque de pollution des échantillons du fait de la non nécessité du broyage.

d) Grillage des échantillons

Pour des raisons liées au protocole analytique, il a été nécessaire pour certaines des techniques d'analyse (ICP, spectrométrie) de détruire au préalable la matière organique par chauffage à 450°C.

L'attaque acide à chaud suivie d'une analyse par spectrométrie DCP, qui représente presque 90 % des données de l'inventaire minier national, n'a pas nécessité de grillage (cf. ci-dessous).

1.3. LES ANALYSES

La base de données géochimiques de l'inventaire minier national comprend des analyses faites avec des techniques variées. Il est cependant important de ne pas perdre de vue que ces informations ne constituent pas un ensemble homogène, notamment quant aux techniques de prélèvement et d'analyses mises en oeuvre (tabl. 1).

1.3.1. La spectrométrie d'étincelle

De manière à disposer d'une large gamme d'éléments, la plupart des dosages ont été faits par spectrométrie d'émission. Pendant quelques temps et au début des travaux de l'inventaire minier national, certaines des analyses ont été faites en spectrométrie d'émission à étincelle et alimentation automatique par ruban (quantomètre). Ce stade n'a été que temporaire, et a correspondu à l'emploi initial d'un matériel déjà existant, ou utilisé en cas de surcharge de travail. La technique a en effet été progressivement remplacée par la spectrométrie d'émission à plasma (DCP, ICP).

Techniques	Nombre d'échantillons
Absorption atomique (Ag, Pb, Zn)	916
Spectrométrie d'étincelle (quantomètre)	9 953
Spectrométrie DCP	230 734
Spectrométrie ICP	28 142
Colorimétrie (pour le fluor)	69 567
Ionométrie (électrode spécifique, pour le fluor dans les eaux)	26 101

Tabl. 1 - Répartition des techniques d'analyses employées.

TECHNIQUES ANALYTIQUES MULTIELEMENTAIRES

Eléments	DCP		ICP		Quantomètre	
	Seuil inf.	Seuil sup.	Seuil inf.	Seuil sup.	Seuil inf.	Seuil sup.
Al ₂ O ₃ (%)			1	100	3	50
CaO (%)					3	100
Fe ₂ O ₃ (%)	0,1	23	1	100	1	100
K ₂ O (%)					1	16
MgO (%)			1	50	1	50
MnO (%)	0,01			20		1
Na ₂ O	Non analysé				1	16
P ₂ O ₅ (%)	10			8		2
Ag	0.2	100		300		40
As	10	1 000	20	50 000	20	1 300
B	10	1 000	10	18 000	10	1 800
Ba	10	1 000	10	3 500	5	5 000
Be	1	100				
Bi			10	10 000		
Cd	1	250	2	5 000	4	250
Co	1	1 000	5	25 000	10	4 000
Cr	10	1 000	10	13 000	10	3 000
Cu	10	1 000	5	8 000	3	1 000
La					200	5 000
Mo	2	250	5	7 500	3	5 000
Nb	10	1 000	20	15 000	200	10 000
Ni	10	1 000	10	18 000	5	4 000
Pb	10	1 000	10	6 000	15	3 000
Sb	20	1 000	10	25 000	50	2 000
SiO ₂			1	100	3	100
Sn	20	1 000	10	20 000	20	3 000
V	10	1 000	10	4 000	5	5 000
W	10	1 000	10	15 000	50	2 000
Y	5	200	20	15 000	75	15 000
Zn	10	1 000	5	20 000	5	600
Zr			20	13 000	50	15 000

Tabl. 2 - Eléments analysés et seuils de détection analytique, en spectrométrie à plasma DCP et ICP, et au quantomètre (valeurs en ppm (mg/kg), sauf quand il est spécifié qu'elles sont en % de poids d'oxyde).

Pour éviter les problèmes liés à la présence de matière organique, les échantillons ont été grillés à 450 °C (Moal et Pinault, 1979). Ces problèmes ont été de deux sortes : projection de matière lors de la volatilisation violente des substances organiques dans l'arc électrique, et interférences.

1.3.2. La spectrométrie à plasma

Dans ce domaine, deux méthodes principales ont été employées dans le cadre de l'inventaire minier national :

- tout d'abord, une spectrométrie à plasma diffusif (DCP) après une mise en solution acide à chaud au moyen d'acide perchlorique (150°C), puis d'acides chlorhydrique et fluorhydrique (85°C). Cette attaque laisse un résidu, elle n'est donc pas totale. Les analyses correspondantes constituent la majeure part des données géochimiques de l'inventaire (85 %) ;
- ultérieurement, une spectrométrie à plasma inductif (ICP) après une mise en solution alcaline totale par frittage au peroxyde de sodium.

La mise en solution au peroxyde de sodium a nécessité, elle aussi, la destruction des matières organiques par grillage.

Le tableau 2 donne les divers éléments recherchés selon les différentes techniques de dosage.

Deux seuils analytiques sont mentionnés, l'un inférieur, l'autre supérieur ; ils encadrent la gamme de valeur dans laquelle la précision analytique est garantie. Comme l'expliquent Boucetta et Fritsche (1979) :

« ... Les limites inférieures de dosabilité retenues ne doivent pas être confondues avec les limites de sensibilité de chaque élément, qui en spectrographie d'émission n'ont aucune signification. En effet, pour la plupart des éléments, il ne sera pas nécessaire d'effectuer des déterminations plus faibles que les teneurs de fonds géochimique de chacun d'eux (quelques ppm pour la plupart des éléments courants). Par contre, pour les autres éléments, la détection - limite sera fonction des interactions chimiques ou spectrales et de la précision avec laquelle on pourra les corriger. Ce sera donc un compromis entre les cadences analytiques souhaitées et la précision des résultats à obtenir... La précision relative des déterminations sera d'environ 5 % pour la plupart des éléments en milieu de gamme »

Les valeurs excédant ou dépassant les bornes supérieures (seuils analytiques) de dosabilité, ne sont donc pas dépourvues de signification : ce sont simplement celles pour lesquelles on estime la précision relative à plus de 5 %. C'est pourquoi nous conseillons, lors de l'emploi des données géochimiques, de ne pas tenir compte de ces seuils : les fluctuations naturelles de teneurs atteignent souvent un facteur de 10, soit 1 000 %, ce qui est sans commune mesure avec le degré de précision analytique.

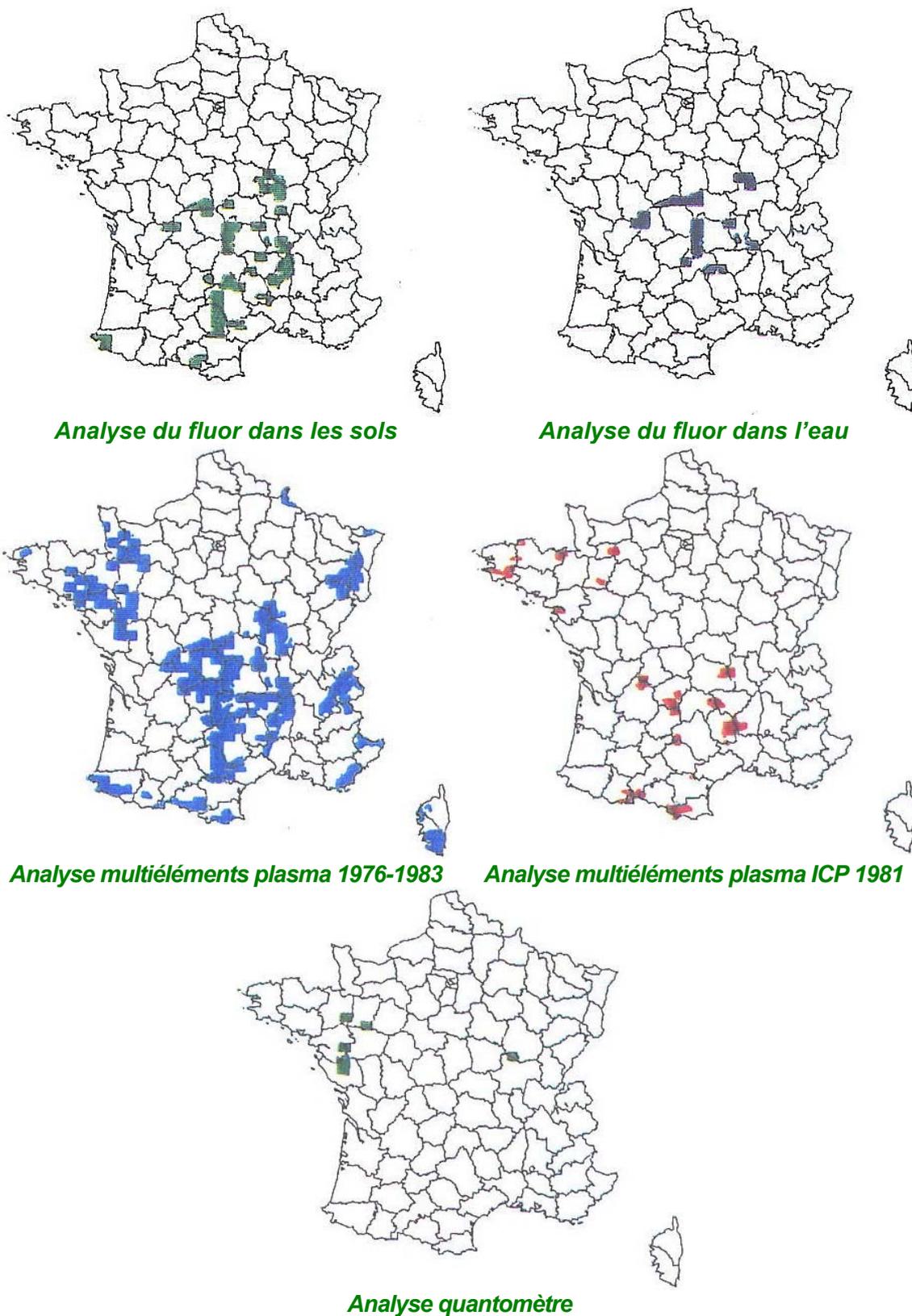


Fig. 2 - Localisation des échantillons de l'inventaire géochimique, en fonction de la technique analytique utilisée.

Il est donc indispensable de demander à la base de données des informations numériques, ne tenant pas compte des seuils en question. A défaut, une valeur de 1 000 ppm par exemple pour le baryum, signifiera que la valeur mesurée a été égale *ou supérieure* à 1 000 ppm.

On n'oubliera pas par ailleurs qu'avec la technique mise en œuvre, les valeurs naturelles de plusieurs éléments (Ag, Cd, Mo, Sb, Nb, Sn, W...) sont trop faibles (inférieures à 10 ppm) pour être mesurées, sauf dans des zones d'anomalies. En d'autres termes, on ne peut estimer les fonds géochimiques naturels de ces éléments avec une grande précision.

1.4. ACCÈS AUX DONNÉES DE L'INVENTAIRE MINIER NATIONAL

Les données sont actuellement stockées dans la base de données du sous-sol (BSS), au Service Connaissance et Diffusion de l'Information Géologique du BRGM ou via Internet (InfoTerre). Pour chaque échantillon, elles comprennent :

- un numéro d'échantillon dans la base de données, attribué de façon séquentielle ;
- le numéro IGN (Institut géographique National) de la carte géographique à 1/50 000, dans laquelle se situe l'échantillon ;
- un numéro allant de 1 à n, correspondant à l'échantillonnage de terrain (pour chaque feuille à 1/50 000, les échantillons étaient numérotés de 1 à n au moment de leur prélèvement) ;
- les coordonnées X et Y du prélèvement, dans le système Lambert 2 étendu ;
- le type de prélèvement, codé en chiffres : 1 = alluvions de ruisseau, et 2 = sol ;
- la technique d'analyse employée ;
- les résultats analytiques pour les différents éléments recherchés.

1.5. QUALITÉ DES MESURES

1.5.1. Influence de la nature des échantillons

Il y a eu deux grands types de prélèvement, en sols et dans les alluvions. Les cartographies de teneurs faites dans les régions où ces deux techniques ont été utilisées, ne montrent guère de différences sensibles dans les fonds géochimiques moyens, quel que soit l'élément, en fonction de l'une ou l'autre méthode. Tout se passe comme si les parties fines des alluvions, et celles de sols, étaient de compositions sinon identiques, du moins très voisines.

La seule différence remarquée est que les prélèvements pris dans le drainage hydrographique, montrent parfois un phénomène dit de piégeage. Il s'agit d'enrichissement en hydroxydes de fer et/ou manganèse, qui sont accompagnés d'une

augmentation plus ou moins marquée des teneurs en arsenic, cobalt, nickel et zinc. L'interprétation classiquement donnée est la précipitation des hydroxydes de fer et de manganèse par aération d'eaux provenant de milieux réducteurs (marécages, zones hydromorphes), et l'entraînement par coprécipitation ou sorption des éléments As, Co, Ni, Zn. Ce phénomène est toutefois peu fréquent, et très localisé ; il ne suffit donc pas à modifier les fonds géochimiques naturels à une échelle kilométrique.

Qualitativement, ce phénomène ressemble à celui que les pédologues connaissent dans les sols, et dont des exemples ont été donnés récemment par D. Baize (1994). Pourtant, rien de semblable n'a été relevé dans les sols échantillonnés. L'explication réside probablement dans le fait que la précipitation des hydroxydes de fer et de manganèse se fait à une profondeur de quelques dizaines de centimètres dans les sols, et que les échantillons ont été prélevés dans l'ensemble de façon plus superficielle. De plus, cette différenciation en fonction des niveaux pédologiques paraît fonctionner surtout dans les sols développés sur des roches sédimentaires, calcaires, marnes, argiles,... alors que la grande majorité des secteurs couverts correspond à des roches de nature différente, granites, schistes ou gneiss.

En conclusion, le type d'échantillonnage ne paraît pas avoir une influence notable sur le fonds géochimique naturel à l'échelle régionale. Il est seulement probable que les valeurs obtenues à partir d'échantillons pris le long du réseau hydrographique, sont un peu plus homogènes que celles provenant de sols. En effet, il y a dans les sédiments des petits cours d'eau un effet de mélange mécanique indéniable, ce qui tend à homogénéiser les teneurs, alors que dans les sols cet effet de mélange joue à une échelle plus restreinte (cf. ann. 1).

1.5.2. Influence de l'attaque chimique des échantillons

Les données obtenues au quantomètre ne couvrent qu'une petite part du territoire (fig. 2), les échantillons ayant fait l'objet d'un traitement particulier. Dans cette technique, qui est une spectrométrie d'émission sur poudre, il n'y a pas de mise en solution. Toutefois, certains paramètres peuvent influencer sur les mesures, comme ceux liés à la granulométrie de la poudre ou à son état cristallographique, et à la quantité de matière excitée compte tenu de l'alimentation automatique par ruban (Moal et Pinault, 1979).

Pour ce qui est de la spectrométrie à plasma, la mise en solution était partielle dans le cas de la spectrométrie DCP (attaque triacide), et totale pour l'ICP. Pour certains éléments liés à des minéraux particulièrement réfractaires (chrome par exemple), les niveaux de teneurs ne sont pas tout à fait comparables d'une technique à l'autre. Pour ce motif, les fonds géochimiques que l'on peut calculer à partir de l'une ou l'autre des techniques d'analyse, peuvent présenter des écarts sensibles. Les écarts de signal nécessitent des corrections et une harmonisation des données sur la base de critères statistiques.

1.5.3. Autres sources d'erreurs

Plusieurs facteurs sont à prendre en compte :

- la technique analytique utilisée (quantomètre, DCP, ICP) dont les réponses peuvent varier significativement d'un élément-trace à l'autre ;
- le mode de mise en solution de l'échantillon (totale ou partielle) ;
- les évolutions de protocole analytique pouvant induire des dérives dans le signal mesuré (matériel utilisé, techniques d'étalonnage, etc.).

1.5.4. Conséquences sur l'emploi des données

Sur l'ensemble du territoire français et pour un élément donné, les teneurs géochimiques, déterminées avec le même type d'appareillage, s'étendent sur une gamme où les valeurs extrêmes peuvent différer d'un facteur 100. On a ainsi les gammes de 10-1 000 ppm pour l'arsenic, le nickel ou le plomb, 50-5 000 pour le baryum, etc. En d'autres termes, si certaines imperfections sont détectables, elles sont de second ordre par rapport aux fluctuations naturelles de la concentration en éléments traces dans les sols et les sédiments.

Pour éliminer le plus possible ces imperfections, *tout travail gagnera à ne prendre en compte que des résultats obtenus au moyen d'une seule et même technique analytique.* Les cartes de teneurs effectuées à partir des teneurs géochimiques obtenues en DCP, qui constituent l'essentiel de la base de données (cf. tabl. 1), montrent une excellente concordance avec les unités géologiques. La figure 3 montre un exemple de la distribution du Cr dans le massif des Vosges avec des variations du fonds géochimique liées à la lithologie, avec dans ce cas particulier des granites sub-alcalins relativement enrichis en Cr par rapport aux autres faciès lithologiques. La figure 4 dans le même secteur montre la distribution du baryum, également contrôlé par la lithologie avec des enrichissements relatifs associés aux roches magmatiques et volcaniques acides (dacite, rhyolithes).

Il en découle plusieurs conséquences :

- on peut combiner les analyses de sols ou d'alluvions, qui paraissent équivalentes en intensité et distribution du signal géochimique ;
- au point de vue méthodologie, l'absence de repérage des horizons des sols (non prise en compte des niveaux pédologiques), ne paraît pas influencer sur la qualité des données à ces échelles de cartographie.

La bonne concordance entre le substratum géologique et certains éléments traceurs marqueurs de la lithologie (ex. : Ba, Cr, Ni, Li, Zr) signifie aussi que les données géochimiques de l'inventaire minier décrivent dans leur très grande majorité, le fonds géochimique naturel.

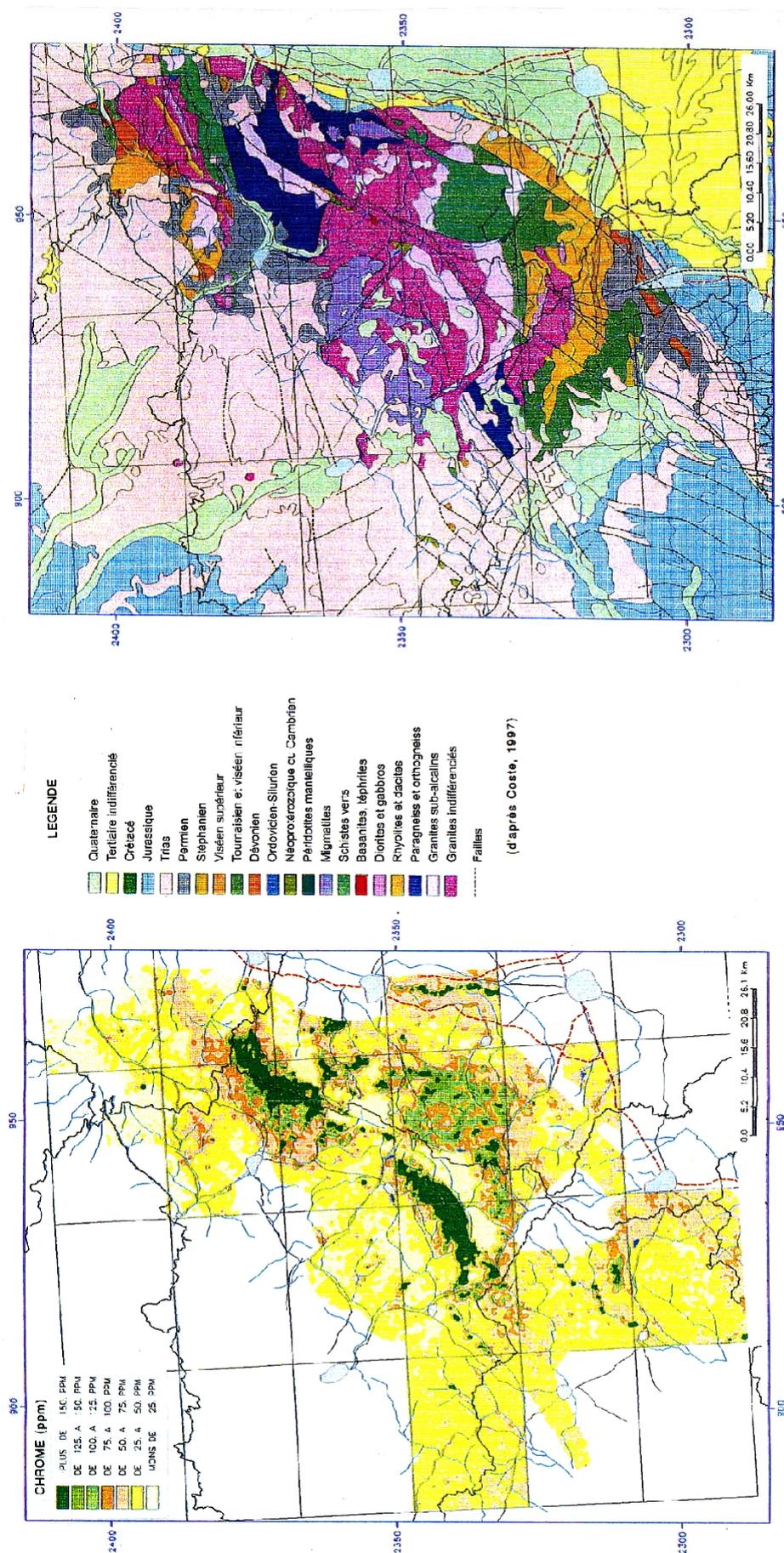


Fig. 3 - Comparaison entre la lithologie et la distribution des teneurs en Cr du sol dans le massif des Vosges.

Toutefois, cette correspondance entre géologie en géochimie ne concerne que les sols développés in situ sur le substratum. Or, il existe des cas où un écran est venu s'interposer entre les roches, et la surface topographique. Ainsi dans tout l'est du Massif armoricain, il existe des dépôts de loess masquant les roches sous-jacentes. Les échantillonnages réalisés traduisent donc surtout la géochimie des loess, et non celles des roches elles-mêmes, que ce soit pour un échantillonnage en sols ou en sédiments de ruisseaux. Il faut donc être prudent lors de l'emploi des données géochimiques correspondantes, et ne pas chercher à mettre en relation une géochimie qui est celle de formations géologiques pelliculaires, avec le substratum ou les aquifères par exemple.

