

un point sur...

**les éléments
traces métalliques
dans les sols**
**approches
fonctionnelles
et spatiales**

D. Baize, M. Tercé coord.

 **INRA**
EDITIONS

un point sur...

les éléments traces métalliques dans les sols

approches fonctionnelles et spatiales

les éléments traces métalliques dans les sols

approches fonctionnelles et spatiales

Denis Baize, Martine Tercé, coord.

un point sur...

Phytoprotecteurs, protection des plantes, biopesticides

P. BYÉ, C. DESCOINS, A. DESHAYES, coord.
1991, 178 p.

Agricultures et société

C. COURTET, M. BERLAN-DARQUÉ,
Y. DEMARNE, éd.
1993, 326 p.

Élaboration du rendement des principales cultures annuelles

L. COMBE, D. PICARD, coord.
1994, 192 p.

Comportement et bien-être animal

M. PICARD, R.H. PORTER, J.P. SIGNORET,
coord.
1994, 228 p.

Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990)

J.C. MULLER, coord.
1996, 392 p.

Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France)

D. BAIZE
1997, 412 p.

Oiseaux à risques en ville et en campagne Vers une gestion intégrée des populations ?

P. CLERGEAU, coord.
1997, 376 p.

L'information scientifique et technique Nouveaux enjeux documentaires et éditoriaux

P. VOLLAND-NAIL, coord.
1997, 282 p.

Aliments et industries alimentaires : les priorités de la recherche publique

P. FEILLET, coord.
1998, 288 p.

L'homme et l'animal : un débat de société

Arouna P. OUEDRAOGO, P. LE NEINDRE,
coord.
1999, 218 p.

L'eau

G. GROSCLAUDE, coord.

T1. Milieu naturel et maîtrise

1999, 204 p.

T2. Usages et polluants

1999, 210 p.

Environnement et aquaculture

J. PETIT, coord.

T1. Aspects techniques et économiques

1999, 228 p.

T2. Aspects juridiques et réglementaires

2000, 370 p.

Les supports de culture horticoles

P. MOREL, L. PONCET, L.M. RIVIÈRE, coord.
2000, 92 p.

La lutte physique en phytoprotection

C. VINCENT, B. PANNETON,
F. FLEURAT-LESSARD, coord.
2000, 356 p.

Les animaux d'élevage ont-ils droit au bien-être ?

F. BURGAT avec la collaboration
de R. DANTZER
2001, 200 p.

Le bon vivant

Une alimentation sans peur et sans reproche

P. FEILLET
2002, 288 p.

L'organisation vasculaire des Angiospermes

Une vision nouvelle

J.-P. ANDRÉ
À paraître

Préface

Cet ouvrage *Un point sur... Les éléments traces métalliques dans les sols* mérite bien son nom, car il réunit avant tout un grand nombre d'études portant sur la plupart des éléments traces métalliques intéressant notre biogéosphère. Les données rapportées sont à la fois diverses et variées, en sorte qu'il était difficile de trouver d'emblée une logique dans la présentation des travaux.

D. Baize et M. Tercé ont essayé de les regrouper, d'une part en s'intéressant à la nature des grandes sources des éléments : origine lithosphérique, apports en relation avec les pratiques agricoles, contaminations liées à l'industrie (gîtes métallifères et usines métallurgiques), d'autre part en se référant à leur mobilité et à leur phyto-disponibilité en fonction à la fois de leurs caractéristiques physicochimiques et des conditions environnementales qui peuvent être, comme on le sait, extrêmement variables à la surface du globe. À partir de là, il apparaissait donc nécessaire de faire appel au plus grand nombre possible d'observations mesurées sur sites, observatoires et essais de longue durée, ainsi qu'à diverses expérimentations en laboratoires ; et par ailleurs de considérer les différents niveaux d'investigation : minéral/organique, colloïdal/soluble, microscopique/macrosopique, teneur totale/spéciation, carence/toxicité...

De ce fait, le nombre de données apportées ici est considérable et chaque lecteur intéressé par ces problèmes pourra certainement y trouver des éléments d'information de première importance. Cela est d'autant plus appréciable que ce genre de sujet constitue sans aucun doute un des faits majeurs de notre civilisation, que celle-ci soit technindustrielle ou agroindustrielle, où les écosystèmes sont souvent fortement anthropisés ; ce qui nécessite d'avoir aujourd'hui des connaissances de plus en plus poussées dans ce domaine. D'ailleurs, l'Académie d'Agriculture de France dans sa série consacrée à l'occasion du passage à l'an 2000 et intitulée *Quelles certitudes et quelles inquiétudes notre siècle léguera-t-il au siècle suivant ?* avait choisi comme thème pour sa section V Physique et chimie des milieux et des êtres vivants : « *Contamination des milieux par les éléments traces* »¹.

Le thème majeur de cet ouvrage concerne la surface de notre biogéosphère et traite en particulier des sols (en relation naturellement avec les productions alimentaires), qui ont été longtemps insérés dans le domaine de l'agronomie, avant de concerner une pédologie qui, dans sa première phase, a été essentiel-

1. C.R. Acad. Agr. Fr., 2000, n° 3,4, 5, 675 p.

lement descriptive. Il y a déjà un certain temps que j'avais été amené à faire remarquer que l'agronomie ne se réduisait pas aux seuls éléments majeurs, qu'il fallait en conséquence avoir une approche géochimique globale des problèmes et enfin que toute carte pédologique bien faite pouvait être explicitée en termes géochimiques².

Or, cet ouvrage apporte justement beaucoup de données sur ces différents aspects, montrant leur diversité, mais aussi leur complexité en relation avec les interactions entre les différents métaux ou encore avec les problèmes de phytodisponibilité. Souvent, la présentation des données rapportées dans les articles ne conduit pas à des explications définitives ; mais ceci n'est guère étonnant, tout développement scientifique dans ce domaine impliquant de disposer d'un grand nombre d'informations (contrôlées et précises), avant de pouvoir déboucher sur des explications irréfutables.

C'est la raison pour laquelle il faut féliciter les chercheurs s'adonnant à ce genre d'études pluridisciplinaires, et en quelque sorte atypiques, qui peuvent être souvent ingrates au plan intellectuel ; c'est aussi à ce titre que la société doit avant tout les remercier chaleureusement.

Ceci étant, le point sur lequel je souhaiterais terminer cette préface est le suivant : cet ouvrage montre très bien le rôle du fond géochimique (en relation avec les roches sous-jacentes au sol) et l'influence des conditions pédogénétiques, en sorte qu'un certain nombre d'éléments nocifs sont d'origine géochimique et que leur présence dans les sols n'a alors rien à voir avec les contaminations, que celles-ci soient agricoles ou industrielles. C'est là un point sur lequel il est bon d'insister, car il indique parfaitement qu'il ne faut pas d'office montrer du doigt des responsables éventuels de la pollution sans disposer au préalable de véritables données scientifiques. Dans le domaine des éléments traces métalliques, beaucoup de problèmes ne résultent pas automatiquement de contaminations anthropiques, et souvent encore moins de pollutions agricoles. Il faut donc toujours voir les choses en profondeur et telles qu'elles sont, avant d'affirmer et surtout de condamner.

S'il y avait une seule leçon générale à tirer de cet ouvrage, il me semble en définitive que c'est bien celle-là qu'il serait bon de faire ressortir en premier pour la société civile.

14 janvier 2002

Georges Pédro

Secrétaire perpétuel de l'Académie d'Agriculture de France

Membre correspondant de l'Académie des Sciences (Institut de France)

2. **Pédro G., 1968.** *La prospection géochimique des éléments traces dans les sols avec établissement de cartes géochimiques superficielles.* Rapport interne INRA, 84 p.

Pédro G., Delmas A.B., 1970. Les principes géochimiques de la distribution des éléments traces dans les sols. *Ann. Agron.*, 21 (5), 483-518.

Pédro G., Scherer S., 1974. Essai d'interprétation géochimique de la carte pédologique de France (Échelle 1/1 000 000). Caractérisation et répartition des principaux types de milieux pédogéochimiques. *Ann. Agron.*, 25 (1), 5-48 avec 1 carte hors texte 1/1 750 000.

Sommaire

Introduction	11
---------------------------	----

Fonds pédogéochimiques naturels

■ Fonctionnement d'un écosystème naturel

1. Estimation des stocks et des flux dans un Andosol jeune	17
<i>R.M. Semlali, L. Denaix et F. van Oort</i>	

■ Variabilité spatiale à différentes échelles

2. Le cadmium dans les sols du haut Jura suisse	33
<i>J.P. Dubois, N. Benitez, T. Liebig, M. Baudraz et F. Okopnik</i>	

3. Le cadmium naturel dans une forêt du haut Jura français ...	53
<i>D. Prudente, D. Baize et J.P. Dubois</i>	

■ Référentiels pédogéochimiques à différentes échelles

4. Constitution d'un référentiel pédogéochimique régional : méthodologie et premiers résultats	71
<i>T. Sterckeman, F. Douay, D. Baize, H. Fourier, N. Proix, L. Cordier et C. Schvartz</i>	

5. Intérêt des cartes pédologiques pour la caractérisation géochimique des sols. Cas d'une parcelle en Condroz	91
<i>L. Bock, J. Laroche, V. Genot, G. Colinet et D. Lacroix</i>	

6. Identification des minéraux porteurs d'ETM dans des sols issus de matériaux limoneux	107
<i>M. Hardy</i>	

■ Cartographie au 1/50 000

7. Approche typologique d'une cartographie pédogéochimique. Exemple de l'Avallonnais	123
<i>D. Baize et S. Roddier</i>	

Contaminations en relation avec certaines pratiques agricoles

■ Les épandages de boues d'épuration urbaines

8. Examen critique des valeurs limites « sols » de la réglementation française 137
D. Baize
9. Bilan dans un sol agricole suite à des apports réguliers depuis 1985 155
J. Michelin, S. Bourgeois, J. Wiart et A. Bermond