Il existe d'autres cas de figures où le fonds géochimique régional n'est pas déterminé par la lithologie, mais plutôt par des phénomènes géologiques liés à des altérations hydrothermales, de grands accidents crustaux, du métamorphisme, des minéralisations, etc. Des éléments comme As, Cu, Pb, Zn, Cd, Mo, Sn, Sb, Li, B, W, Se, etc. peuvent alors montrer des enrichissements importants à l'échelle régionale. La figure 5 illustre la distribution de As dans les sols et les sédiments de ruisseaux sur l'ensemble du Limousin. On remarque la présence de grands linéaments enrichis en As sur plus de 200 km de long et 10 à 50 km de large.

1.6. RECOMMANDATIONS POUR L'UTILISATION DES DONNÉES EXISTANTES

1.6.1. Sélection des données

En vue d'obtenir des renseignements sur les données géochimiques existantes, il est possible d'identifier les zones dans lesquelles un échantillonnage a été réalisé, d'après les cartes de la figure 2. On voit clairement que l'échantillonnage a souvent été fait en fonction des limites IGN, en l'occurrence les coupures géographiques à 1/50 000.

On peut donc demander les données correspondant à telle ou telle coupure du quadrillage 1/50 000 de l'IGN, mais on peut aussi demander une sélection en fonction de limites administratives, par département ou par région. De même, les tris peuvent porter sur les techniques analytiques employées. Il conviendra d'en tenir compte lors de l'utilisation de ces données en vue d'interprétation pour déterminer le fonds géochimique naturel.

1.6.2. Utilisation des données

Selon les objectifs affichés, les données de l'inventaire minier national peuvent être utilisées selon différentes manières :

a) Les reports de points pour un travail à l'échelle locale

Le report de points constitue l'application la plus simple. Elle consiste à reporter la position des points d'échantillonnage en fonction de leurs coordonnées et à afficher les valeurs numériques des éléments analysés. Ce travail généralement réalisé à l'échelle du 1/50 000 environ, permet de comparer des teneurs locales avec des objets bien localisés, tels que des captages d'alimentation en eau ou des sources.

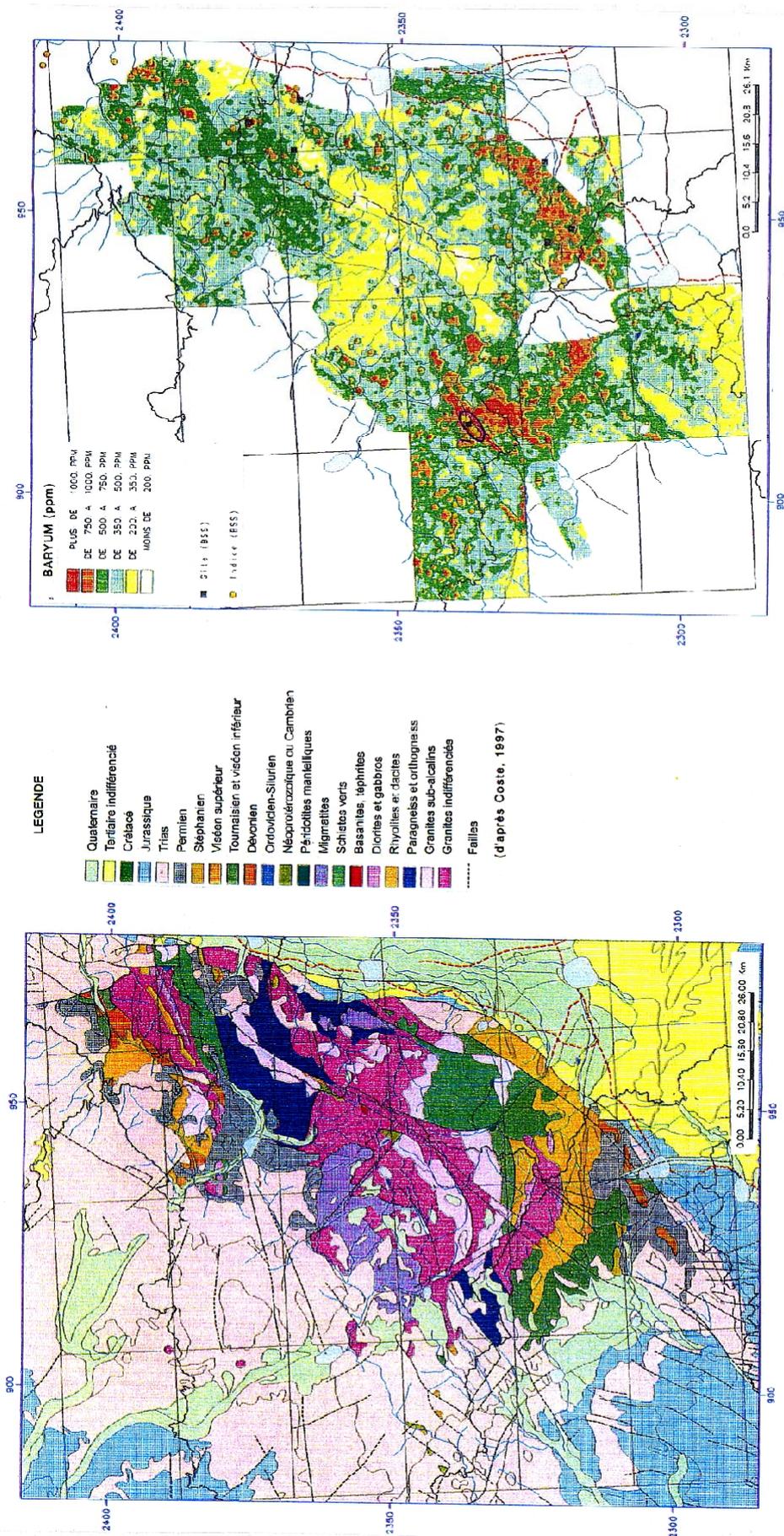


Fig. 4 - Comparaison entre la lithologie et la distribution des teneurs en Ba du sol dans le massif des Vosges.

Même à une échelle relativement petite, il n'est permis de faire des interpolations pour affecter une valeur théorique en un endroit donné. Le problème est en effet le même que le nivellement de l'IGN qui fournit des points de repères mais qu'il est difficile d'utiliser dans un but de prédiction, sauf à proximité immédiate des points cotés.

b) Les cartes en fond continu pour un travail à l'échelle régionale

Ce sont des cartes telles que celles données en figures 3 et 4 qui permettent de montrer *les grandes variations du fonds géochimique naturel et la localisation de zones d'anomalies*. Pour ce faire, on utilise des techniques et des logiciels d'interpolation qui génèrent des valeurs fictives destinées essentiellement à lisser les hétérogénéités des échantillonnages. Les cartes ainsi élaborées, représentant la plupart du temps des isoteneurs, sont plus lisibles et moins influencées par la densité d'échantillonnage. Toutefois, compte tenu des connaissances actuelles, il semble qu'il faudrait s'en tenir à une interpolation minimale (c'est-à-dire que la maille de calcul soit aussi proche que possible de la zone d'influence moyenne des échantillons, en l'occurrence pour l'inventaire minier national 600 - 700 m).

1.7. CONCLUSIONS

Les données obtenues dans le cadre de l'inventaire minier national sont extrêmement nombreuses, bien que réparties sur environ 20% du territoire national et sont par-là même irremplaçables. Du fait du protocole d'acquisition de ces données, leur emploi ne peut être recommandé que si l'on vise des résultats à une échelle régionale, voire nationale. Des tests préliminaires d'inter - comparaison, tels que celui pratiqué sur le secteur de La Châtre, permettent de faire le lien avec des investigations ayant préféré un protocole quelque peu différent.

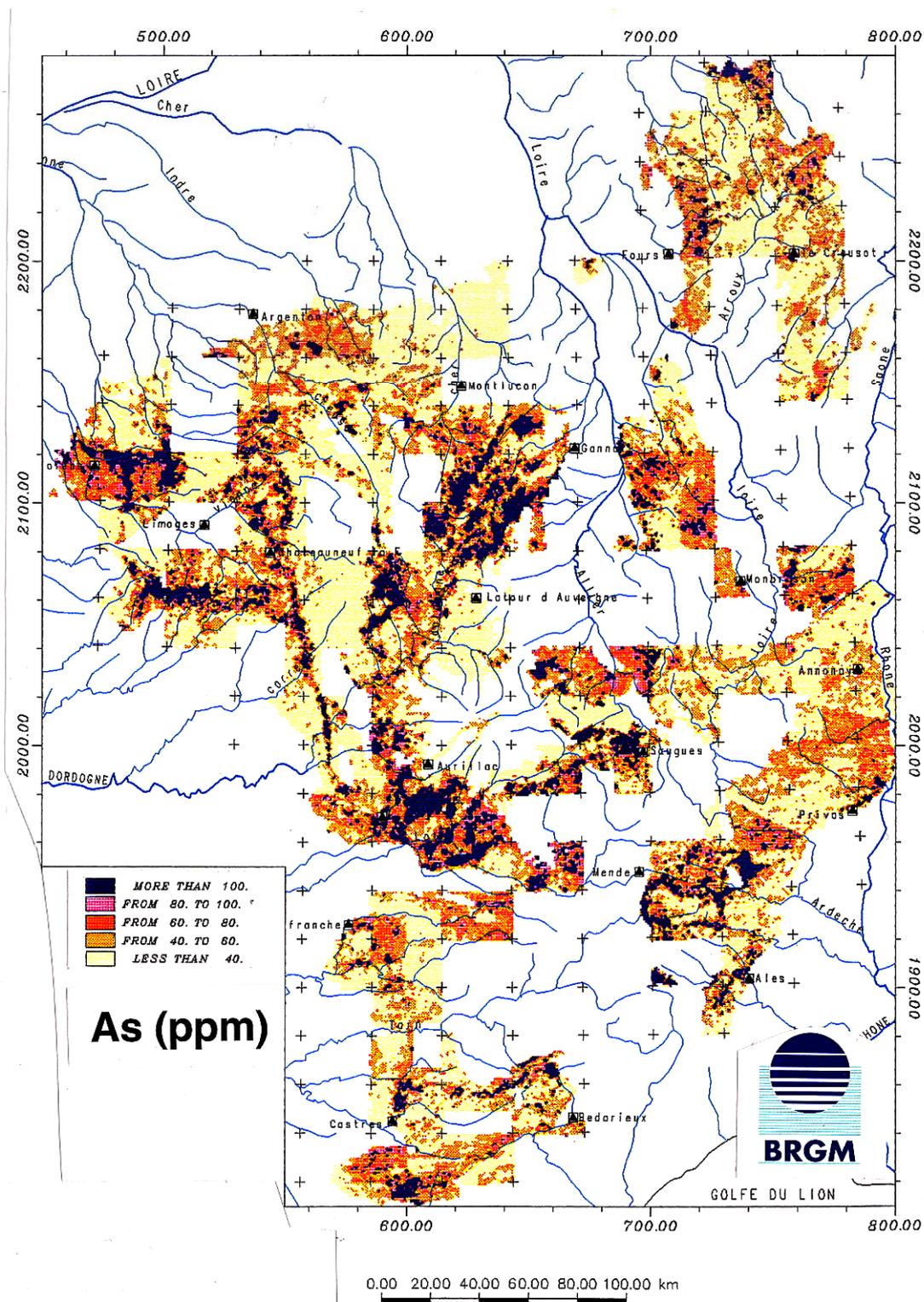


Fig. 5 - Carte de synthèse des teneurs en As dans les sols et sédiments de ruisseaux du Limousin.

2. Le programme INRA - ASPITET

Ce programme « Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Eléments Traces », développé dans le cadre d'une Action Incitative Programmée de l'INRA baptisée « ECOPOL », vise à montrer l'intérêt d'une approche pédologique pour l'acquisition de données et l'interprétation des teneurs en éléments traces dans les sols (Baize, 1994, 1997, 1999).

2.1. OBJECTIFS INITIAUX DU PROGRAMME

Les objectifs du programme ASPITET sont de :

- **fournir des références** sur les teneurs totales en éléments traces métalliques mesurées dans divers sols français ;
- **transmettre des informations** utiles sur les relations entre ces teneurs et d'autres données pédologiques et géologiques ;
- proposer et expliquer des **démarches d'interprétation** applicables partout.

La démarche est d'utiliser les concepts et les acquis de la pédologie, en jugeant qu'il n'est pas raisonnable de traiter des éléments traces métalliques dans les sols en ignorant ou en négligeant les connaissances acquises par cette science.

Dans ce programme, les « sols » sont des formations naturelles, continues, tridimensionnelles, qui résultent de l'altération des roches puis de leur évolution autonome sous l'action de facteurs climatiques et biologiques. Il ne s'agit donc pas de « terrains » ou de « sites » très anthropisés, tels les terrains industriels ou les anciennes décharges.

Ces formations naturelles, dites aussi « couvertures pédologiques », constituent à la fois le milieu de croissance des plantes (qu'il s'agisse des plantes cultivées, des essences forestières ou de la végétation spontanée) et l'interface entre l'atmosphère, la biosphère et la lithosphère. C'est pourquoi « les sols » sont le réceptacle d'un grand nombre de contaminations :

- diffuses ou localisées ;
- dont les sources sont agricoles, industrielles, routières ou urbaines ;
- et dont les voies de transfert sont l'atmosphère ou divers épandages (engrais, résidus ou déchets).

La question est posée de savoir s'ils joueront un rôle d'immobilisation des éléments traces ou s'ils laisseront transiter ces éléments vers les nappes phréatiques, vers les eaux superficielles (ruissellement, érosion) ou vers les plantes cultivées et les animaux (biodisponibilité), donc vers l'homme.

2.2. LES MÉTHODES MISES EN ŒUVRE (PRÉLÈVEMENTS, ANALYSES)

2.2.1. La population étudiée

Elle correspond (à ce jour) à 1310 horizons de sols (cf. fig. 6). Le mode d'échantillonnage est le suivant :

- 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 deux à cinq horizons superposés selon les cas. Le contexte géologique et pédologique est, à chaque fois, parfaitement connu.

Les échantillons proviennent d'une quarantaine de départements français 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 cristalloyphylloïdes 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.

2.2.2. Méthodes et techniques employées

Pour tous les échantillons, les **concentrations totales** en éléments traces ont été déterminées (tabl. 3):

- toujours Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn (mise en solution par HF et HClO₄ 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 laboratoire, celui de l'INRA à Arras, entre 1988 et 1998.

a) Préparation des échantillons

Les échantillons ont d'abord été séchés à l'air puis passés à 2 mm de façon ménagée : concassage à la main des agrégats dans un mortier de porcelaine, avec un pilon de la même matière. Les éventuels éléments grossiers (éléments lithiques ou nodules pédologiques > 2 mm) n'ont pas été broyés mais séparés, lavés et pesés et ont pu être analysés. Les teneurs totales correspondent à la « terre fine » inférieure à 2 mm.

b) Méthodes analytiques - Paramètres pédologiques classiques

Ont été réalisées les déterminations suivantes :

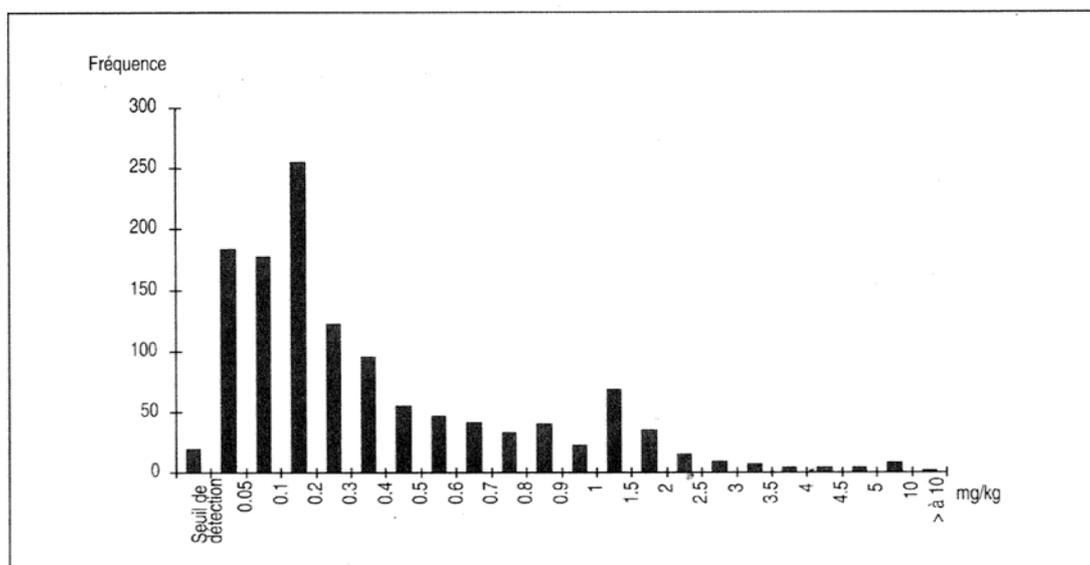


Fig. 7 - Histogramme du Cd pour les 1340 échantillons de sols du programme INRA-ASPITET, (Baize, 1997).

- granulométrie 5 fractions (méthode pipette - dispersion par l'hexamétaphosphate de sodium) ;
- carbone organique ou oxydable (méthode Anne modifiée - oxydation des matières organiques par le dichromate de potassium en milieu sulfurique) ; - calcaire total (calcimétrie) ;
- pH eau (proportion 1 : 2,5) ; - CEC (méthode de Metson à l'acétate d'ammonium à pH 7) ;
- fer dit « libre » (méthode Mehra-Jackson = citrate + bicarbonate + dithionite de sodium) ;
- fer et manganèse totaux (même prise et même méthodes d'extraction et de dosage que pour les éléments traces métalliques).

c) Extraction et dosage des éléments traces métalliques, Fe et Mn

La prise d'essai (séchée à l'air) a été broyée à 315 µm. L'extraction a été faite par une attaque par les acides fluorhydrique et perchlorique concentrés après calcination de 250 mg d'échantillon à 450°C durant 4 h.

Cd, Pb, Ni et Co ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique et une correction de fond à effet Zeeman ou arc deutérium (*ETAAS*). Cu et Cr ont été dosés par spectrométrie d'émission atomique de plasma induit d'argon (*ICP - AES*). Zn, Fe et Mn ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique en flamme (*flamme AAS*).

2.3. RÉSULTATS OBTENUS

Sur les 1310 échantillons, répartis sur 706 sites, quelques 24 000 valeurs analytiques ont été obtenues dans le cadre de ce programme. Un ouvrage rassemble l'ensemble des résultats et propose diverses stratégies d'interprétation (Baize, 1997).

2.3.1. Utilisations effectives

Les données ainsi acquises peuvent être utilisées pour :

- la connaissance des « fonds pédo-géochimiques naturels » locaux et de leur déterminisme pédo-géologique ;
- une détermination des gammes de valeurs couramment rencontrées dans les sols français et des valeurs naturelles modérément et fortement anormales (cf. fig. 7) ;
- des stratégies d'interprétation des concentrations en éléments traces métalliques mesurées dans les sols (distinction teneurs naturelles / contaminations) ;
- des études de la « qualité des sols » et de la « qualité des produits agricoles » nécessitant un raisonnement par séries de sols.

	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn	Fe
(Nb valeurs)	(768)	(695)	(791)	(787)	(797)	(790)	(804)	(735)	(767)
minimum	<2.02	<1	<2	<2	<2	2.2	<5	<10	0.05
1er décile	0.03	3.1	27.5	5	8.7	17.2	31	149	1.27
1er quartile	0.07	7.6	45.1	8.2	18	23.1	49	408	2.16
médiane	0.16	14	66.3	12.8	31	34.1	80	754	3.24
moyenne	0.42	17.1	75	14.9	41.3	64.8	149	1585	3.65
3ème quartile	0.47	21.3	90.7	18.1	48.6	48.5	132	1473	4.57
9ème décile	1.06	32.4	118	27.2	78.9	91.5	275	3332	6.47
maximum	6.99	148	691	107	478	3088	3820	24975	19.16

A	2	(30) ^a	150	100	50	100	300
B	26	82	39	1	186	76	71

Tabl. 3 - Teneurs totales en éléments traces métalliques, fer et manganèse dans les sols français. Population générale de 815 échantillons. Quelques horizons notoirement contaminés sont exclus.

A = seuil de la norme française NF-U-44-041 sur l'épandage de boues d'épuration. B = nombres de valeurs supérieures au seuil A.

2.3.2. Utilisations potentielles

Les données ainsi acquises peuvent éventuellement être utilisées pour :

- une aide à la fixation de valeurs seuils « sols » à l'échelon national ou européen ;
- une cartographie des « métaux lourds » et de la matière organique dans les sols d'Europe ("*Heavy metal and organic matter contents in European soils*") : projet de recherche envisagé à court terme par la DG XI de la CCE et l'Agence Fédérale pour l'Environnement d'Allemagne.

2.3.3. Disponibilités des données

Les données sont disponibles auprès de l'INRA, Unité de Sciences du Sol d'Orléans. Une base de données est en cours de restructuration pour une mise à disposition du public des données de ce programme.

Le programme ASPITET Sols *sensu stricto* est terminé. Cependant, la base de données continuera à s'enrichir de toutes les nouvelles données disponibles, notamment celles du Référentiel Pédo-Géochimique du Nord - Pas-de-Calais.

3. Le programme ADEME / INRA

Ce programme, financé par l'ADEME et supervisé par l'unité Science du Sol de l'INRA Orléans visait à établir un « état » des sols français en zones rurales, dans les années 90 à partir des analyses totales en éléments traces réalisées avant épandage de boues de stations d'épuration (Chassin *et al.*, 1996 ; Deslais et Baize, 1997 ; Baize *et al.*, 1999).

3.1. OBJECTIFS INITIAUX DU PROGRAMME

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 (fig. 8). 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'INRA d'Orléans ont décidé de s'associer pour engager un travail de collecte et de traitement des données disponibles au plan national.

Un autre objectif était de constituer une base de données informatisée et géoréférencée qui serait intégrée à la base de données ANADEME (base de données analyses de l'ADEME). Cette base de données permettra, grâce à une représentation spatiale des résultats analytiques, de fournir une image globale de l'état pédo-géochimique actuel des sols agricoles français.

En fait, les analyses ne portent que sur les horizons de surface des sols cultivés. Les résultats obtenus **avant** les épandages de boues d'épuration traduisent donc à la fois le fonds pédo-géochimique naturel local et la somme des apports liés aux activités humaines, récentes ou plus anciennes. Les causes de ces contaminations anthropiques peuvent être agricoles (fumiers, amendements, fertilisants), urbaines ou industrielles ; les sources peuvent être locales ou diffuses.

3.2. LES MÉTHODES MISES EN ŒUVRE (PRÉLÈVEMENTS, ANALYSES)

Les données collectées sont la propriété de diverses collectivités territoriales. Elles sont accessibles auprès de diverses institutions : principalement les Chambres d'Agriculture (MVAD, correspondants locaux) qui assurent le suivi de la qualité de la filière d'épandage et les bureaux d'études qui réalisent les plans d'épandage. Dans certains départements, les données ont été centralisées dans des administrations telles que les DDASS ou les Services de l'Eau. Le premier travail a donc consisté en la collecte de l'ensemble ou tout au moins de la majeure partie de ces données auprès d'un très grand nombre de partenaires dispersés, tout en évitant les doublons.

Etant donné la multiplicité des opérateurs, les méthodes d'échantillonnage ont probablement été très variées (divers types de composites). L'unité territoriale

échantillonnée a été la parcelle agricole et l'objet effectivement prélevé, l'horizon de surface labouré (20 à 30 premiers centimètres).

L'identité du laboratoire ayant réalisé les analyses figurait parmi les données collectées. On sait ainsi qu'une vingtaine de laboratoires est intervenue, utilisant des méthodes de mise en solution et des techniques de dosages différentes. Trois sous-populations ont ainsi été distinguées et éventuellement traitées séparément : - les échantillons pour lesquels la mise en solution a été faite par HF+HClO₄ ; les échantillons pour lesquels la mise en solution a été faite à l'eau régale (HCl+HNO₃) ; les échantillons pour lesquels la mise en solution est demeurée indéterminée.

Il en résulte que les données ne sont pas rigoureusement comparables entre elles, notamment en ce qui concerne Cr, Ni, Zn et Pb qui sont nettement moins extraits par l'eau régale que par l'acide fluorhydrique, qui lui dissout les silicates.

Les paramètres collectés (tabl.4) 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.

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Nombre de valeurs	10634	11117	11118	8798	11275	11150	8193	11161
Vibrisse inférieure	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00
Minimum	0,01	0,40	0,20	0,01	0,10	0,60	0,01	0,40
1 ^{er} décile	0,12	16,70	7,10	0,02	9,10	15,60	0,11	31,10
1 ^{er} quartile	0,20	24,00	10,00	0,03	14,30	20,60	0,15	45,00
Moyenne	0,39	41,62	17,37	0,08	24,06	30,35	0,26	68,02
Médiane	0,30	37,60	13,80	0,05	20,40	25,60	0,20	59,00
3 ^{ème} quartile	0,44	51,10	19,30	0,07	28,70	33,30	0,27	76,00
9 ^{ème} décile	0,69	69,40	28,03	0,11	41,80	43,80	0,40	102,00
Maximum	17,10	2262	663	11,60	1333,4	1560	9,20	2707
Vibrisse supérieure	0,80	91,75	33,25	0,13	50,30	52,35	0,45	122,50
Nbre d'outliers supérieurs	733	413	771	595	659	631	584	634
Norme AFNOR NF 44-041	2	150	100	1	50	100	10	300
Nbre de valeurs supérieures à la norme AFNOR	76	72	79	34	659	126	0	80

Tabl. 4 - Résultats statistiques sur les éléments traces métalliques (population totale).

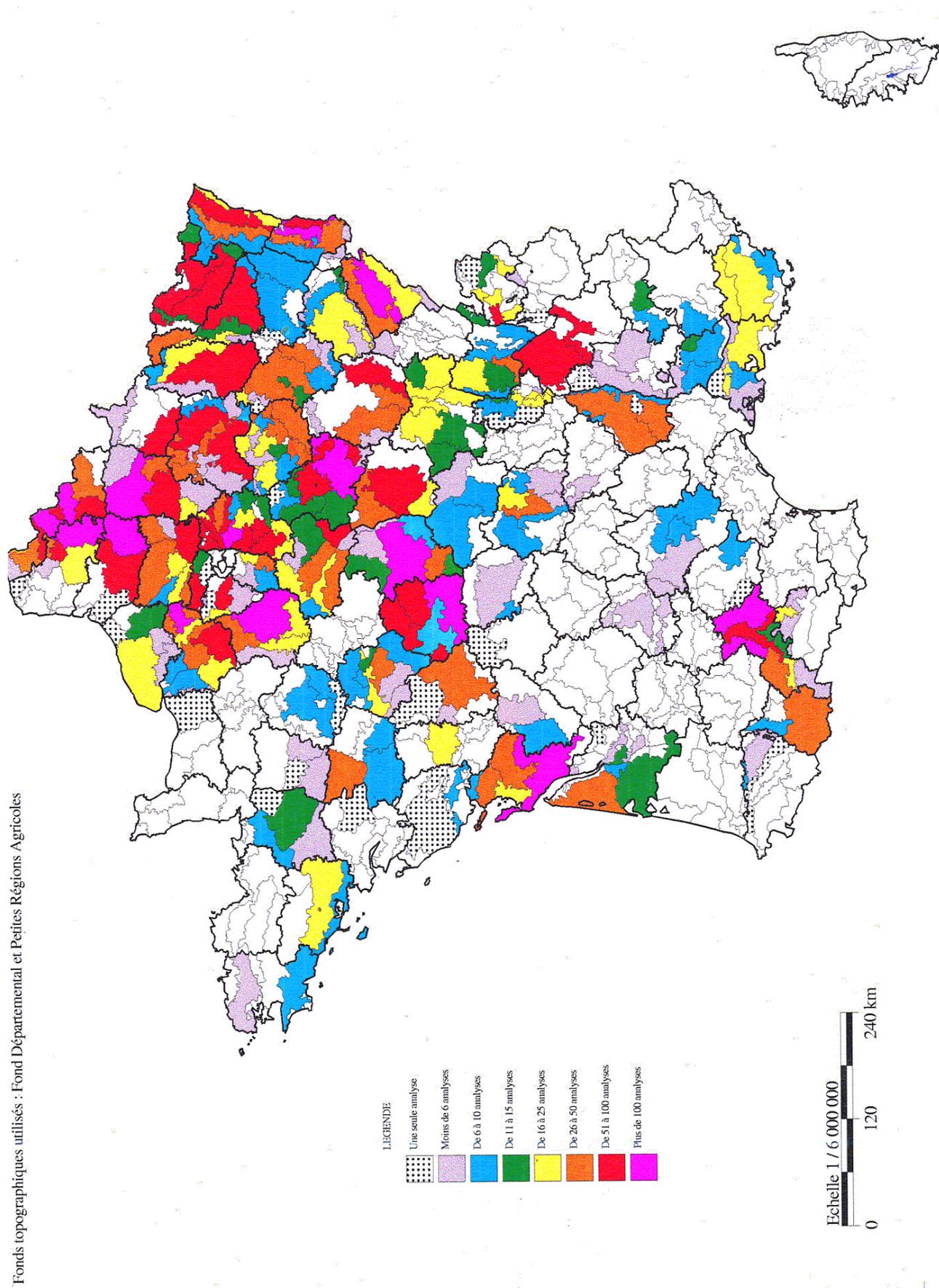


Fig. 8 - Localisation des échantillons collectés au cours du programme ADEME-INRA.

Les populations des deux programmes INRA-ASPITET et ADEME-INRA présentent de grandes dissemblances.

La population « INRA ASPITET » 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 senti - profonds, tous bien caractérisés aux plans pédologiques et géologiques.

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

3.2.1. Points positifs

- données très nombreuses (> 11.000 échantillons), assez bien réparties sur 86 départements (fig. 7) ;
- coordonnées géographiques des prélèvements connues pour 8530 échantillons ; les valeurs peuvent donc être positionnées précisément dans l'espace ;
- prélèvements réalisés sur une période de dix ans, permettant une photographie presque instantanée de l'état des sols ;
- prélèvements effectués **avant** les campagnes d'épandages de boues (du moins en théorie).

3.2.2. 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.

3.3. RÉSULTATS OBTENUS

Ce programme a réalisé 11 397 analyses sur 8 522 sites géoréférencés répartis sur 86 départements. Il regroupe environ 153 000 valeurs analytiques.

3.3.1. Utilisations effectives

Des traitements statistiques très simples ont été réalisés par département, par petite région naturelle ou au plan hexagonal (tabl. 4 ; fig. 10). Ils peuvent être cartographiés (voir par exemple la carte des teneurs moyennes en Cd (fig. 9) par petites régions agricoles (PRA).

Certaines corrélations entre deux paramètres apparaissent nettement malgré l'existence des contaminations anthropiques (par exemple la très forte relation nickel / chrome qui sont dues à la géochimie de la roche mère).

Les traitements spatiaux sont également d'un grand intérêt mais ils ne sont réalisables à moyenne échelle que si les coordonnées géographiques des points de prélèvement sont connues. A l'échelon national, la connaissance de la commune peut suffire. Il a été possible de dessiner des cartes départementales (fig. 11) ou régionales par méthodes géostatistiques (krigeage) mais elles sont souvent décevantes parce que trop tributaires de la densité de l'échantillonnage.

3.3.2. Utilisations potentielles

Les données ainsi acquises peuvent éventuellement être utilisées pour :

- exploitation de la base de donnée pour des statistiques par départements, « petites régions naturelles » ou autres unités spatiales ;
- aide à la fixation de valeurs seuils « sols » à l'échelon national ou européen ;
- cartographie des « métaux lourds » et de la matière organique dans les sols d'Europe (*"Heavy metal and organic matter contents in European soils"*) : projet de recherche envisagé à court terme par la DG XI de la CEE et l'Agence Fédérale pour l'Environnement d'Allemagne.

3.3.3. Disponibilités des données

Les données sont disponibles auprès de l'ADEME, centre d'Angers (Banque ANADEME).

Le rapport final présentant le programme est à paraître. Les dernières données collectées datent de 1997. Une mise à jour régulière de la base serait nécessaire.

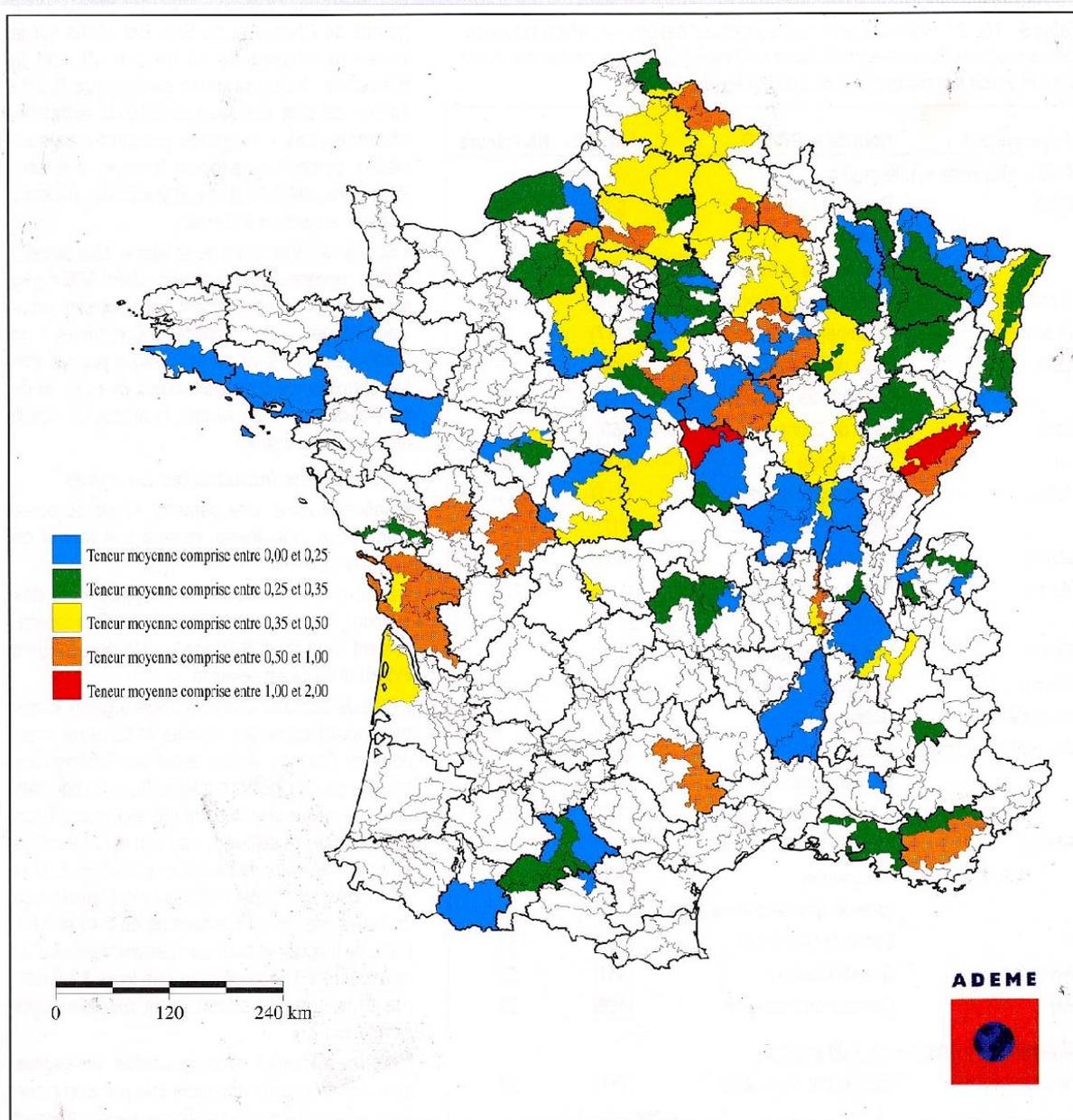


Fig. 9 - Carte des valeurs moyennes en Cd par petites régions agricoles (Programme ADEME / INRA).

Figure 2 - Population ADEME 1998. Histogramme du cadmium total.

Figure 2 - ADEME 1998 population. Total cadmium histogram.

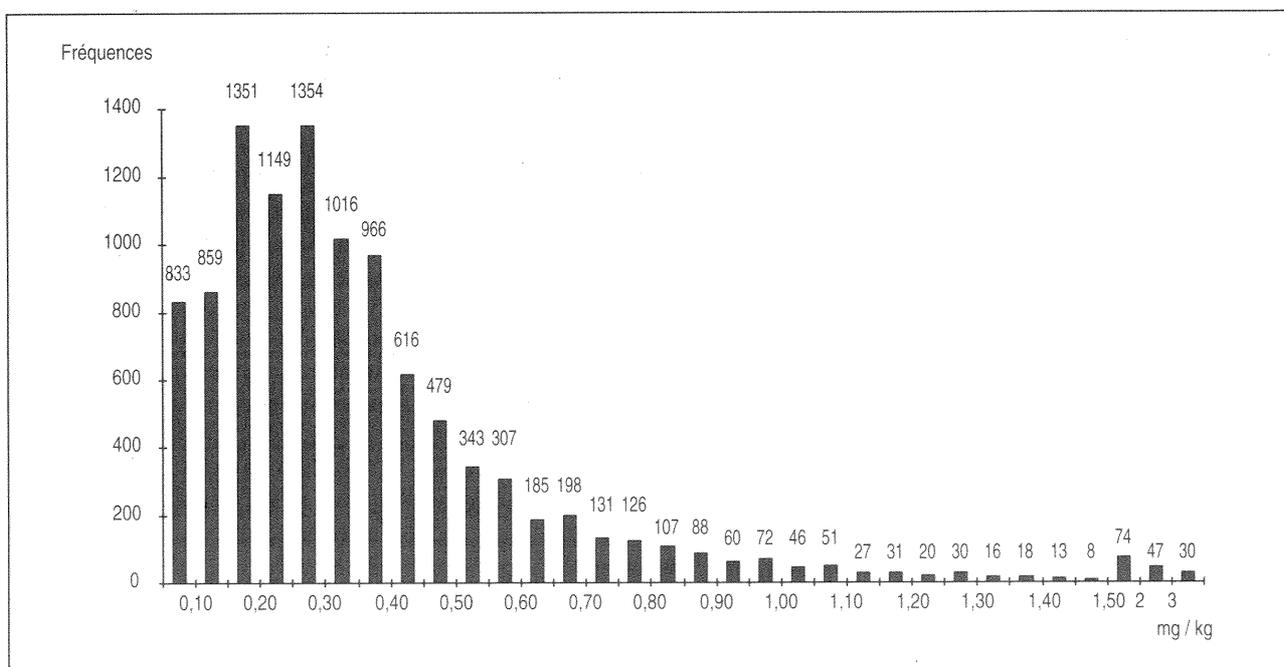


Fig. 10 - Histogramme du cadmium dans les horizons de surfaces de sols agricoles (11 000 échantillons - Programme ADEME / INRA).

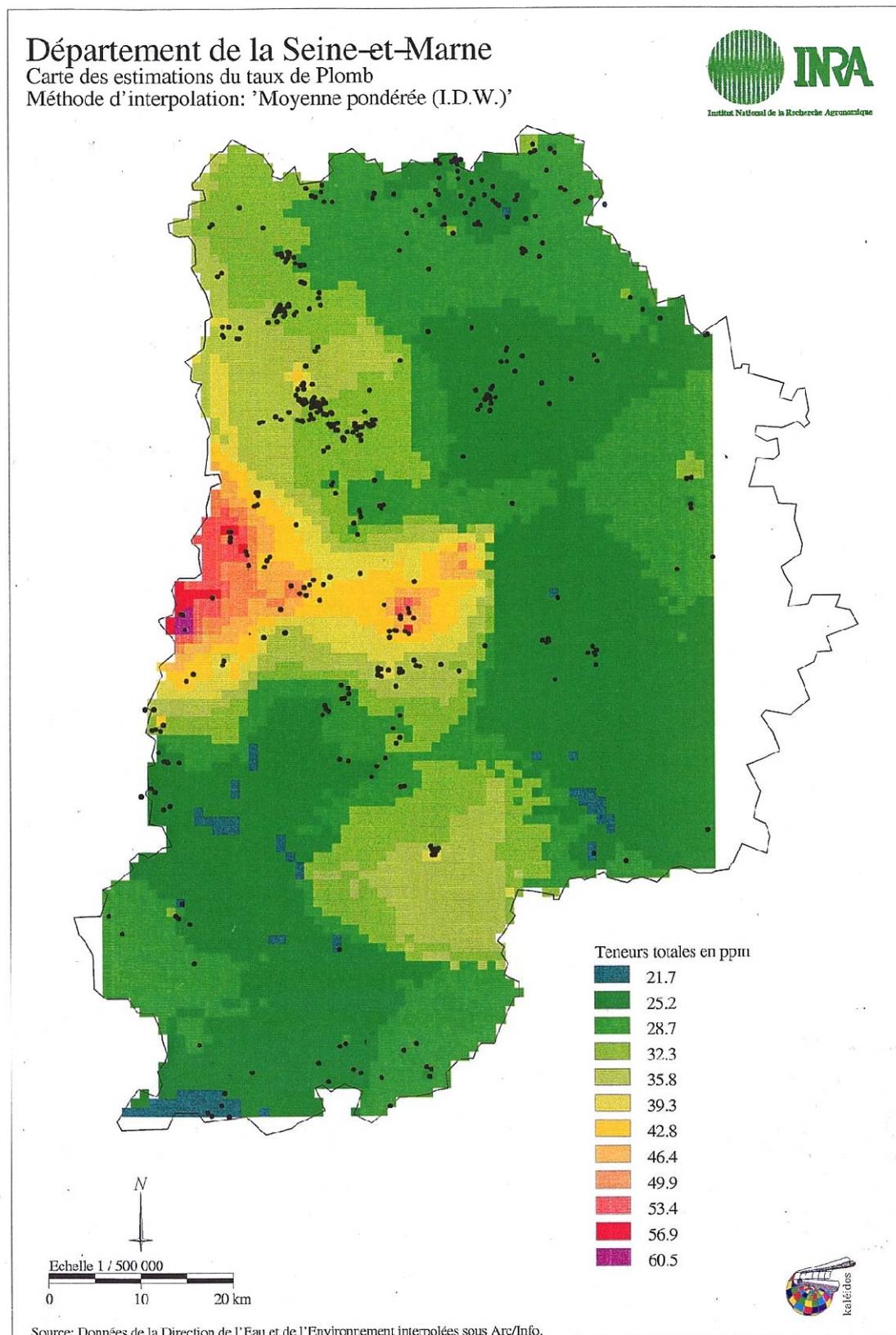


Fig. 11 - Estimation des concentrations en Pb en surface des sols agricoles de Seine et Marne (Baïze et Paquereau, 1997).

4. Les études spécifiques à l'échelle locale ou régionale

Il existe plusieurs études locales ou régionales ayant conduit à acquérir des données géochimiques à une échelle locale ou régionale, comme par exemple :

- le secteur de La Châtre (Indre) où l'approche typo-pédologique de l'INRA et celle du BRGM basée sur les techniques de géochimie d'exploration minière ont été comparées (programme MATE/GESSOL) ;
- la région Lorraine où, dans le cadre des programmes de requalification des friches industrielles, des analyses de certaines formations géologiques largement répandues dans la région ont été réalisées par le BRGM ;
- une étude de l'INRA des sols dans l'Avallonnais (département de l'Yonne) ;
- la constitution d'un référentiel pédo-géochimique pour la région Nord - Pas-de-Calais - par l'INRA et l'Institut Supérieur d'Agronomie de Lille.

4.1. LE TEST MÉTHODOLOGIQUE DE LA CHATRE (INDRE)

4.1.1. Les objectifs initiaux du programme

Il s'agit de :

- tester l'efficacité d'un échantillonnage à faible densité des sédiments de ruisseau et des limons d'inondation pour mesurer la dispersion naturelle des éléments chimiques (en ciblant plus spécialement les éléments écotoxiques) par l'érosion des bassins versants et réaliser une cartographie régionale des fonds géochimiques naturels ;
- améliorer la connaissance des transferts entre les signaux géochimiques observés en limons d'inondation prélevés à large maille et la géochimie des formations superficielles et du socle érodé en amont ;

Pour cela, il convenait de tester les trois types de prélèvements : un sédiment de lit vif prélevé dans les drainages majeurs couvrant des bassins de 4 à 7 km², des limons d'inondation à l'exutoire de bassins de 10 à 20 km² et les sols qui sont échantillonnés séparément par l'équipe de l'INRA. Un échantillonnage ponctuel des grandes unités lithologiques dominantes permet de préciser l'apport géochimique naturel issu des roches aux matériaux superficiels ;

- estimer l'évolution de la réponse géochimique (effet de lissage) suite à la faible densité utilisée (1 éch./6 km²) comparée à celle appliquée lors de l'échantillonnage des sédiments effectué en 1978 dans le cadre de l'Inventaire géochimique du Massif central (2 éch./km² - Wilhem, 1981, Barbier, 1979 ; Barbier, 1996) ;
- comparer les réponses géochimiques des sédiments et limons avec l'information géochimique obtenue par l'analyse des sols en amont réalisée par l'INRA. C'est dans

cette optique que l'on a sélectionné une fraction grossière (< 2mm) des sédiments broyée et attaquée suivant la méthode préconisée par le laboratoire de l'INRA ;

- montrer l'intérêt des méthodes nouvelles d'analyse multiélémentaire (ICP-MS) dont la sensibilité accrue permet une approche du fonds géochimique réel pour certains éléments écotoxiques comme Cd, Be, As, Sb, Hg, Se ;
- mesurer la distorsion des images géochimiques introduite par la dynamique alluviale par l'analyse des fluctuations géochimiques et des courbes granulométriques des deux types de sédiments ;
- estimer l'apport de la lithologie sur la géochimie des matériaux meubles hérités d'une évolution paléoclimatique complexe au voisinage d'une discordance majeure : la paléosurface permo-triassique ;
- évaluer l'intérêt de l'échantillonnage séquentiel des limons d'inondation en tant qu'enregistreurs naturels des polluants sédimentés depuis le début du siècle.

4.1.2. Les méthodes mises en oeuvre

a) Prélèvements

La zone test de La Châtre (550 km²) située aux sources de l'Indre est une région naturelle (essentiellement agricole) qui a été couverte par quatre méthodes d'échantillonnages appliquant leur densité propre pour une approche de la mesure des fonds géochimiques en une trentaine d'éléments chimiques.

Une des méthodes (mise en oeuvre par l'INRA) se base sur un découpage par familles pédo-géologique qui suit grosso modo la direction des contacts géologiques en majorité E-W. Les trois autres méthodes (mises en place par le BRGM) se basent sur un découpage par bassins versants, orientés en majorité N-S dans ce secteur (Salpeteur *et al.*, 1999).

Le plan d'échantillonnage s'établit comme suit :

- 120 sites de sols sont prélevés suivant deux horizons, répartis spatialement pour refléter 22 formations pédo-géologiques cartographiées sur ce secteur à une densité d'un site par 2 km² et tamisés à < 2mm ;
- 583 sols (colluviaux en fond de vallon) et 824 sédiments de petits drainages prélevés dans le cadre de l'Inventaire minier en 1978 à une densité de 2,5 éch./km² et tamisés à < 150μ ;
- 91 sédiments à large maille (1 éch./km²), tamisés à < 2mm ;
- 25 sites de limons d'inondation prélevés en majorité suivant deux séquences (inférieures et supérieures) et pour 6 d'entre eux en séquence continue sur un profil (fig. 12).

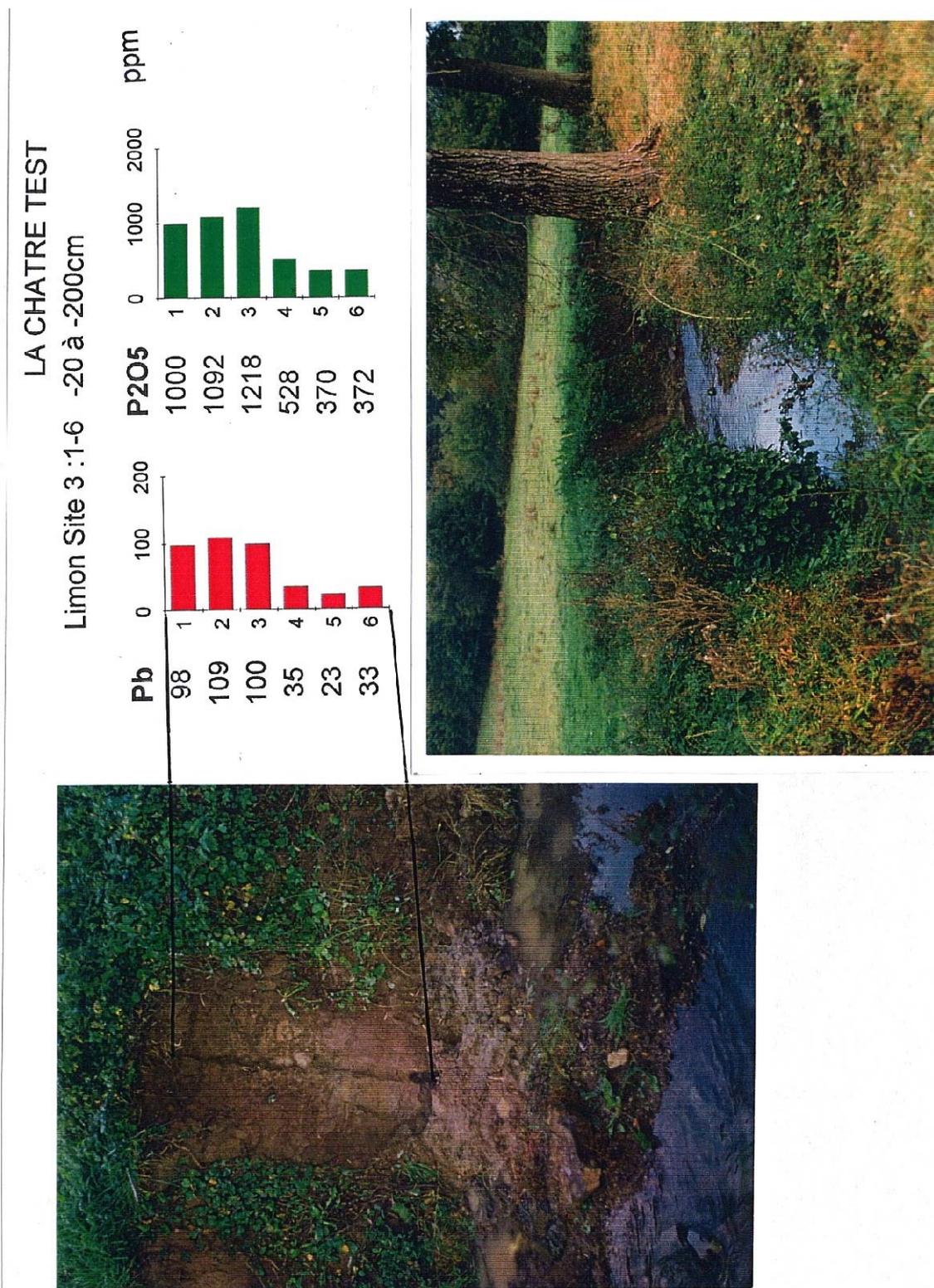


Fig. 12 - Exemple de séquence de limons échantillonné en séquence continue sur la vallée de l'Ignerais (La Chatre).

b) Attaque des échantillons et analyses

Le tableau 5 reprend les procédures employées.

	1978	1998	1998	1998	1998
Matériaux échantillonnés	Sédiments / Sols	Roches	Sols	Sédiments	Sédiments de berge
Nbre d'échantillons	824 / 583	29	235	91	25
Densité moyenne d'éch.	2,5 / km ²	1/19 km ²	1 / 2 km ²	1/ 5,5 km ²	1 / 22 km ²
Tamissage	150 µm	Aucun	2 mm	2 mm	Aucun
Extraction	HClO ₄ , HCl, HF	Partielle	HF, HClO ₄	HF, HClO ₄	HF, HClO ₄
Technique analytique	Emp. Spect.	ICP, ICPMS	AA	ICP, ICPMS	ICP, ICPMS
Nbre d'éléments recherchés	22	37	15	37	37

Tabl. 5 - Procédures employées dans le cadre du projet sur le secteur de La Châtre.

c) Anciennes données de l'inventaire minier

Les anciennes données de l'Inventaire correspondent à deux types de prélèvements : des sédiments de ruisseaux en lits vifs (60 %), des sols prélevés en fond de vallon (environ 20%) et des sols prélevés sur les interfluves (20 %). Ces échantillons tamisés à < 125 microns ont subi une double attaque : HClO₄ en bombe téflon à 170° puis HF-HCl à l'air libre. Ensuite, ils ont été dosés par spectromètre à plasma d'argon Spectramétrics (Boucetta et Fritche 1979) pour 22 éléments dont 15 sont réellement utilisables (voir § 2.1.2) significatifs. Le fluor a également été dosé par la méthode électrode spécifique.

d) Nouveaux prélèvements

Tous les nouveaux prélèvements effectués en 1998 ont fait l'objet d'un tamissage à < 2mm pour être comparables aux échantillons analysés par le laboratoire de l'INRA.

e) Analyse granulométrique et calcimétrie

L'échantillon séché (environ 1 kg) est défloculé puis lavé sur un tamis de 50 µ . La fraction supérieure à 50 µ est séchée et traitée par tamissage en voie sèche. La fraction inférieure à 50 µ est traitée au granulomètre par diffractométrie laser CILAS HR 850 dans la gamme 0,1-60 µm. La calcimétrie est effectuée avec un calcimètre Bernard suivant la procédure BRGM 089.

f) Dosages chimiques

• Procédure d'attaque chimique – Laboratoire INRA

- grillage dans creuset zirconium de 250 mg d'échantillon à 450°C pendant trois heures ;
- transfert du résidu dans un becher téflon par quelques ml d'eau déminéralisée ; ajout de 5 ml de HF et de 1,5 ml de HClO₄ puis évaporation à sec sur plaque chauffante ;
- pour dosage ultérieur par ICP : reprise à chaud par 7ml de HCl, ajout de 1,5 g de soude et enfiolage à 50 ml ;
- pour dosage ultérieur par ICP/MS : reprise à chaud par 2,5 ml de HNO₃ et enfiolage à 50 ml.

Il faut souligner que l'utilisation d'HF et de soude pour ce type d'attaque exclut le dosage du sodium, de la silice et du bore.

• Attaques spécifiques

- mercure: mise en solution de 1 g d'échantillon par attaque en milieu acide nitrique en réacteur fermé puis enfiolage à 50 ml ;
- fluor : mise en solution de 1 g d'échantillon par frittage (3 g de peroxyde de sodium, 1h à 450°C). Ajout d'une solution tampon citrate pour ajuster à pH 7 et dosage par potentiométrie,
- carbone organique : application de la norme AFNOR NF P 94-055 (déc.1993).

Dosages

Les dosages ont été faits par ICP - AES pour 8 éléments majeurs et 24 éléments traces et ICP-MS pour 12 éléments traces (11 dont les limites de détection en ICP étaient trop élevées et le sélénium). Le fluor est dosé par potentiométrie, le mercure par spectrométrie d'absorption atomique et le carbone organique par méthode bichromate.

4.1.3. Principaux résultats

Ils sont de divers ordres.

- Les calculs des moyennes géométriques des différents éléments analysés (tabl. 6) reflètent les fonds géochimiques en sols, en sédiments à forte densité d'échantillonnage, en sédiments à faible densité d'échantillonnage et en limons pour la région considérée ;
- Une cartographie des principales familles pédo-géologiques classées par médiane croissante en différents éléments a été réalisée (ex. : fig.13) ;
- Une cartographie des différents bassins par gamme de teneurs croissantes a été effectuée à des densités variant de 2,5 échantillons par km² à 1 échantillon par 5,5 km² et un échantillon par 22 km² (cf. fig. 14 et 15) ;

- Une chronostratigraphie des dépôts alluviaux a été réalisée sur 6 séquences de limons complètes et permet de mesurer l'effet du recul des sources sur le signal géochimique des limons (fig. 12) pendant le dernier millénaire ;
- De fortes anomalies en métaux (Pb, Zn, Be, Li, As) ont été mises en évidence, liées à des minéralisations naturelles du socle (pegmatites, leucogranites et niveaux graphiteux) ou de la couverture (arkoses du Trias, fig. 16). L'existence de ces concentrations naturelles en éléments traces dans certains niveaux stratigraphiques est à prendre en compte dans toute approche environnementale.

Mis à part le Cu, le Fe et le Mn, la gamme de variation de tous les éléments traces décroît des sols vers les sédiments et les limons, traduisant une homogénéisation et une dilution croissante des matériaux superficiels par les mécanismes d'érosion au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source primaire vers le bassin aval.

Pour certains éléments traces (Fe, Mn, P, Cu, Zn, Cr, Ni, Hg), on observe que la moyenne géométrique des limons est très proche de celle des sols prélevés selon la méthode INRA (fig.16,17). Si l'on admet ces valeurs comme représentatives du fonds géochimique naturel, on peut conclure que l'échantillonnage des alluvions à large maille permet d'estimer les valeurs de référence du fonds géochimique naturel pour ces éléments. Ces résultats sont concordants avec les observations réalisées à partir des données de l'inventaire minier national.

En outre, une meilleure représentativité des sédiments et limons par rapport aux sols qui sont des milieux plus hétérogènes est mise en évidence. L'étude géostatistique confirme une meilleure analogie entre la géochimie des limons et celle des sédiments fins et des sols prélevés à forte densité.

Le tableau 7 résume les principales conclusions du test méthodologique de La Châtre.

4.2. RÉFÉRENTIEL GÉOCHIMIQUE DES SOLS AUTOUR DES FRICHES INDUSTRIELLES DE LA RÉGION LORRAINE

4.2.1. Problématique et objectifs de l'étude

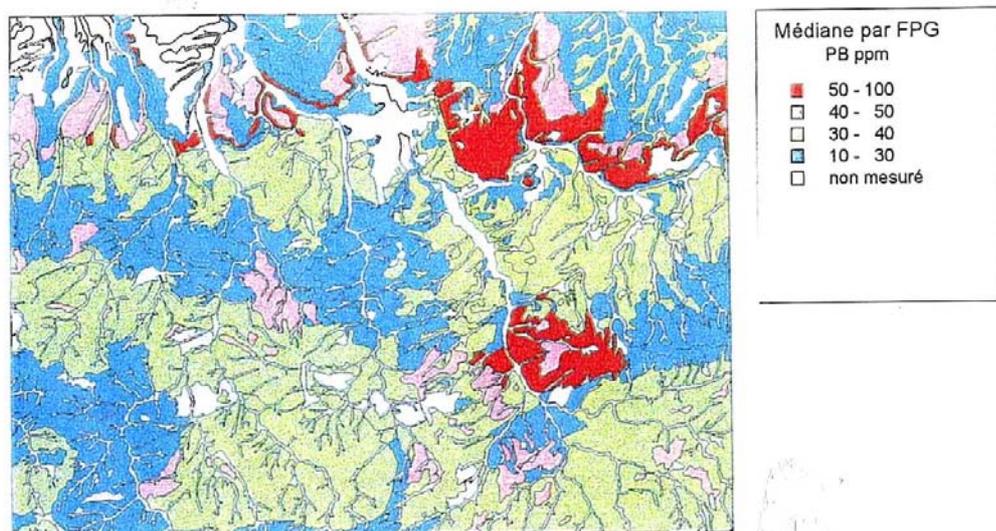
Dans le cadre de la réutilisation d'anciens sites industriels en vue de nouvelles activités, il est nécessaire d'établir au préalable à des travaux de restructuration, un diagnostic de qualité des sols en se référant à certaines normes. Ces normes peuvent être comparées à des paramètres mis en évidence dans les sols naturels de la région considérée ou à des valeurs préétablies en vigueur dans d'autres pays tels que les Pays-Bas, l'Allemagne et le Canada (Québec) (tabl. 8).

	Fe ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	As	Cd
	%	%	%	ppm						
Roches	1,89	0,068	0,091	12	20	47	28	9	12	0,1
INRA sols (total)	3,03	0,058	0,096	19	32	80	57	25	18	0,1
Sols en surface (prél. méthode INRA)	2,61	0,089	0,137	18	39	79	51	23	18	0,2
Sols en profondeur (prél. méthode INRA)	3,48	0,041	0,071	20	27	82	63	27	19	0,1
Sols à 40-50 cm prof. (prél. méthode BRGM)	4,72	0,184	0,212	22	62	105	55	25	53	1,1
Sédiments en lit vif - 1999 (prél. méthode BRGM)	3,95	0,119	0,174	18	50	95	43	23	54	1,3
Sédiments en lit vif - 1997 (prél. méthode BRGM)	2,69	0,102	0,101	11	33	65	26	15	10	0,3
Limons d'inondation en surface	3,46	0,111	0,106	20	41	78	52	25	12	0,4
Limons d'inondation en profondeur	3,14	0,075	0,094	18	41	70	46	22	10	0,3

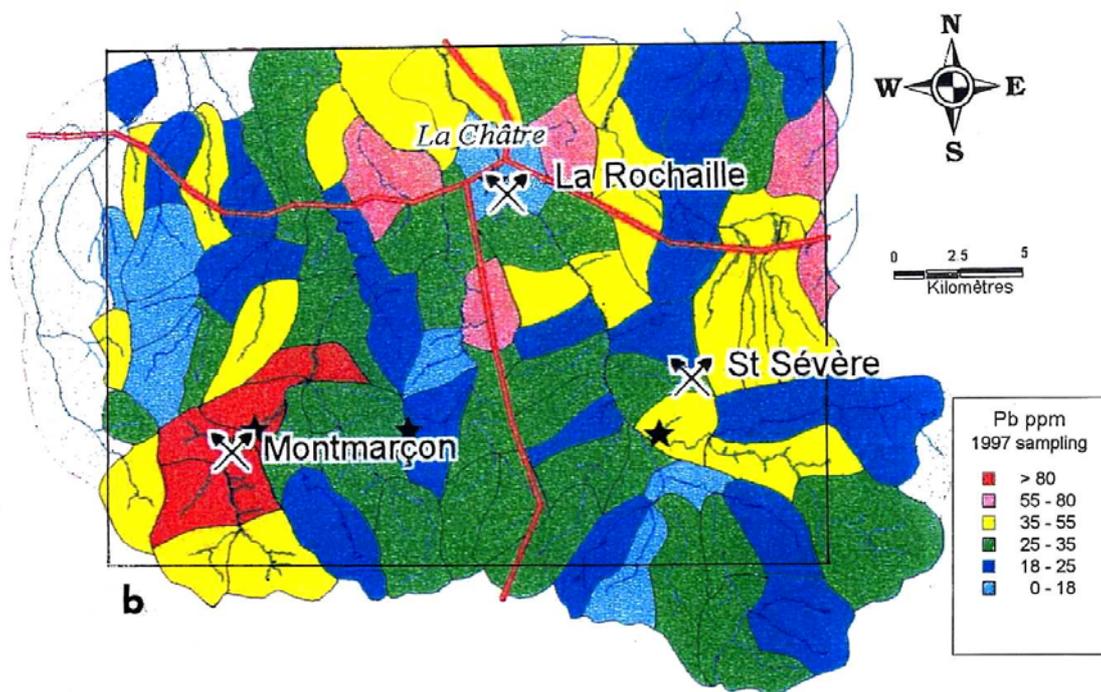
Tabl. 6 - Moyennes géométriques des concentrations analysées sur l'ensemble du secteur de La Châtre.

Méthode	Milieu prélevé	Avantages	Inconvénients	Utilité
INRA	Sols classés en 22FPG	<ul style="list-style-type: none"> substrat des cultures découpage par horizon impact du substrat rocheux impact atmosphérique 	<ul style="list-style-type: none"> milieu hétérogène représentativité si N élevé perturbations anthropiques fréquentes en surface paléosols 	<ul style="list-style-type: none"> diagnostic à la parcelle pollution localisée apport atmosphérique (humus)
BRGM	sédiments actifs	<ul style="list-style-type: none"> matériel homogène intégration de plusieurs FPG par bassin 	<ul style="list-style-type: none"> perturbations : régime hydrodynamique, équilibres eaux-sédiments, apport assainissement 	<ul style="list-style-type: none"> mesure de la pollution à l'échelle d'une vallée (1-50 km²)
	limons d'inondation	<ul style="list-style-type: none"> matériel très homogène forte composante argileuse intégrateur d'une longue période (1500-5000 ans) 	<ul style="list-style-type: none"> suppose bassin stable mal préservés en zone de relief jeune 	<ul style="list-style-type: none"> mesure d'une pollution régionale (100-1000 km²) évaluer la dérive/état zéro périodicité des crues

Tabl. 7 - Bilan des différentes approches du fonds géochimique dans la région de La Châtre.



a



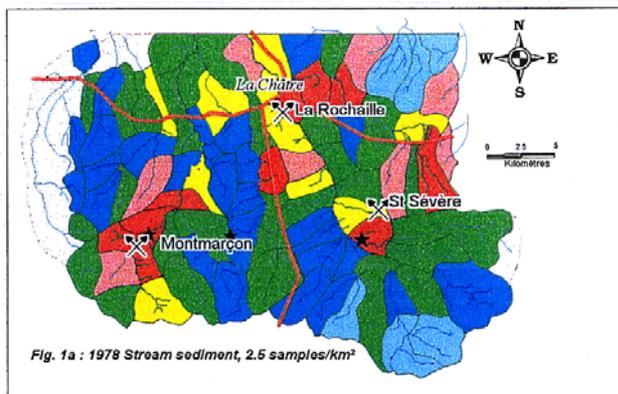
b

Fig. 13 - Comparaison de la répartition de Pb à partir de la cartographie des formations pédo-géochimiques (a) et de l'échantillonnage de sédiments par bassin versant (b).

Plomb

Pb ppm
1978 sampling

- > 115
- 80 - 115
- 65 - 80
- 45 - 65
- 30 - 45
- 0 - 30



Pb ppm
1997 sampling

- > 80
- 55 - 80
- 35 - 55
- 25 - 35
- 18 - 25
- 0 - 18

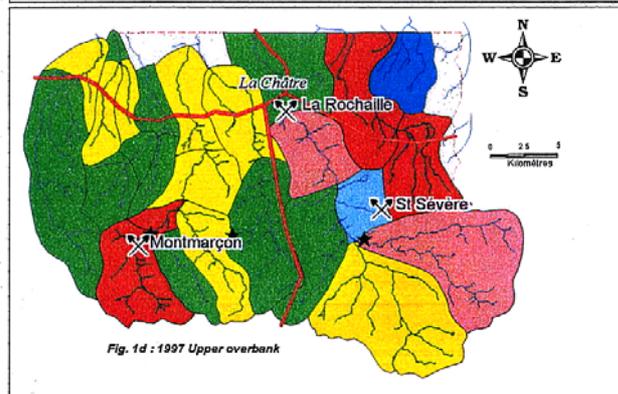
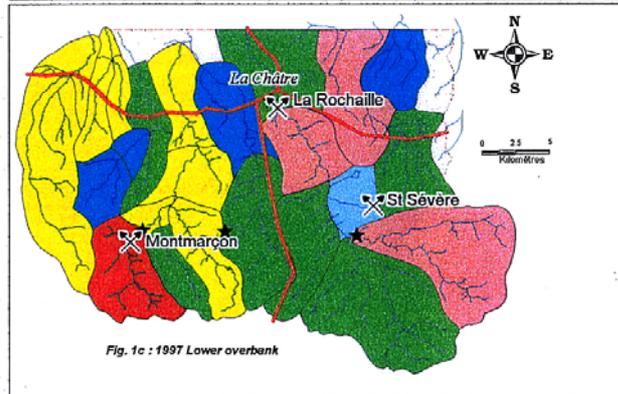
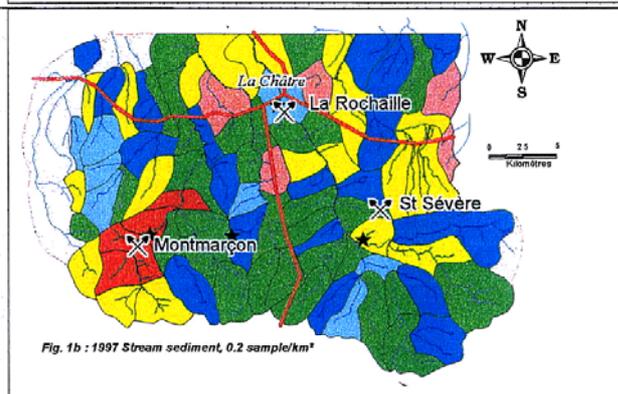


Fig. 14 - Comparaison des bassins anomaux en Pb prélevés à des époques et des densités différentes (secteur de La Châtre).

Arsenic

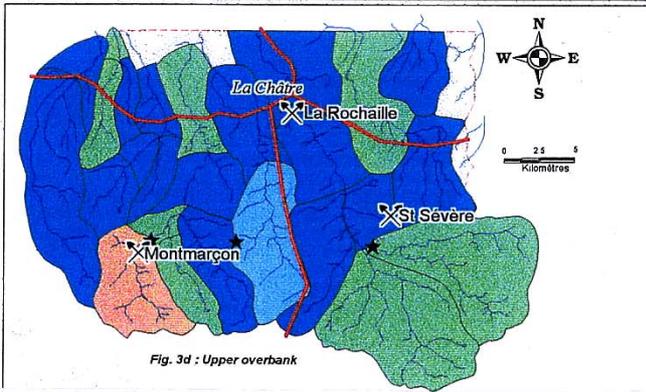
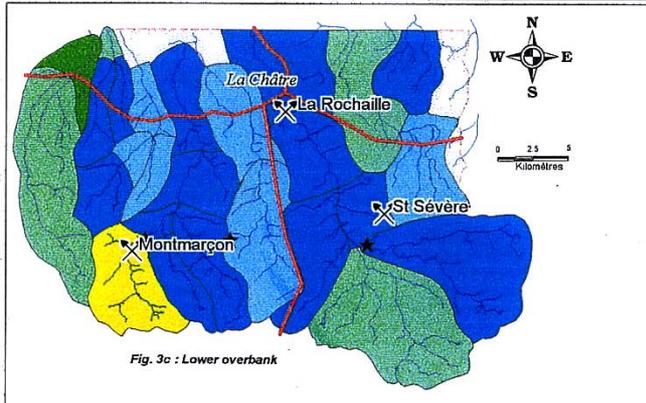
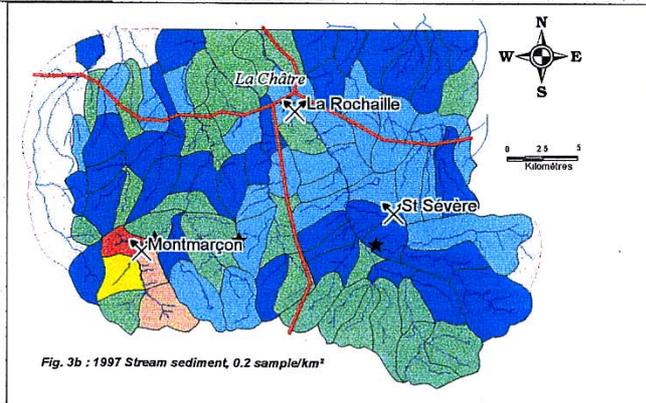
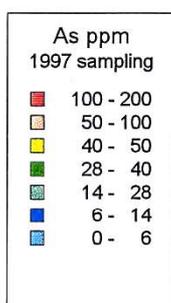
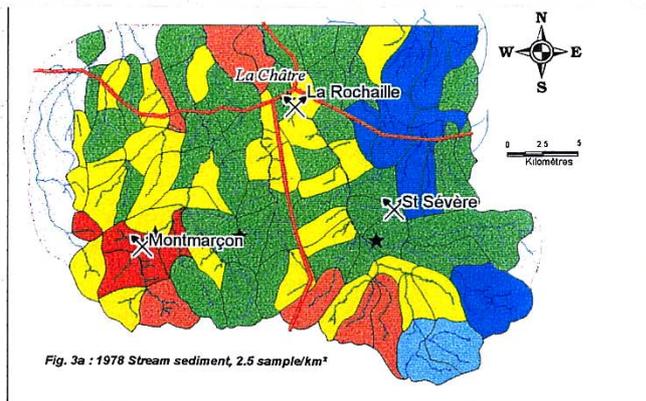
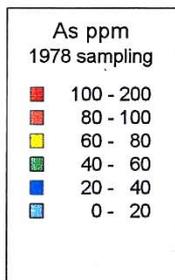


Fig. 15 - Comparaison des bassins anomaux en As prélevés à des époques et des densités différentes (secteur de La Châtre).

		Pb Entre 0 et 180 ppm					
LIMONS	LITHO	Roche	Inra sol prof	Inra sol surf	Invent Sol	Invent Sed	Sedim LM
		HLI		1	4		
JURAS.	TOA				2	3	2
	PLI	1	6	7		4	
	SLM		8	8	14	29	2
	SIK	3	5	7	19	13	2
	HEK		8	6	27	5	1
TRIAS	ALC		9	2			
	TRS	5	14	11	53	61	2
	TQC	1	7	2	3		
	TAM		6	6	10	14	
	AMP	3	6	7		25	1
HERCYNIE	MIC	1	9	6	3	103	4
	MIG		2	2	2	14	1
	MCSCG					5	
	QUA	2		2	3	15	
	QG	1			2	6	
	LEP	3	5	4	6	62	1
	GNE	4	13	14	13	283	4
	ORT	1	8	2	7	57	
	MGM	1	4	3	6	76	4
	GRA	2	5	8	0	122	2

Fig. 16 - Répartition des teneurs moyennes en Pb dans les roches, sols et limons d'inondation (secteur de La Châtre).

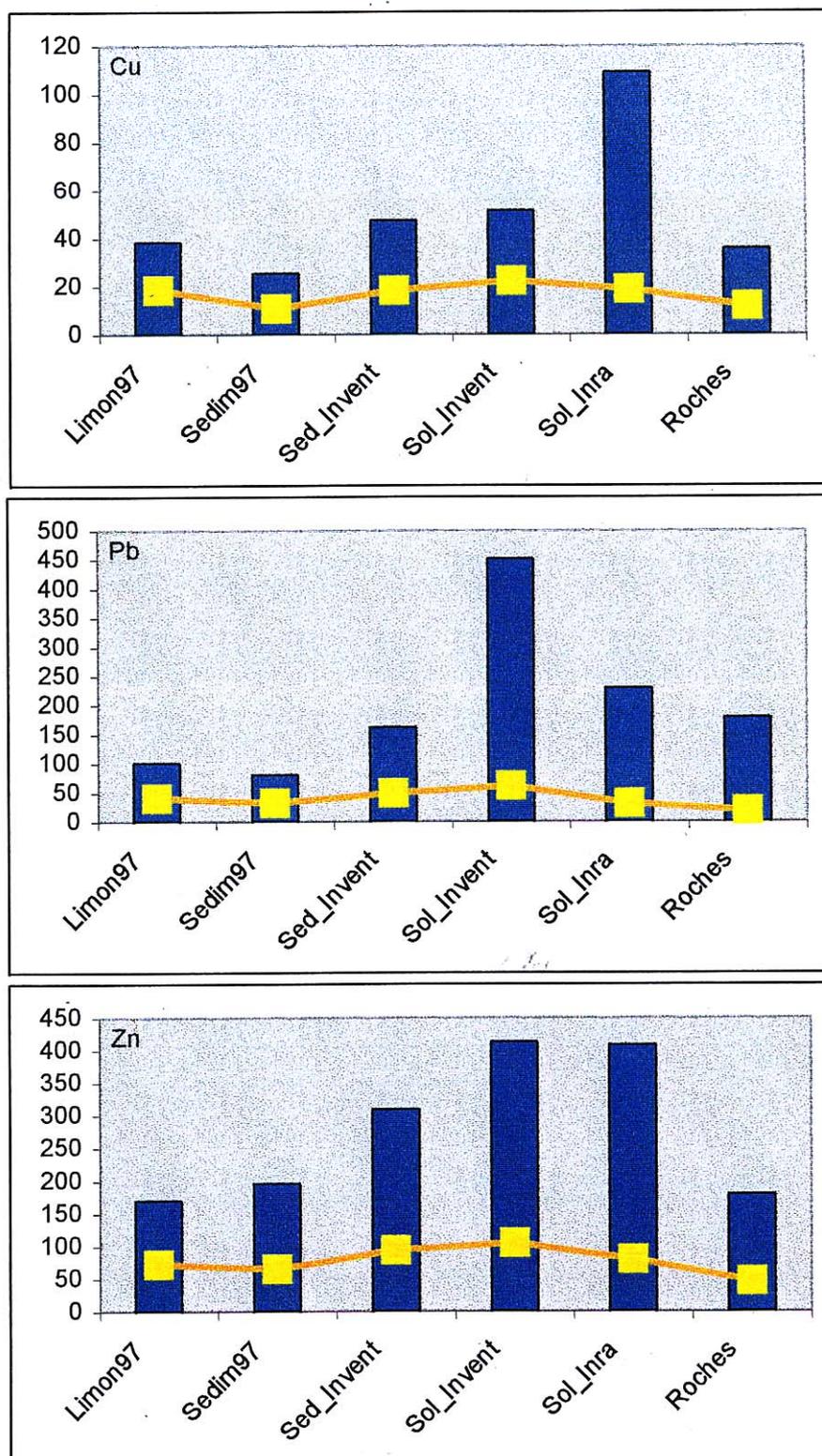


Fig. 17- Gamme de teneurs en Cu, Pb et Zn et moyenne géométrique pour les différents milieux échantillonnés (secteur de La Châtre).

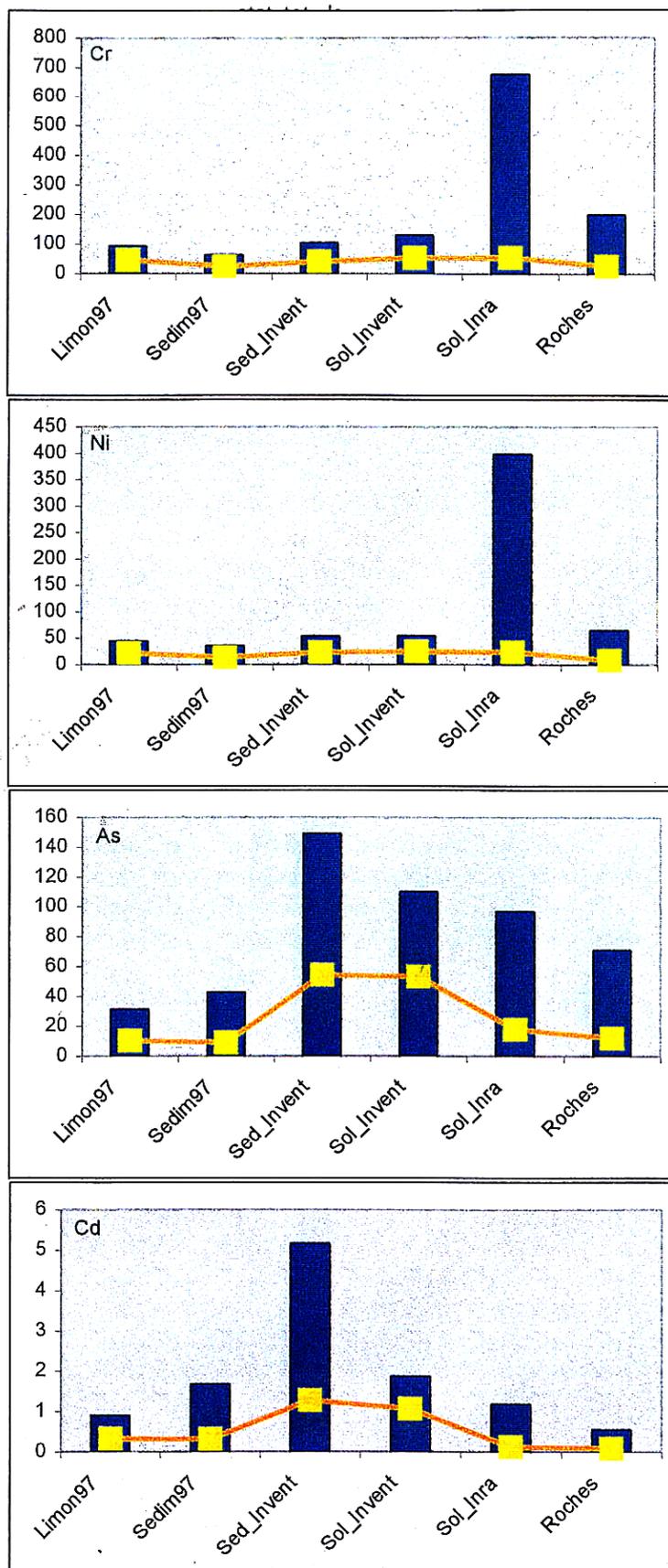


Fig. 18 - Gamme de teneurs en Cr, Ni, As et Cd et moyenne géométrique pour les différents milieux échantillonnés (secteur de La Châtre).

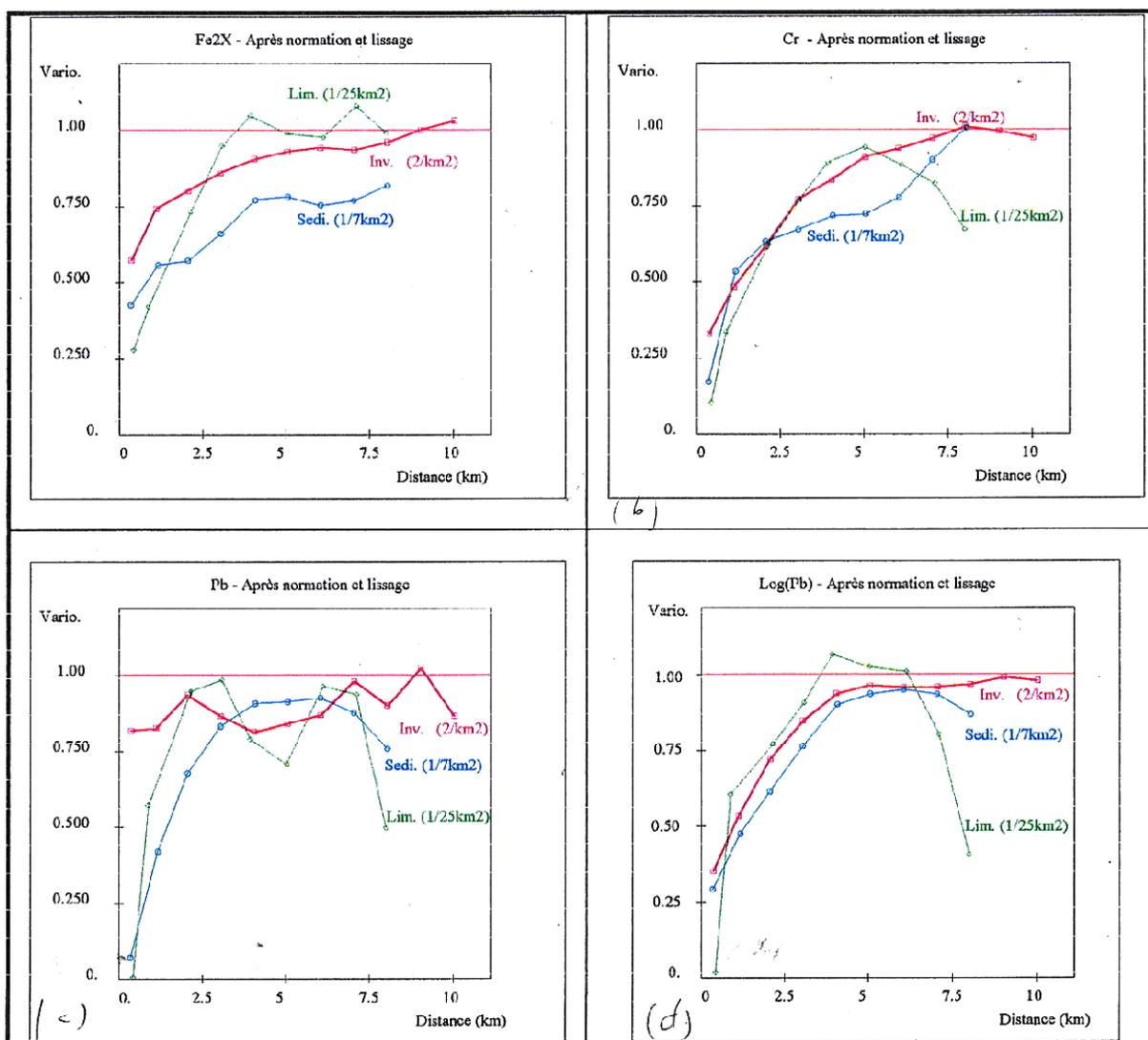


Fig. 19 - Comparaison des variogrammes normés pour Fe_2O_3 , Cr, Pb, des trois milieux échantillonnés (secteur de La Châtre).

En Lorraine, l'application de telles valeurs guides, pour juger du degré de contamination d'un sol, n'est pas possible car certains sols ont naturellement des teneurs élevées en certains métaux ou métalloïdes. Par contre, il est probable que les terrains n'ayant supporté aucune activité polluante, contiennent très peu de produits « artificiels » tels que HAP, PCB et autres polluants organiques de synthèse.

Il apparaît donc nécessaire de resituer les analyses des sols des friches industrielles (effectuées dans le cadre d'un diagnostic) en analysant les terrains voisins n'ayant pas supporté ces activités. C'est pourquoi il a été décidé de mener une étude à caractère méthodologique ayant pour but d'établir un référentiel géochimique autour de certaines friches industrielles caractéristiques de la Lorraine de par la nature de leur substrat géologique et en tenant compte du milieu urbain environnant.

Cette étude a été menée et financée conjointement par le BRGM Lorraine, l'Etablissement public de la métropole lorraine (EPML), les Houillères du bassin de Lorraine (HBL), Unimétal et Bail Industrie (Chaussidon, 1992).

4.2.2. Les sites choisis

Les sept sites sélectionnés dans le cadre de cette étude sont caractéristiques de la Lorraine, d'une part par la nature de leur substrat géologique, d'autre part, par la nature de leurs activités industrielles liées à la sidérurgie ou au charbon.

Ces sites forment trois groupes situés respectivement :

1. dans des vallées occupées par la sidérurgie et les mines de fer, dans les marnes, calcaires et calcaires ferrifères du Jurassique moyen et inférieur (sites de Homécourt, Longwy, Micheville) ;
2. dans la plaine alluviale de la Moselle sur les mêmes terrains géologiques que les sites précédents (sites de Custines, Thionville) ;
3. dans le bassin houiller, sur les terrains gréseux et carbonatés du Trias inférieur et moyen (sites de Forbach, Grosbliederstroff).

	Valeurs guides néerlandaises (ppm)			Critères de pollution - Québec (ppm)			Recommandations allemandes par usage						
	A	B	C	A	B	C	Zones de loisirs (ppm)			Zones industrielles (ppm)			
							BW I	BW II	BW III	BW I	BW II	BW III	
1 - Métaux													
Arsenic (As)	20	30	50	10	30	50	20	40	80	20	50	200	
Cadmium (Cd)	1	5	20	1,5	50	20	1	4	15	1	10	20	
Chrome total (Cr)	100	250	800	75	250	800	50	150	600	50	200	800	
Cobalt (Co)	20	50	300	15	50	300	-	-	-	-	-	-	
Cuivre (Cu)	50	100	500	50	100	500	50	200	600	50	500	2000	
Mercure (Hg)	0,5	2	10	0,2	2	10	0,5	5	15	0,5	10	50	
Nickel (Ni)	50	100	500	50	100	500	40	100	250	40	200	500	
Plomb (Pb)	50	150	600	50	200	600	100	500	2000	100	1000	2000	
Vanadium (V)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zinc (Zn)	200	500	3000	100	500	1500	150	1000	3000	150	1000	3000	
2 - Polluants inorganiques													
Cyanures totaux (CN)	5	50	500	5	50	500	-	-	-	-	-	-	
3 - Composés aromatiques													
Indice phénols	0,02	1	10	0,1	1	10	-	-	-	-	-	-	
4 - Composés polycycliques aromatiques													
Fluoranthène	0,1	10	100	0,1	10	100	-	-	-	-	-	-	
Benzo (b) fluoranthène	-	-	-	0,1	1	10	-	-	-	-	-	-	
Benzo (k) fluoranthène	-	-	-	0,1	1	10	-	-	-	-	-	-	
Benzo (a) pyrène	0,05	1	10	0,1	1	10	1	3	6	1	5	10	
Benzo (ghi) pérylène	-	-	-				-	-	-	-	-	-	
Indéno (1,2,3,c,c) pyrène	-	-	-										
HAP totaux	1	20	200	1	20	200	-	-	-	-	-	-	
5 - Composés organiques chlorés													
PCB totaux	0,05	1	10	0,1	1	10	0,2	3	10	0,2	5	10	
6 - Autres composés organiques													
Indice CH2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

- signifie que les valeurs ne sont pas connues dans la référence considérée

Tabl. 8 - État comparatif des références « qualités des sols » en Hollande, au Québec et en Allemagne. Valeurs exprimées en ppm (mg/kg de matières sèches).

(A, BWI) contamination nulle ou faible, (B, BWII) contamination moyenne, (C, BWIII) contamination forte.

4.2.3. Les moyens mis en œuvre

Les échantillons de sols ont été prélevés à trois profondeurs dans 60 puits implantés sur les différents affleurements géologiques.

Un total de 189 échantillons de sols a fait l'objet des analyses suivantes :

- 34 éléments dont les principaux métaux lourds (As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb) dosés par ICP - AES (BRGM, Orléans) ;
- Hg, indices de phénols, indices CH₂, cyanures totaux (Laboratoire de Pathologie Végétale, Essey-les-Nancy).

Parmi ces échantillons, 20 ont été analysés pour 6 HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et les PCB (polychlorobiphényles) au BRGM.

Les résultats analytiques peuvent être consultés dans les rapports BRGM référencés :

- R 35005 LOR 4S 92 pour Unimétal ;
- R 35006 LOR 4S 92 pour Bail Industrie ;
- R 35007 LOR 4S 92 pour EPML ;
- R 35008 LOR 4S 92 pour les HBL.

L'ensemble des résultats obtenus a été interprété par détermination des paramètres statistiques de distribution des teneurs des éléments et substances dosés et par l'établissement d'histogramme de fréquence des paramètres analysés. Ces calculs statistiques et ces histogrammes ont porté (1) sur chacun des trois groupes de sites, (2) pour chaque groupe de site, sur les principaux substrats géologiques existants.

4.2.4. Résultats obtenus

a) Résultats par secteur (tabl. 9, fig. 20)

Il ressort en premier lieu de cette étude que le secteur du bassin houiller montre les teneurs moyennes et les maxima les plus faibles (sauf pour Cd et les cyanures totaux) particulièrement pour les PCB et HAP. Pour les métaux lourds, ceci peut s'expliquer par la nature géologique du secteur occupé principalement par des formations gréseuses à teneurs relativement faibles en métaux.

Ensuite, le groupe des vallées ferrifères se caractérise par de fortes valeurs en As (fait connu avec le minerai de fer). Il est pour le reste comparable au secteur de la plaine alluviale de la Moselle.

b) Comparaison des teneurs maximales avec les niveaux guides allemands

Le tableau 10 comparant les recommandations allemandes BW1, II et III en zone industrielle (ou à défaut celles du Québec) et les teneurs maximales du tableau 9, montre notamment que :

- la plupart des teneurs en Lorraine sont entre les niveaux I et II ;
- celles inférieures au niveau I correspondent aux PCB, Benzo (a) pyrène et indice CH2 ;
- celles supérieures à BW II sont pour As qui atteint le niveau BW III.

c) Comparaison entre les différentes couches géologiques rencontrées

En prenant en compte comme paramètre de comparaison les teneurs maximales des éléments et des substances dosés (tabl. 11), on remarque que :

- les alluvions et les limons de surface sont les formations présentant le maximum d'éléments à fortes teneurs : As, Cr, Zn et, dans une moindre mesure, Cd et Pb ;
- les alluvions anciennes (vallée de la Moselle) viennent ensuite avec Zn, Pb, Cd et indice CH2 ;
- le Bajocien calcaire présente des maxima élevés en As et Cr ;
- le Charmoutien et les grès bigarrés renferment des maxima élevés, respectivement en Zn et en Cd.

	Vallées ferrifères Homécourt – Longwy – Micheville		Plaine alluviale de la Moselle Custines - Thionville		Bassin houiller Forbach - Grosbliederstroff	
	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
	Nombre d'échantillons	90		41		59
Arsenic (As)	40	200	20	50	20	50
Cadmium	2	5	2	5	5	10
Chrome total (Cr)	80	500	75	200	30	200
Cobalt (Co)	15	50	15	50	10	20
Cuivre (Cu)	15	50	30	100	20	50
Indice CH2	10	20	15	50	10	50
Cyanures totaux (CN)	10	20	10	20	10	50
Mercure (Hg)	0,5	2	1	2	0,5	1
Nichel (Ni)	30	100	40	100	20	100
Plomb (Pb)	25	100	30	100	20	50
Indice phénols	0,1	0,2	0,1	0,5	0,1	0,2
Vanadium (V)	160	500	100	500	35	200
Zinc (Zn)	120	500	120	500	60	200
Nombre d'échantillons	11		3		6	
PCB	0,09	0,15	0,03	0,08	0,01	0,02
Fluoranthène	0,24	3	0,33	3,0	0,12	0,7
Benzo (b) fluoranthène	0,14	1	0,17	1,0	0,06	0,4
Benzo (k) fluoranthène	0,09	1	0,10	0,6	0,04	0,2
Benzo (a) pyrène	0,17	0,5	0,09	0,15	0,08	0,6
Benzo (ghi) pérylène	0,11	0,5	0,18	0,6	0,10	0,3
Indéno (1,2,3,c,d) pyrène	0,13	1	0,17	0,8	0,11	0,3
HAP totaux	1,0	7	1,2	6,2	0,5	2,5

Nota : toutes les valeurs sont exprimées en ppm (mg/kg de matière sèche)

- la moyenne est géométrique et arrondie à la 1/2 dizaine supérieure pour $n > 20$;
- le maximum est à 95% (ou maximum si $n < 20$) et arrondi à la borne supérieure de l'intervalle de concentration correspondant.

Tabl. 9 - Résultats statistiques pour chaque groupe de sites (Lorraine).

Eléments	Niveaux guides allemands			Vallées ferrifères	Plaine all. Moselle	Bassin houiller
	BW 1	BW 2	BW 3	Maximum	Maximum	Maximum
Arsenic (As)	20	50	200	200	50	50
Cadmium (Cd)	1	10	20	5	5	10
Chrome total (Cr)	50	200	800	500	200	200
Cobalt (Co) (Québec)	(20)	(50)	(300)	50	50	20
Cuivre (Cu)	50	500	2000	50	100	50
Indice CH2 (Québec)*	(100)	(1000)	(5000)	20	50	50
Cyanures totaux (CN) (Québec)	(5)	(50)	(500)	20	20	50
Mercure (Hg)	0,5	10	50	2	2	1
Nickel (Ni)	40	200	500	100	100	100
Plomb (Pb)	100	1000	2000	100	100	50
Indice phénols	0,1	1,0	10	0,2	0,5	0,2
Zinc (Zn)	150	1000	3000	500	500	200
PCB	0,2	5	15	0,15	0,08	0,02
Benzo (a) pyrène	1	5	10	0,5	0,15	0,6
HAP totaux (Québec)	(1)	(20)	(200)	7,0	6,2	2,5

* Huiles minérales et graisses

Nota : toutes les valeurs sont exprimées en ppm (mg/kg de matières sèches)

Tabl. 10 - Comparaison des niveaux guides allemands et des teneurs maximales des secteurs lorrains.

Fonds géochimique naturel - État des connaissances à l'échelle nationale

	Terre végétale Remblais	Alluvions et limons de surface	Alluvions anciennes	BAJOCIEN Marnes	BAJOCIEN Calcaires	AALENIEN	TOARCIEN	CHAR-MOUTHIEEN	MUSCHEL-KALK	GRES BIGARRES
Arsenic	200	200	< 20	100	200	200	200	50	< 20	< 20
Cadmium (Cd)	2	5	5	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	10
Chrome total (Cr)	500	500	200	200	500	200	200	200	100	50
Cobalt (Co)	50	50	50	50	50	50	50	50	20	20
Cuivre (Cu)	50	50	50	50	20	20	50	100	50	50
Indice CH2	20	20	50	20	20	20	50	20	20	50
Cyanures totaux (CN)	20	20	50	30	20	10	50	10	20	50
Mercure (Hg)	1	2	2	5	2	1	1	2	1	1
Nichel (Ni)	100	100	100	100	50	100	100	100	100	50
Plomb (Pb)	100	100	100	50	20	100	100	50	50	50
Indice phénols	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5
Zinc (Zn)	500	500	500	200	200	500	200	500	100	200

Nota : toutes les valeurs sont exprimées en ppm (mg/kg de matières sèches)

Tabl. 11 - Teneurs maximales par couches géologiques.

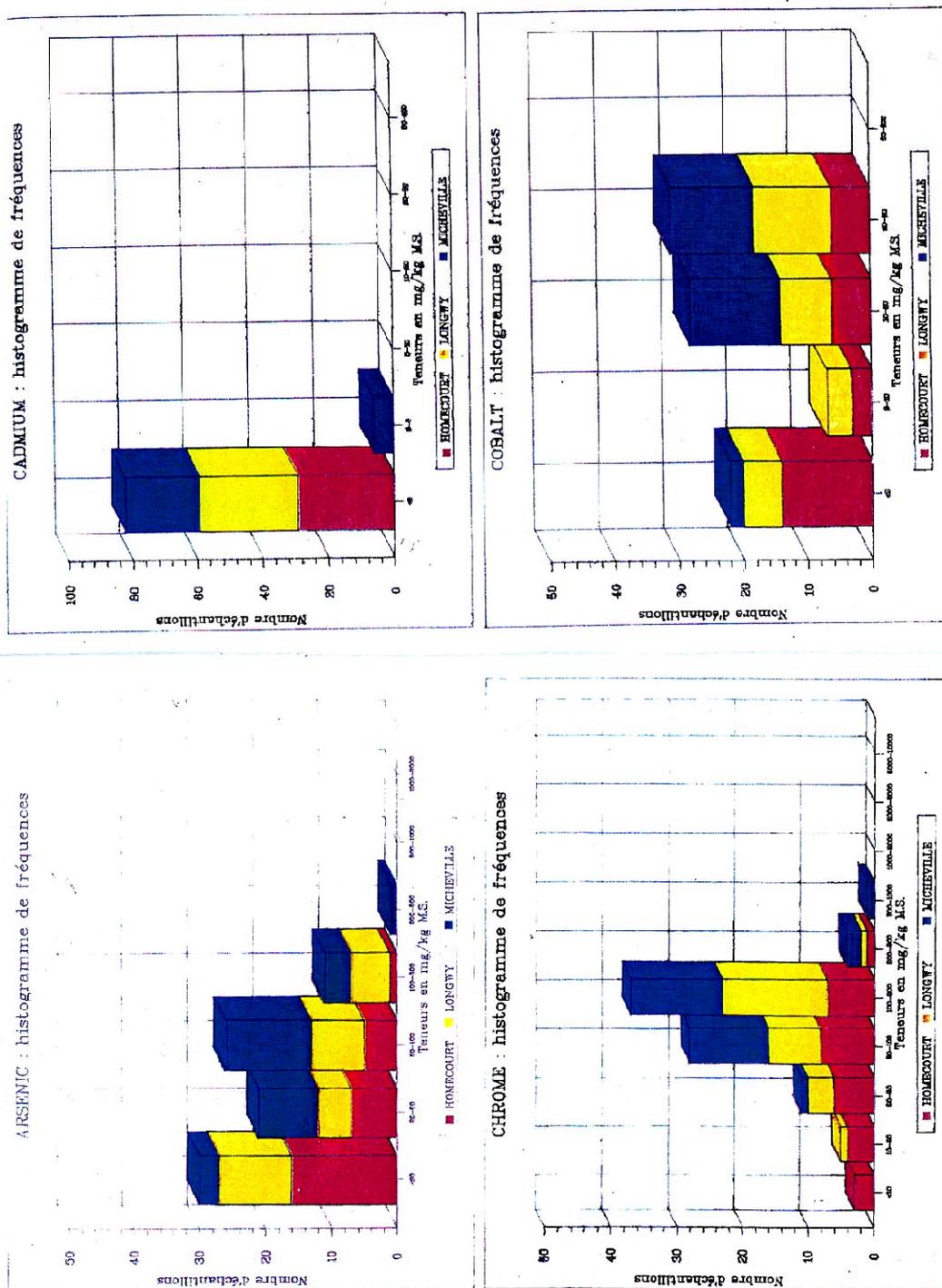


Fig. 20 - Histogrammes de l'arsenic, du cadmium, du chrome, et du cobalt (d'après Chaussidon, 1992).
 (a) secteur des vallées ferrifères, (b) secteur de la plaine de la Moselle, (c) secteur du bassin houiller.

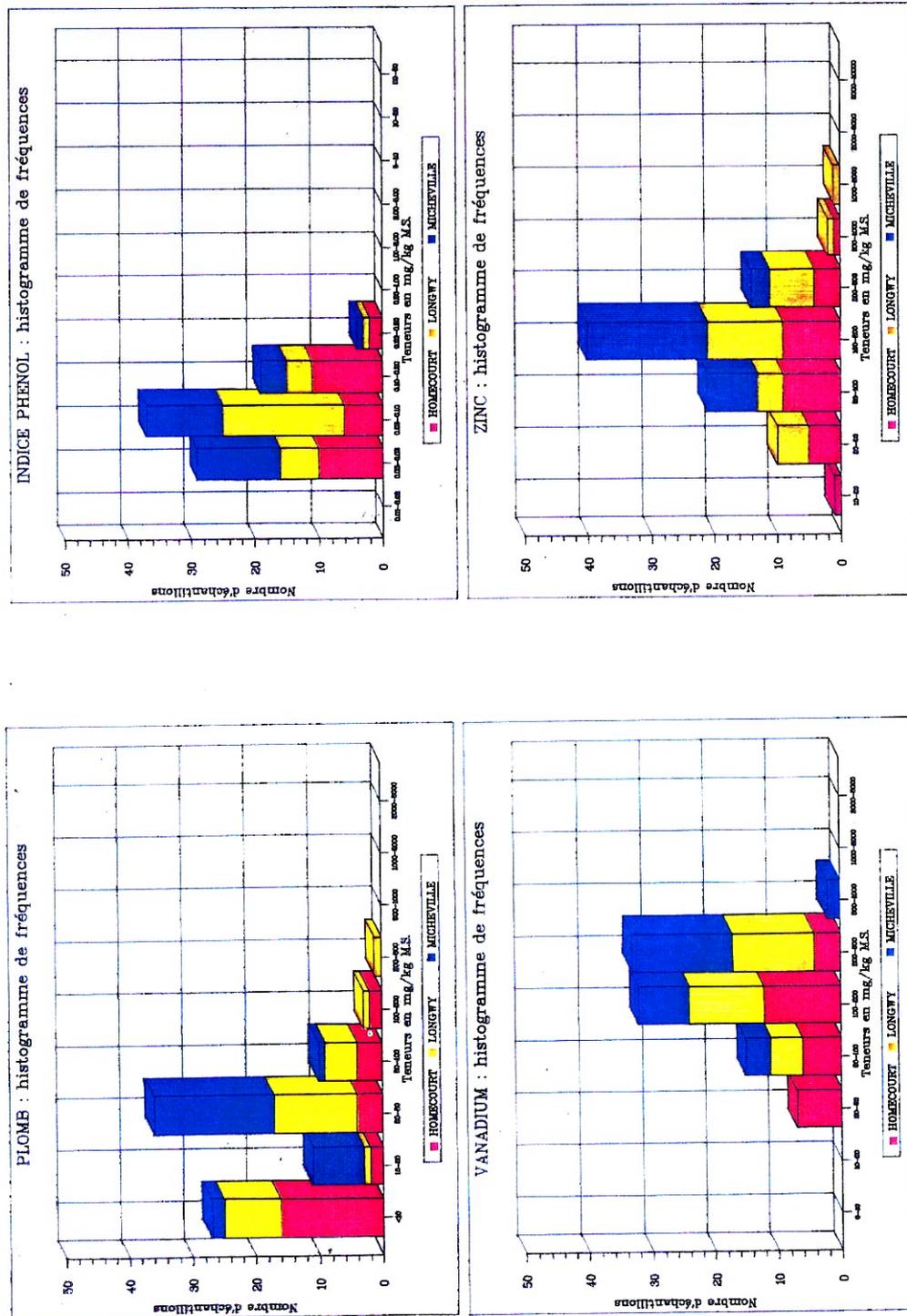


Fig. 21 - Histogrammes du plomb, du vanadium et du zinc et phénol (d'après Chaussidon, 1992).
 (a) secteur des vallées ferrifères, (b) secteur de la plaine de la Moselle, (c) secteur du bassin houiller.

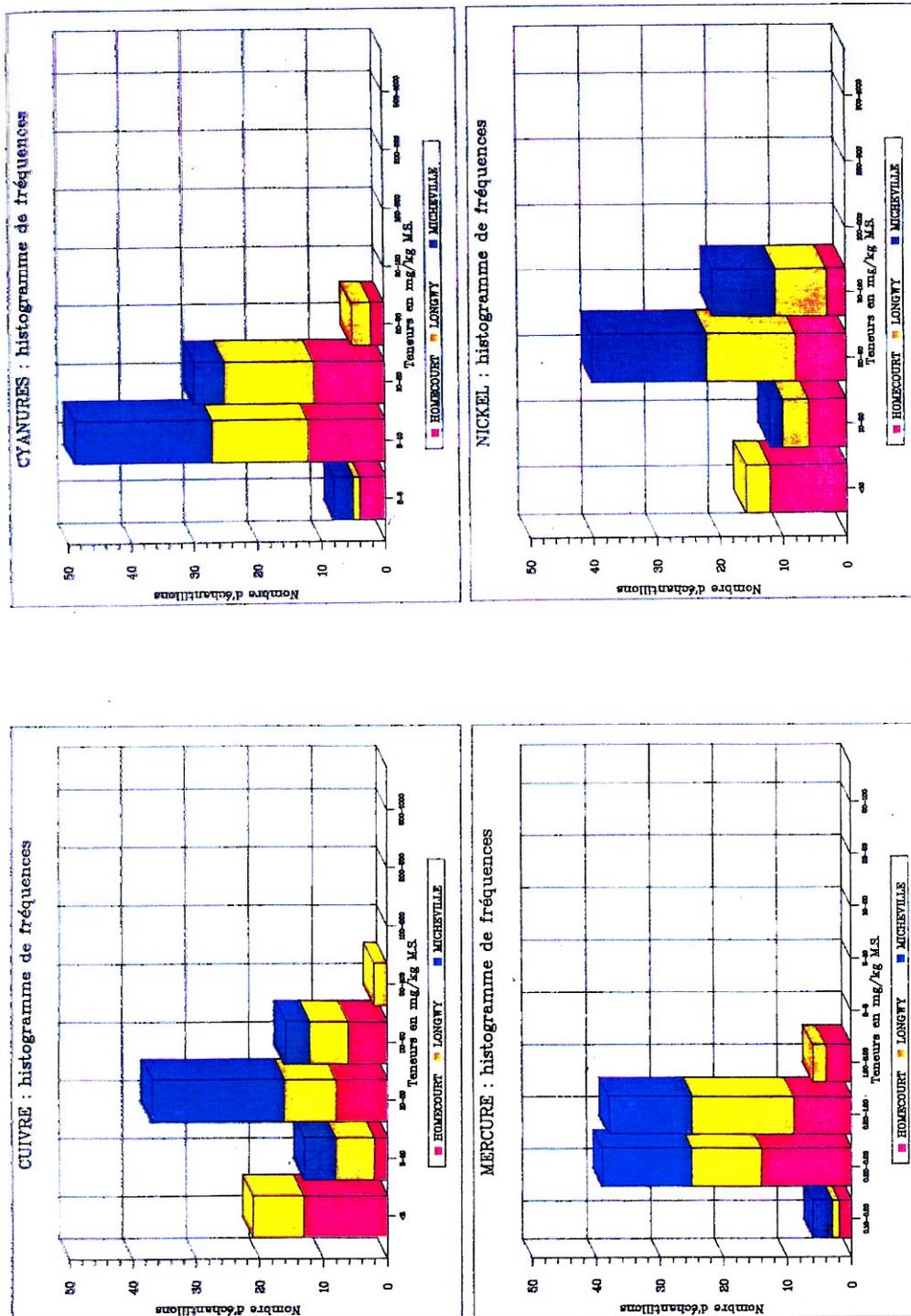


Fig. 22 - Histogrammes du cuivre, du mercure et du nickel et cyanures (d'après Chaussidon, 1992).
 (a) secteur des vallées ferrifères, (b) secteur de la plaine de la Moselle, (c) secteur du bassin houiller.

4.2.5. Conclusions

Les analyses chimiques effectuées sur les sols prélevés à l'extérieur de 7 anciens sites industriels lorrains en cours de réhabilitation et en fonction de différents critères tels que la nature géologique des terrains et l'environnement des sondages, ont permis de :

- définir les teneurs moyennes et maximales dans les différents groupes de sites étudiés ainsi que des différentes couches géologiques rencontrées, pour différents éléments chimiques tels que les métaux et quelques composés organiques le plus souvent rencontrés dans ce genre de friches ;
- de comparer ces teneurs avec les niveaux guides existants tels que les guide-ânes hollandais ou les recommandations allemandes ou québécoises.

En général, les teneurs maximales des sols hors sites industriels des secteurs étudiés se situent entre les niveaux A et B (ou BWI et BWII) des niveaux guides existants c'est-à-dire à un faible niveau de contamination ; seul As dans le secteur ferrifère est supérieur à C (égal à BW III). Les formations géologiques les plus minéralisées (As, Cd, Cr, Pb et Zn, fig. 20, 21 et 22) sont les alluvions et limons de surface du secteur ferrifère (influence des couches minéralisées en fer) ; celles les moins minéralisées sont celles du bassin houiller (grès peu minéralisés).

En ce qui concerne le devenir du programme, cette base de données lorraine doit peu à peu s'enrichir des différentes études ponctuelles dans les domaines industriels et agricoles (épandages de boues, etc.) afin d'affiner les résultats obtenus et acquérir des référentiels géochimiques dans d'autres secteurs de la Lorraine.

Les données disponibles sont fournies dans les rapports cités auparavant.

4.3. ÉTUDE DES SOLS EN AVALLONNAIS (YONNE)

Ce contrat de recherche financé par le Ministère chargé de l'Environnement entre août 1996 et septembre 1998 portait sur la faisabilité d'une cartographie pédo-géochimique dans le sud du département de l'Yonne (Baize et Roddier, 1998).

4.3.1. Démarche entreprise

La démarche appliquée est une **démarche typologique**. Les résultats du programme INRA-ASPITET (Baize, 1997 - « Teneurs totales en éléments traces métalliques ») ont bien montré l'intérêt d'échantillonner par horizon, de ne pas étudier seulement l'horizon de surface des sols cultivés mais aussi d'analyser les horizons profonds et les roches mères qui sont, presque toujours, indemnes de contaminations anthropiques. Dans cette optique, les sols forestiers s'avèrent particulièrement intéressants. Il est apparu également nécessaire d'étudier en même temps les caractères analytiques pédologiques classiques tels que granulométrie, pH, CEC, teneurs en carbone organique, calcaire, fer, etc.). Enfin, les travaux ASPITET ont montré l'intérêt de raisonner et d'échantillonner

par « familles pédo-géologiques » ou « séries de sols ». En effet, certaines de ces « familles » se singularisent très nettement par leur « spectre » géochimique.

Grâce à un échantillonnage optimisé, se basant sur une excellente connaissance typologique et cartographique des sols, un petit nombre de répétition doit être suffisant. En outre, chaque unité typologique de sol 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 à 1/50 000.

La connaissance obtenue sur le secteur « pilote » de 53 000 ha doit être extrapolable, sans travaux supplémentaires, dans les secteurs voisins présentant les mêmes roches et les mêmes types de sols.

4.3.2. Travaux réalisés

Trois petites régions naturelles contrastées : « Plateaux de Bourgogne » - Terre Plaine (dépression liasique) - Morvan nord.

- Analyse de 1 à 3 horizons par site (solum) :
 - analyses des teneurs totales en éléments traces (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) sur la « terre fine » (fraction < 2 mm) - mise en solution par l'acide fluorhydrique et l'acide perchlorique (HF + HClO₄) ;
 - analyse de As, Hg et Se sur certains échantillons ;
 - autres analyses pédologiques courantes : (Granulométrie, CEC, pH, teneur en carbone organique, calcaire total, Fe, Mn, K, Mg totaux (HF + HClO₄)).
- Constitution d'une base de données analytiques géoréférencées : 395 échantillons provenant de 207 sites, regroupés en 21 « familles pédo-géologiques ».
- Premiers traitements statistiques des données numériques.
- Restitution graphique sous formes de cartes à 1/50 000 (SIG Arc-Info) des teneurs probables en chaque élément-trace.
- Examen critique des possibilités d'établir une carte pédo-géochimique à faible coût, à partir de travaux de cartographie et de typologie pédologiques à échelle moyenne.
- Publication des premiers résultats sous la forme d'un mémoire de DESS présenté à l'Université de Strasbourg (Roddir, 1997; Baize et Roddir, 1998).
- Traitements statistiques complémentaires, i.e. caractérisation de chaque « famille pédo-géologique » par des relations mathématiques bi - ou multivariées ou

« fonctions de pédo-transfert », permettant la prédiction à partir de données courantes (argile, fer, carbone, CEC, calcaire).

- Réalisation de **cartes** pour les sept éléments et élaboration de légendes adaptées, basées sur des intervalles de teneurs (gammes de valeurs fréquentes) et non sur des valeurs moyennes (exemples ci-joints pour le cuivre et le cadmium). Chaque famille pédogéologique est ainsi positionnée par rapport à 6 classes de valeurs, elles-mêmes étalonnées sur les valeurs (déciles et quartiles) observées sur la population totale (respectivement [0-10 %], [10-25 %], [25-50 %], [50-75 %], [75-90 %] et [90-100 %]).

4.3.3. Principaux résultats

- Estimation possible de l'**état de contamination des sols** de cette zone agricole rurale (contamination par l'agriculture et contamination diffuse générale). Possibilité de poser un **diagnostic à la parcelle**, en référence au fonds pédo-géochimique naturel du même type de sol (par raisonnement typologique) (exemple, fig. 23).
- Confirmation des très fortes teneurs naturelles en Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Fe et Mn de plusieurs « familles pédo - géologiques », notamment les « terres noires » et « sols marron » de la plate-forme sinémurienne, des sols issus des argiles à chailles et des sols argilo-limoneux liés aux roches silicifiées du Lias (fig. 24).
- Existence de fortes relations bivariées ou multivariées. Lorsqu'on raisonne par « famille pédo-géologique », d'excellentes relations bivariées peuvent être fréquemment mises en évidence. Le taux d'argile est fortement corrélé (positivement) avec la CEC, Cu, Co, Cr, Ni, Fe, plus faiblement avec Cd, Pb, Mn et Zn. Le fer total est la variable la plus souvent et la mieux corrélée aux autres. Fe est très nettement proportionnel à Cu, Co, Cr, Ni et au taux d'argile, plus faiblement ou plus rarement avec Cd, Pb, Mn et Zn. Certaines associations géochimiques classiques apparaissent, notamment Zn - Cd - Pb (surtout Cd - Zn) et Cu - Cr - Ni - Co - Fe - Mn.
- Base d'échantillonnage pour développer des **recherches** sur les formes (spéciation), la mobilité, la biodisponibilité des éléments traces dans les sols (programmes en cours en association avec d'autres laboratoires de l'INRA, l'ADEME, l'ITCF, le CNRS de Grenoble, l'Université de Dijon).

4.3.4. Conclusions - Perspectives ultérieures

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.

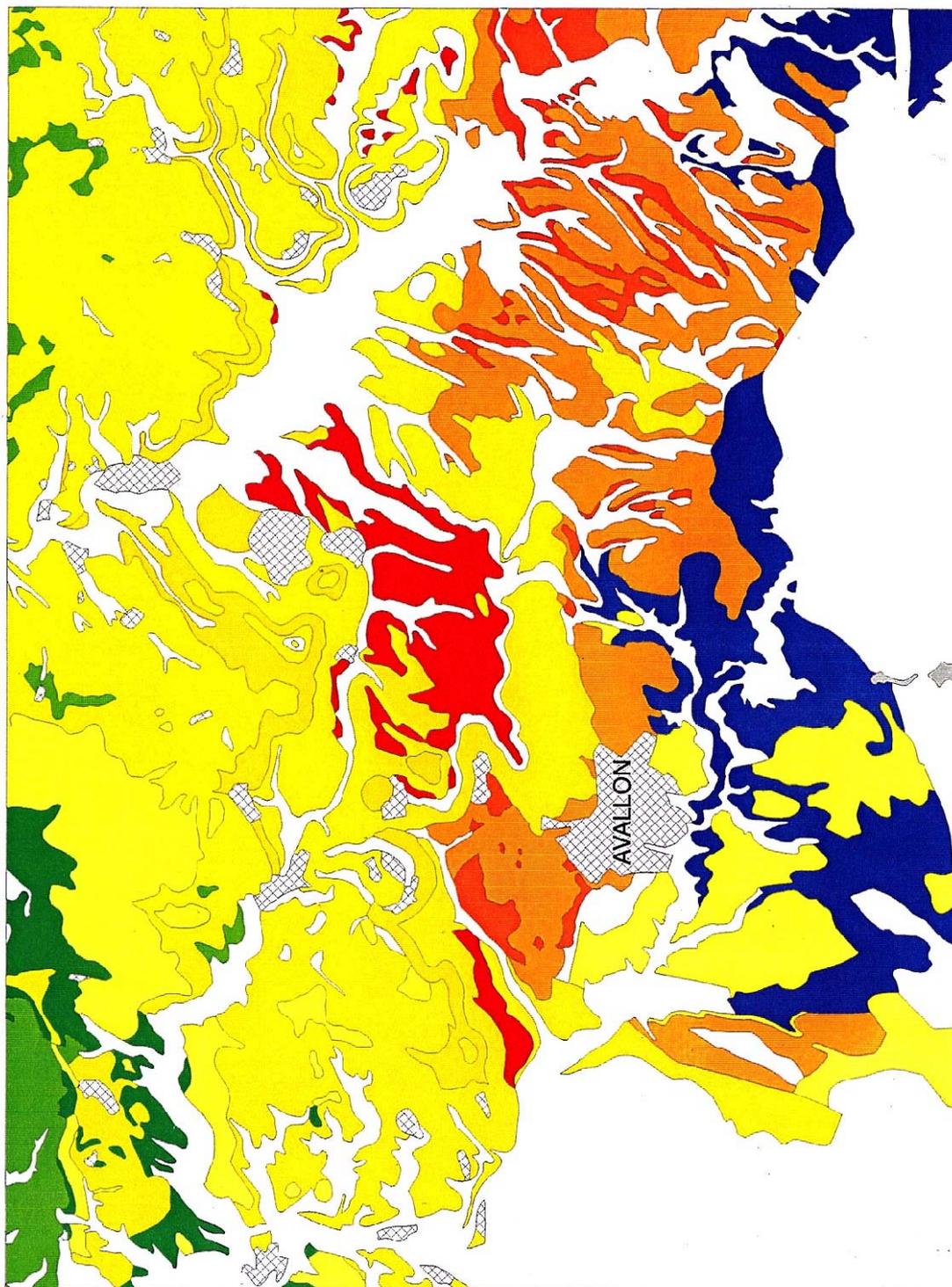


Fig. 23 - Teneurs en Cu dans les sols de l'Avaronnais classés par familles pédo-géologiques.

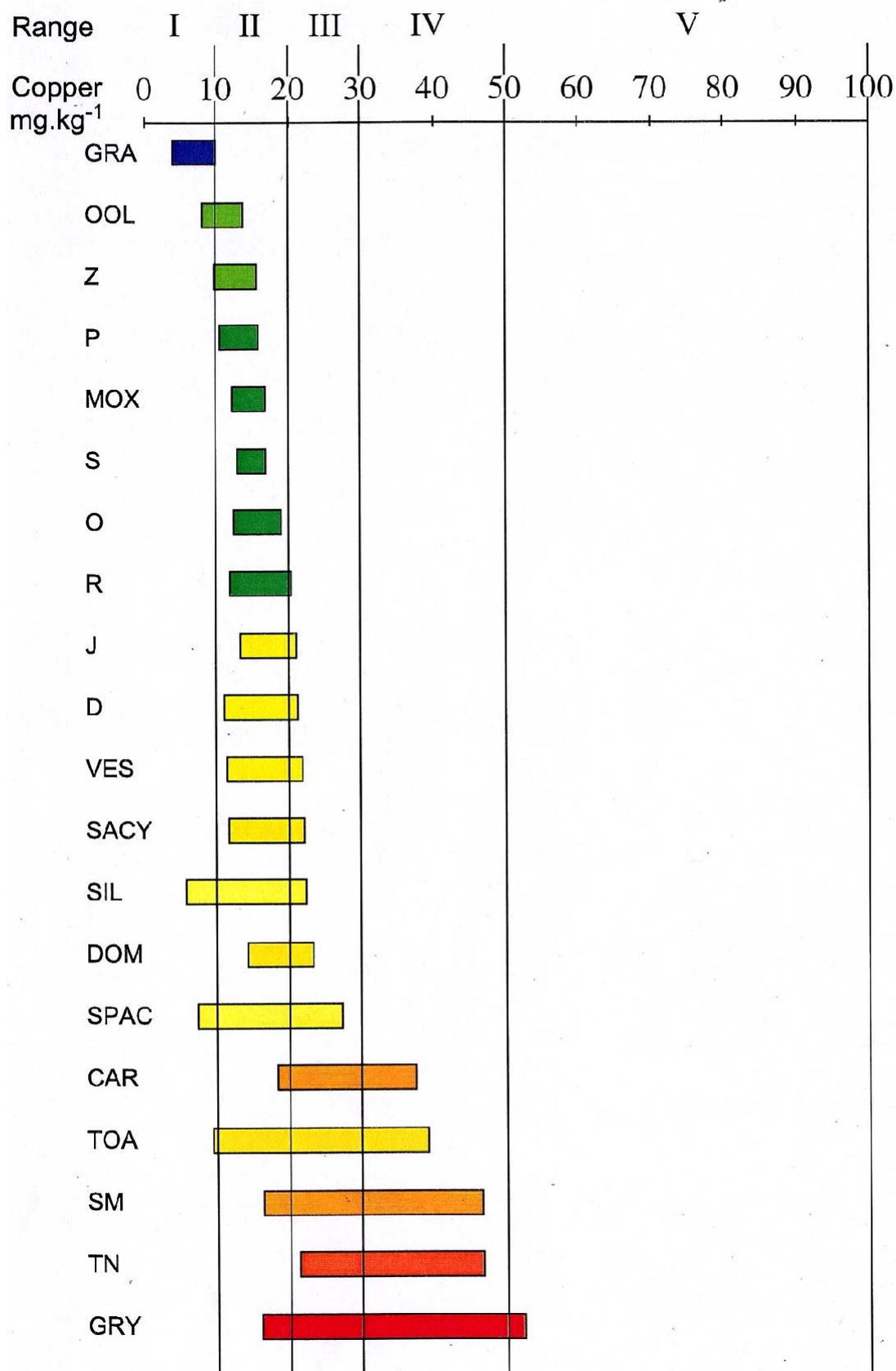


Fig. 23 - Teneurs en Cu dans les sols de l'Avallonnais classés par familles pédo-géologiques (suite).

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.

Lors des traitements, la notion de « famille pédo-géologique » s'est imposée en remplacement de la notion de « série » qui a précédemment servi de base à la cartographie détaillée à 1/50 000. Une « famille pédo-géologique » est un regroupement de plusieurs séries de sols 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 marquée des solums ou encore le degré de décarbonatation ont relativement peu d'importance en matière de pédo- géochimie.

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.

AVALLONNAIS

"Sols marron" de la plate-forme sinémurienne.

Teneurs totales observées dans les deux grands types d'horizons

• Horizons contenant de 22 à 38 % d'argile									
	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Mn
<i>(nb valeurs)</i>	(15)	(14)	(15)	(15)	(15)	(15)	(17)	(16)	(16)
minimum	0,05	17,6	66,2	11,6	29,6	38,0	117	2,88	1860
médiane	0,56	26,1	92,0	19,4	58,6	107,0	229	4,16	3530
maximum	1,20	74,5	212,0	29,6	162,0	181,0	511	6,43	9540

• Horizons contenant de 38 à 76 % d'argile									
	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Mn
<i>(nb valeurs)</i>	(23)	(22)	(23)	(23)	(23)	(23)	(31)	(30)	(30)
minimum	0,12	15,5	72,3	18,2	27,3	48,4	157	4,19	2273
médiane	0,81	43,8	132,0	33,4	155,0	93,4	464	7,40	9120
maximum	4,30	148,0	456,0	61,5	478,0	245,0	1999	10,70	24975

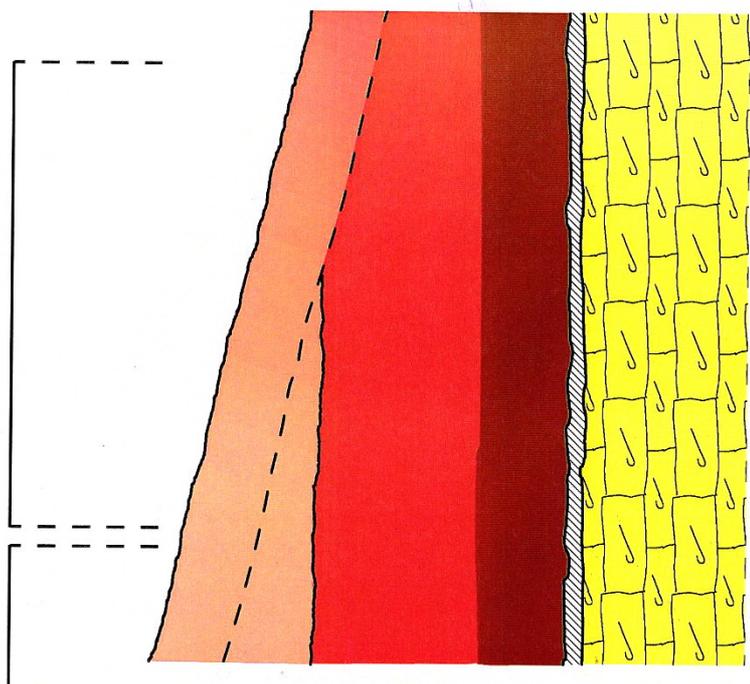


Fig. 24 - Teneurs observées dans les « sols marron » de la plate-forme sinémurienne (Avallois).

4.4. RÉFÉRENTIEL PÉDO-GÉOCHIMIQUE EN RÉGION NORD - PAS-DE-CALAIS

La constitution du Référentiel Pédo-Géochimique du Nord - Pas-de-Calais (RPG) est actuellement menée en collaboration par l'INRA (Arras et Orléans), l'Institut Supérieur d'Agronomie de Lille, l'USTL (Laboratoire Sols et Environnement) et la DRAF (Service Régional d'Hydraulique Agricole). Elle bénéficie d'un financement du Conseil Régional Nord - Pas-de-Calais et du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

Le RPG est un outil de gestion des sols qui, en fournissant une estimation de la teneur originelle des sols en éléments en traces, permettra de mieux évaluer les contaminations, d'élaborer des références pour la mise en place de normes ou réglementations adaptées, à l'échelle nationale comme européenne. C'est aussi un moyen d'acquisition de connaissances sur les lois régissant la distribution spatiale des teneurs en éléments en traces dans les sols. Le référentiel sera constitué, à terme, i) d'un catalogue régional informatisé donnant les caractéristiques physico-chimiques et les teneurs en éléments en traces (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, Zn) des principaux types de sol de la région, ii) d'une banque d'échantillons des horizons pédologiques représentant ces mêmes sols. La mise à disposition publique de ces données n'est pas formalisée à ce stade.

Le type de sol caractérisé correspond à la « série de sol » et prend en compte la nature du matériau parental, les épaisseurs et les successions des horizons, l'évolution pédogénétique du sol et la présence éventuelle du substrat géologique. Par « principaux types de sol », il faut entendre ceux couvrant au moins 80 % du territoire sous culture et forêt, non contaminés ou contaminés en surface par les retombées diffuses des activités humaines (agriculture, pollution atmosphérique diffuse). Si tous les horizons des solums échantillonnés sont stockés, trois horizons sont analysés dans un premier temps (surface, horizon profond reflétant les teneurs originelles du matériau, un horizon intermédiaire).

Les synthèses cartographiques sont peu nombreuses dans le Nord - Pas-de-Calais. La méthodologie retenue repose sur une approche dite « typologique ». Pour chacune des 17 Petites Régions Naturelles (PRN), distinguées sur des critères physiques et humains, les types de sol dominants ont été définis (en général 5). Les solums sont repérés, décrits et échantillonnés en fosses selon les règles habituelles. Une campagne d'échantillonnage permet une première caractérisation des sols. Elle est complétée ensuite par une seconde campagne organisée de façon à améliorer la caractérisation des sols déjà échantillonnés et/ou à caractériser d'autres sols s'avérant quantitativement importants. La stratégie employée est donc empirique et ajustée à mesure de l'avancement du travail.

L'objectif de trois fosses par « série de sols » est un minimum. Le regroupement des unités de sols au travers des frontières des PRN, permettra une meilleure caractérisation des types de sols.

Il sera creusé 255 fosses et 765 échantillons seront analysés. Ce travail est prévu sur trois ans (juin 1998- juin 2001).

Par ailleurs, compte tenu de l'importance des loess dans le contexte régional (environ les 2/3 du territoire voir tabl. 12)), un mémoire de fin d'étude d'un étudiant de Gembloux (Belgique) a permis de bien préciser la composition des matériaux loessiques sur l'ensemble de la région et leur variabilité spatiale (Cordier, 1999).

Ce référentiel régional permettra :

- de connaître avec précision les fonds pédo-géochimiques locaux des principales « séries de sols » de la région ;
- de déterminer les « valeurs normales agricoles » des horizons de surface des sols agricoles ;
- et de juger, en raisonnant par « séries de sols », du niveau de contamination de n'importe quel prélèvement de sol.

Paramètre	Unité	Echelle régionale			Echelle de la parcelle		
		Max.	Min.	Média.	Max.	Min.	Média.
Argiles	g/kg	220	141	174,0	189	140	177,0
Limons fins	g/kg	331	148	213,0	302	203	262,0
Limons grossiers	g/kg	589	342	458,0	573	444	479,0
Sables fins	g/kg	219	30	91,0	101	59	76,5
Sables grossiers	g/kg	16	0	1,0	6	0	1,0
pH		8,7	6,6	7,7	8,1	7,8	7,9
CaCO ₃	g/kg	186	0	0			0
CEC	mol/kg	17,36	8,41	12,40	13,10	10,41	12,33
Al	g/100g	6,13	4,37	5,19	5,84	4,88	5,54
Fe	g/100g	3,19	2,03	2,59	2,92	2,30	2,81
Cd	mg/kg	0,15	0,04	0,12	0,12	0,08	0,11
Co	mg/kg	11,96	9,04	10,09	12,21	9,18	11,21
Cr	mg/kg	67,62	43,49	57,68	55,60	46,33	52,72
Cu	mg/kg	17,78	11,35	13,74	16,92	11,43	15,71
Mn	mg/kg	708,73	235,90	477,10	601,33	448,06	559,06
Ni	mg/kg	34,82	22,19	28,06	31,19	26,84	29,28
Pb	mg/kg	20,21	14,46	17,69	19,01	15,92	18,17
Zn	mg/kg	63,24	41,51	54,84	63,77	47,14	57,93

Tabl. 12 - Caractéristiques des loess du Nord - Pas-de-Calais (25 échantillons pour l'échelle régionale, 10 échantillons pour l'échelle de la parcelle).

5. Conclusions - Recommandations

Ce rapport montre qu'une importante masse de données sur le fonds géochimique est d'ores et déjà disponible, grâce aux contributions de plusieurs organismes (tabl. 13) et cela sur de grandes surfaces à l'échelle du territoire. Ces bases de données couvrent probablement plus de la moitié du territoire national et peuvent fournir d'ores et déjà une information utile et significative sur la notion de fonds géochimique pour nombre de contextes géologiques et pédologiques rencontrés sur le territoire. Il faut toutefois préciser que les zones du territoire sont très peu, voire non couvertes par ces données.

Il existe donc une distorsion entre les données disponibles permettant de définir un fonds géochimique naturel, et des fonds pédo-géochimiques naturels, et les principaux secteurs du territoire nécessitant cette information. Cela nécessite de gérer l'information sur les fonds géochimiques et pédo-géochimiques, non pas seulement sur la base d'un critère de proximité géographique entre le besoin et les données disponibles, mais plutôt en fonction d'une approche comparative tenant compte de la lithologie et de la pédologie. D'autre part pour les secteurs du territoire non couverts, il convient de mettre en place une politique d'acquisition et de gestion des données du fonds géochimique déterminée en fonction du type de besoin et de son positionnement géographique.

Les besoins en matière de fonds géochimique naturel

Dans le cadre de la mise en place de politiques de gestion environnementale à l'échelle du territoire, on peut identifier quatre domaines principaux nécessitant l'utilisation du fonds géochimique naturel :

1. la définition de valeurs guides dans les environnements industriels ;
2. l'identification du contexte géochimique pouvant influencer la qualité des eaux souterraines ;
3. la définition de valeurs guides réglementaires pour les sols agricoles (horizon de surface), notamment dans le cadre des plans d'épandages des boues de stations d'épuration et autres déchets ;
4. la définition du niveau de contamination des sols agricoles et forestiers par toutes les activités humaines (agricoles, industrielles, minières, domestiques), anciennes ou récentes.

Dans le cadre des environnements industriels, les données géochimiques sont susceptibles d'être utilisées pour des diagnostics et des évaluations simplifiées ou détaillées des risques des sites potentiellement pollués afin de prendre en considération les sources d'exposition des populations et des écosystèmes. L'utilisation de valeurs guides du fonds géochimique naturel est par ailleurs spécifiée dans le guide d'Évaluation Simplifiée des Risques (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de

l'Environnement, 2000). Il existe donc une demande d'information de la part des instances publiques et des bureaux d'études concernés.

La surveillance de la qualité des eaux souterraines requiert également une information sur le fonds géochimique naturel, notamment pour interpréter certains enrichissements en éléments traces dans les eaux, mais c'est également un critère intervenant dans la gestion prévisionnelle des ressources en eau.

Dans le domaine agricole, les valeurs de références pour les sols sont utilisées pour déterminer l'impact à moyen et long terme de certains amendements ou traitements. Dans la pratique, l'essentiel des besoins exprimés est guidé par la mise en place des plans d'épandage de boues de stations d'épuration. Le programme national INRA-ADEME a permis de collecter des données analytiques éparpillées donnant une « photographie » de l'état des sols agricoles en 1990.

Ces trois domaines nécessitent l'utilisation de valeurs guides du fonds géochimique naturel, mais font appel à des définitions différentes de la notion de sol et de fonds géochimique, ce qui peut générer des incompréhensions voire une mauvaise utilisation des données disponibles. Il convient donc de définir un cadre précis à l'échelle nationale pour l'utilisation et la mise à disposition de ce type de données.

Les données disponibles et leur mise à disposition

Au-delà des expériences méthodologiques locales comme le test du programme GESSOL La Châtre ou celui de l'INRA en Avallonnais qui sont spécifiquement dédiés à la caractérisation du fonds géochimique naturel, seules les bases de données de l'inventaire minier national, du programme INRA-ASPITET et du programme INRA-ADEME ont actuellement une dimension pluri - régionale à nationale. Ces bases ayant été constituées pour des objectifs différents et à des périodes différentes présentent une forte hétérogénéité entre elles sur le plan des techniques d'échantillonnage, des méthodologies analytiques et du choix des éléments à analyser. On note toutefois une certaine complémentarité au niveau de la couverture géographique entre la base de l'inventaire minier qui couvre la plupart des zones de socles, alors que la base ANADEME se concentre plutôt sur les grands bassins sédimentaires à forte activité agricole. Les tableaux 13 et 14 résument le contenu et la nature des principales bases de données décrites dans ce rapport.

La base de donnée de l'inventaire minier présente l'avantage d'être le résultat d'une approche systématique et standardisée sur le plan de l'échantillonnage. Elle couvre de vastes surfaces avec une forte densité d'échantillons. Cette base fournit une information relativement fiable des caractéristiques du sol entre 30 et 50 cm de profondeur mais exclut l'horizon humifère de surface. Les études statistiques ont montré que les signaux géochimiques des sédiments de ruisseaux et des sols étaient relativement comparables sur une échelle locale. L'ensemble des données de cette base serait donc valorisable pour définir certaines valeurs guides. La base de l'inventaire minier présente toutefois certains désavantages :

- elle ne couvre pas les principales zones industrialisées du territoire,
- la base a été conçue pour une finalité minière et certains des principaux éléments traces sensibles en environnement comme Se, Tl, Hg, ... n'y figurent pas,
- les sols ne représentent que 20 % environ des prélèvements,
- les analyses ont été réalisées à une période où les limites de détections étaient relativement élevées et avoisinaient 10-20 ppm, ce qui est trop élevé pour une utilisation dans les domaines 3 et 4.

La base de données du programme INRA-ADEME présente l'avantage d'être conçue à une échelle nationale. Elle est conçue pour une finalité de gestion des sols agricoles dans le cadre des procédures d'épandage des boues de stations d'épuration. Les teneurs mesurées correspondent aux 30 premiers centimètres du sol, donc à des horizons qui ont été le réceptacle de toutes les contaminations agricoles diffuses, retombées atmosphériques et, éventuellement, de pollutions locales. Il est donc impossible, avec cette base, de remonter valablement au fonds pédo-géochimique naturel. Tout au plus, peut-on constater des tendances naturelles régionales. La base contient de nombreuses analyses, mais présente l'inconvénient de rassembler des données hétérogènes sur le plan de l'échantillonnage et des méthodes d'analyse. La gamme d'éléments traces analysés est restreinte, mais correspond aux principaux métaux à surveiller en matière environnementale à l'exception de certains éléments comme As, Sb, Sn, ...

La base de données INRA-ASPITET et la base régionale du Nord - Pas-de-Calais sont également conçues pour caractériser le fonds géochimique des sols agricoles, avec une approche analytique sur plusieurs horizons du sol. Ces bases ont permis de mettre au point des stratégies d'interprétation et d'extrapolation spatiale (dite approche typologique). La méthode présente l'avantage de réduire fortement le nombre d'analyses, mais nécessite en préalable une cartographie pédologique détaillée et une bonne connaissance de la lithologie sous-jacente. La base de données est constituée d'analyses récentes avec une bonne limite de détection, mais se focalisant sur un nombre réduit de métaux. Cette méthode peut être efficace pour des éléments traces dont le fonds géochimique est déterminé par la lithologie (ex : Cr, Ni, Co, Ba, Zr, Ti, Li, B, Ba, Terres Rares...). En revanche, pour les éléments traces (ex : As, Se, Cu, Pb, Zn, Mo, W, Cd, Tl, ...) plutôt influencés par d'autres phénomènes géologiques comme l'hydrothermalisme, le métamorphisme, les discontinuités structurales, etc., cette approche ne peut être utilisée de manière satisfaisante. Cette méthode peut être envisagée dans les régions où la lithologie est relativement monotone et constituée de roches avec de faibles variations du fonds géochimique (ex : craie, grès,...).

Dans le cadre des politiques de gestion des sites potentiellement pollués, la mise à disposition publique de tout ou partie de ces bases de données peut être envisagée afin de fournir aux utilisateurs des valeurs guides de fonds géochimique naturel.

Ce rapport précise les principales caractéristiques de la base de données de l'inventaire minier national. Les données brutes de cette base sont déjà consultables sur internet via le serveur InfoTerre (<http://infoterre.brgm.fr>). La mise à disposition publique des données de l'inventaire minier dans un objectif de définition de valeurs guides du fonds

géochimique naturel pour des utilisations locales nécessiterait un traitement statistique préalable afin de réduire l'hétérogénéité liée aux différentes méthodes d'échantillonnage (sol et sédiments de ruisseaux) et d'analyse (DCP, ICP-AES). La base de données homogénéisée à l'échelle du territoire pourrait alors servir d'indicateur pour définir des valeurs guides locales dans le cadre de procédures de type ESR. Ces données géochimiques devraient être systématiquement livrées avec d'autres informations sur la qualité des données locales, par l'introduction d'un indice de confiance, et associées à une information sur la lithologie locale. A ce titre, il conviendrait de constituer une base de données nationale sur les faciès lithologiques, car les cartes géologiques à 1/50 000 ne sont pas systématiquement adaptées à type d'utilisation.

La base de données ANADEME en cours de constitution par le programme INRA-ADEME a pour avantage d'être conçue pour fournir une information sur l'ensemble du territoire. La variété des procédures d'échantillonnage et d'analyse ne permet pas a priori d'homogénéiser le signal géochimique sur la base d'un traitement statistique comme pour la base de données de l'inventaire minier. Les données contenues sont adaptées aux sols agricoles et représentatives de parcelles. Elles correspondent à la partie superficielle du sol (0-30cm), ce qui les distingue de la base de l'inventaire minier national qui se focalise sur les horizons de profondeur supérieure à 30 cm. Il conviendrait de négocier avec l'INRA et l'ADEME l'accès à ce type de base de données et les modalités de mise à disposition de l'information dans le cadre des procédures de type ESR.

La base de données du programme INRA-ASPITET a permis de mettre au point des stratégies d'interprétation et d'extrapolation spatiale, permettant d'extrapoler des données ponctuelles collectées pour une série de sols à toute la superficie correspondant à l'existence de cette même « série de sols ». Cette méthode d'extrapolation sera facilement applicable sur les secteurs pour lesquels on dispose d'une carte pédologique suffisamment détaillée. Dans les autres cas, il conviendra de faire une expertise à la parcelle.

Dans le cadre d'utilisation du fonds géochimique naturel pour définir des valeurs guides locales du fonds géochimique naturel nécessaires à l'approche nationale en matière de gestion des sites et sols pollués, on peut imaginer la constitution d'un site web (de type BSS ou BASIAS) contenant l'information des bases de données de l'inventaire minier et celles de la base ANADEME, sous réserve de l'accord des organismes concernés. Il conviendrait de définir une procédure type de définition des valeurs guides locales du fonds géochimique à partir des données disponibles dans ces bases en y associant d'autres informations comme la lithologie, la pédologie.... La mise à disposition de ces données devrait être accompagnée de certains avertissements quant aux limites d'utilisation des valeurs analytiques.

Fonds géochimique naturel - État des connaissances à l'échelle nationale

Org.	Type étude	Total éch.	Surface couverte	Densités	Type éch.	Granulométrie	Analyse	Finalité environ.	Avantages	Inconvénients
BRGM	Régionale (Inventaire Minier)	280000	101536 km ²	2,8 / km ²	Sols (20%) Sédiments (80%)	< 125μ	DCP(90%) ICP (10%)	Synthèses régionales Réservoirs crustaux Estimation fonds par litho	effectif stat. vaste surf. Densité élevée donc fine résolution	7 éléments à LD inf.>Fonds limité au socle
INRA Aspitet	Locale	1310		Variable	sols (avec horizons profonds)	< 2mm (?)	A.A	Approche fonds pédo géoch.	analyse standard	couverture hétérog. Lias-Juras. Sur-représenté
Ademe	Régionale	11000 (8530 géoréf.)	86 dépt.	Variable	Sols (surface seulement)	< 2mm	Variée	Etat des sols agricoles en 1990	large population	base d'analyses hétérogène
INRA NPC	Régionale (NPC)	765 (260 sites)	12300	1/16km ²	Sols (avec horizons profonds)	< 2mm	INRA A.A	Définition du fonds par série de sols	éch. homogène	densité faible

Tabl. 13 - Synthèse des bases de données nationales ou régionales.

Méthodes analytiques	Inventaire minier		ASPITET	ANADEME	RPG NPC
	ICP	DCP	ICP/AAS	multi méthodes	ICP/AAS
Nombre d'analyses	30 000	250 000	1310	11000	765
SiO ₂	x				
Al ₂ O ₃	x				Al
CaO	x				
Fe ₂ O ₃	x	x	x		Fe
K ₂ O	x				
MgO	x				
MnO	x		x		Mn
Na ₂ O					
P ₂ O ₅	x	x			
Ag	x	x			
As	x	x	x (1)		x
B	x	x			
Ba	x	x			
Be	x				
Bi	x				x
Cd	x	x	x	x	x
Co			x (1)		x
Cr	x	x	x	x	x
Cu	x	x	x	x	x
Hg			x (1)	x	x
La	x	x			
Mo	x	x			x
Nb	x	x			
Ni	x	x	x	x	x
Pb	x	x	x	x	x
Sb	x	x			x
Se			x (1)	x	x
Sn	x	x			x
Tl			x (1)		x
V	x	x			x
W	x	x			
Y	x	x			
Zn	x	x	x	x	x
Zr	x	x			

x(1) analyse partiellement disponible

Tabl. 14 - Eléments analysés sur les principales bases de données.

Le cas des zones non informées

Dans les zones où l'on ne dispose actuellement d'aucune donnée de référence, que ce soit en sols ou en sédiments de ruisseaux, on recommande une approche guidée par les besoins locaux et non la mise en place d'une couverture systématique visant à définir un fonds géochimique naturel à l'échelle du territoire. Ceci est indispensable dans le cadre de l'approche nationale en matière de gestion des sites et sols pollués (domaine d'application n°1).

On peut distinguer deux cas de figures :

1. Dans le cadre de procédures de type ESR, et dans des secteurs à forte concentration de sites potentiellement pollués, on recommande la mise en place d'une couverture systématique d'échantillonnage définissant le fonds géochimique naturel du sol. Les procédures d'échantillonnage et analytiques recommandées pourraient être celles définies au niveau international par l'UNESCO (Darnley *et al.*, 1995) ou par un guide méthodologique publié par le BRGM et l'INRA à l'issue du test de La Châtre. La cartographie du fonds géochimique naturel du sol et des sédiments pourraient être définies dans ces secteurs sur la base de coupures IGN à 1/50 000 en fonction des besoins locaux. On peut proposer un échantillonnage des sols suivant une densité de l'ordre de 1 éch./10 km² à préciser en fonction de la diversité géologique et pédologique régionale. Les protocoles d'échantillonnages devront être regroupés dans un guide méthodologique diffusé à l'échelle nationale et associé aux guides méthodologiques ESR et EDR.
2. Dans les secteurs à faible densité de sites potentiellement pollués, une définition régionale du fonds géochimique ne s'impose pas. On recommande alors de définir le fonds géochimique naturel du site concerné, comme mentionné dans le cadre de la procédure ESR. Les procédures analytiques et d'échantillonnage à appliquer seraient les mêmes que dans le cas des zones à fortes concentrations de sites potentiellement pollués. Les données acquises localement devraient alors faire l'objet d'une collecte systématique et d'une mise à disposition par un organisme de référence, sur le même principe que pour la Banque de Données du Sous-sol (B.S.S.). Il convient alors de mettre en place une procédure de collecte des données acquises au cas par cas dans le cadre des IHR et autres études similaires de sites industriels avec obligation de transmettre les données du fonds géochimique à un organisme de référence. On peut imaginer une procédure de mise à disposition publique de ces données de référence dans le cadre de la BSS ou de BASIAS.

En conclusion, la mise en place d'une base de données nationale publique regroupant les informations nécessaires à la définition de valeurs guides du fonds géochimique naturel constituerait un outil essentiel dans le cadre des procédures de gestion des sites et sols pollués et de la protection des ressources en eau souterraines. Il existe déjà un outil en cours de constitution adaptés aux sols agricoles (base ANADEME). La mise en place de cet outil doit être guidé par les besoins locaux en matière d'information sur le fonds géochimique naturel. Cela amène aux recommandations suivantes dans le cadre de l'approche nationale en matière de gestion des sites et sols pollués :

- constitution d'une structure nationale d'hébergement des bases de données relatives au fonds géochimique naturel, sur un principe analogue à la BSS ou à BASIAS ;
- mise à disposition sur internet d'un SIG contenant des données de l'inventaire minier national après homogénéisation et corrections statistiques des données géochimiques ;
- établissement de liens avec la base ANADEME ;
- publication d'un guide méthodologique sur les techniques d'échantillonnage et les méthodes analytiques adaptées à la définition du fonds géochimique naturel adapté aux problématiques de sites pollués et de protection des ressources en eau ;
- mise en place d'un protocole pour la cartographie du fonds géochimique naturel dans les zones à fortes concentrations de sites potentiellement pollués et identification des secteurs nécessitant cette approche ;
- mise en place d'un protocole de collecte systématique des données de fonds géochimique naturel recueillies dans le cadre d'études ponctuelles de sites dans les zones à faible densité de sites potentiellement pollués.

Bibliographie

- Baize D. (1994) - Teneurs totales en « métaux lourds » dans les sols français. Premiers résultats du programme ASPITET. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, n° 22, pp. 37-46.
- Baize D. (1994) - Les teneurs totales en métaux lourds dans les sols de France. Variabilité du fonds pédo-géochimique naturel. 4^{ème} Journ. Étude des Sols, Lille. Résumé.
- Baize D. (1997) - 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.
- Baize D. (1997) - 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.
- Baize D. (1997) - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Editions, Paris. 410 p.
- Baize D. (1997) - Détection de contaminations modérées en éléments traces dans les sols agricoles. *Analysis Magazine*, Vol. 25, 9-10, pp. 29-35.
- Baize D. (1997) - Interpréter les teneurs totales en micro - polluants minéraux : fonds géochimiques locaux et contaminations modérées. 3èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. COMIFER-GEMAS. Blois, pp. 181-192.
- Baize D., Paquereau H. (1997) - Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. *Etude et Gestion des Sols*, 2, pp. 77-93.
- Baize D. coord. (1998) - L'environnement en France. Chapitre 4 « Les sols ». IFEN - La Découverte, pp. 75-87.
- Baize D. (1999) - Determination of the pedo-geochemical background. Practical applications. Proc. 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Wien. Oral presentation, pp. 104-105.
- Baize D., Roddier S. (1998) - Detailed soil typologies as tools for spatial extrapolation. Application to soil geochemical mapping in the Avallon area (France). 16th World Congress of Soil Science, Montpellier. Poster, 7 p.

- Baize D., Deslais W., Gaiffe M. (1999) - Anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 2, pp. 85-104.
- Barbier J. (1979) - Images géochimiques du socle hercynien dans le Massif Central français. *Bull. BRGM*, sect. II, n° 2-3, pp. 175-194.
- Barbier J. (1996) - L'Inventaire géochimique du Territoire français. Commentaires et explications. Note technique BRGM HYD/NT/96/078, mars 1996, 52 p.
- Boucetta M., Fritsche M. (1979) - Utilisation d'un plasma conducteur associé à un spectromètre à échelle pour l'analyse multiélémentaire des échantillons géochimiques. *Bull. BRGM*, sect. II, n° 2-3, pp. 65-74.
- Chassin P., Baize D., Cambier Ph., Sterckeman T. (1996) - Les éléments traces métalliques et la qualité des sols : impact à moyen et à long terme. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 4, pp. 297-306.
- Chaussidon C. (1992) - Référentiels géochimiques des sols autour des friches industrielles de Lorraine (54 et 57). Rapport final BRGM R. 35940 4S LOR 92.
- Cordier L. (1999) - Les éléments en traces dans les limons du Nord - Pas-de-Calais (France). Contribution à l'établissement d'un référentiel pédo-géochimique. Mémoire d'Ingénieur. Fac. Univ. Sci. Agronomiques de Gembloux. Belgique.
- Darnley A.G., Björklund A., Bölvviken B., Gustavsson N., Koval P.V., Plant J.A., Steenfelt A., Tauchid M., Xie Xuejing (1995) - A global geochemical baseline for environmental and resource management. UNESCO Publishing, Earth Sciences, 19, 122 p.
- Deslais W., Baize D. (1997) - Etude des éléments traces dans les sols agricoles français. Un programme ADEME / INRA. Actes des journées techniques : épandage des boues résiduelles - aspects sanitaires et environnementaux. ADEME, pp. 241-243.
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement – Classeur « Gestion des sites (potentiellement) pollués », version 2, juin 2000, ISBN 2-7159-0899-7.
- Moal Y., Pinault J.L. (1979) - Utilisation de la spectrométrie d'émission sur poudres pour l'analyse multi-élémentaire des échantillons géochimiques. *Bull. BRGM*, sect. II, n° 2-3, pp. 75-84.
- Salpéteur I., Itard Y. (2000) - Test d'échantillonnage géochimique à faible densité des sols, sédiments de ruisseaux et limons d'inondation pour une estimation des fonds géochimiques naturels sur la feuille de La Châtre (Sources de l'Indre). Un projet issu de la collaboration INRA-BRGM Rapport BRGM (à paraître).
- Salpéteur I., Itard Y., Mouvet C., Baize D. (1999) - Comparison of various methodologies (stream sediments, sediments at various densities, overbank

sediments, soils) for the determination of baseline concentrations of trace elements at the regional scale. Abstracts. The 2d conference on Environmental geochemical baseline mapping in Europe. Vilnius, Lithuania. Sept. 1-4, 99, p.75-80.

Wilhelm E. (1981) - Application industrielle de la géochimie multiéléments, outil de la recherche minière systématique. *Revue de l'Industrie Minérale*, les techniques, décembre 1981, pp. 1-13.

BRGM
SERVICE ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET PROCÉDÉS INNOVANTS
Unité Environnement industriel

BP 6009 – 45060 Orléans cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34