■ Les épandages d'effluents d'élevage en Bretagne

10. Accumulation de cuivre et de zinc dans une parcelle de l'Observatoire de la qualité des sols (OQS) 169
J.P. Legros, S. Martin, D. Baize, J.M. Rivière et A. Leprêtre
11. Distribution spatiale et mobilité des ETM en région d'élevage intensif 183
F. Trolard, G. Bourrié et A. Jaffrezic

■ Le cuivre dans les sols de vigne

12. Amendements organiques, distribution du cuivre et structure des sols en Champagne 201
E. Besnard, F. van Oort et T. Jongmans

Contaminations d'origine industrielle

■ Détermination du fond pédogéochimique local pour évaluer la pollution des sols

13. Étude d'un site supposé contaminé à Dornach (Suisse) 217
T. Sterckeman et D. Baize

■ Pollutions industrielles massives (du Nord et du Pas-de-Calais)

Noyelles – Godault et Auby

14. Contamination des sols vers la profondeur à Noyelles-Godault et Auby 237
T. Sterckeman, F. Douay, N. Proix et H. Fourier

15. Transferts de Zn, Pb, Cd par voie soluble ou colloïdale	255
<i>L. Denaix, R.M. Semlali et F. Douay</i>	
16. Réactivité des matières organiques	269
<i>I. Lamy, J. Ducaroir, T. Sterckeman et F. Douay</i>	
Mortagne-du-Nord	
17. Distributions spatiales et stratégies d'échantillonnage	283
<i>F. van Oort, J.-P. Gaultier, R. Hardy et H. Bourennane</i>	
18. Bases de données géoréférencées	299
<i>J.-P. Gaultier, J.-P. Leydecker, M. Isambert, J. Nahmani et F. van Oort</i>	
19. Approche intégrée du fonctionnement d'une pelouse métallicole	313
<i>F. van Oort, M. Balabane, H. Dahmani-Muller, T. Jongmans et J. Nahmani</i>	
20. Identification minéralogique des polluants par microscopies électroniques	331
<i>F. Elsass, F. van Oort, Y. Le Mot et A.-M. Jaunet</i>	
■ Pollutions par le plomb	
21. Impact de trois établissements industriels sur les sols cultivés environnants	351
<i>D. Baize</i>	
22. Utilisation des isotopes stables pour la détermination de l'origine (géogène ou industrielle) du plomb	375
<i>J. Lévêque, S. Philippe, D. Baize, F. Monna et U. Haack</i>	
■ Réhabilitation de sols pollués	
23. Réhabilitation par immobilisation des métaux. Site de Lommel-Maatheide (Belgique)	393
<i>J. Vangronsveld, L. Diels, D. van der Lelie, J. Bierkens, P. Corbisier, N. Spelmans, E. Adriaenssens, R. Carleer, L. Van Poucke, A. Ruttens, J. Colpaert et H. Clijsters</i>	
24. Conséquences sur le transfert de Cd et Ni dans le grain de maïs cinq ans après un traitement de réhabilitation	409
<i>M. Mench, P. Solda et J. Vangronsveld</i>	

Phytodisponibilité et mobilité

■ Approches chimiques

25. Examen critique des protocoles d'extractions séquentielles ..	423
<i>A. Bermond</i>	

26. Approche semi-quantitative de la mobilité	435
<i>F. Celardin</i>	

■ Approches agronomiques

27. Devenir du cadmium apporté par des épandages de boues urbaines en céréaliculture intensive	455
<i>M. Tercé, J.L. Morel, D. Baize, A. Bermond, S. Bourgeois, P. Cambier, J.P. Gaultier, I. Lamy, M. Mench, B. Mocquot et H. Moisan</i>	

28. Composition des grains de blé après apports de boues urbaines : comparaison de différents protocoles d'étude	471
<i>M. Mench, B. Mocquot, D. Baize, S. Bussière, C. Jadé et S. Brayette</i>	

29. Phytodisponibilité du cadmium pour le blé. Rôle des paramètres pédologiques et agronomiques	481
<i>V. Sappin-Didier, S. Brayette, C. Jadé, D. Baize, P. Masson et M. Mench</i>	

30. Teneurs en Pb, Cd et Zn dans les végétaux cultivés aux alentours d'usines métallurgiques	505
<i>F. Douay et T. Sterckeman</i>	

31. Transfert du radiocésium du sol vers la plante : une étude en lysimètre	523
<i>F. Bréchnignac, C. Madoz-Escande et S. Staunton</i>	

■ Approche hydrologique

32. Le nickel en aval hydraulique d'une décharge	537
<i>A. Bourg, M. Kedziorek et G.M. Williams</i>	

Conclusion	545
-------------------------	-----

Annexes	551
----------------------	-----

1. Lexique	551
------------------	-----

2. Abréviations	557
-----------------------	-----

3. Méthodes d'analyses employées au laboratoire d'analyse des sols de l'INRA à Arras	559
--	-----

Liste des auteurs	561
--------------------------------	-----

Introduction

Petit historique de l'étude des éléments traces en France

Dès la fin de la deuxième guerre mondiale, au cours des années 50 à 70, les agronomes français (Boischot, Coïc, Coppenet, Dartigues et Lubet, Duval, Maurice, Trocmé et d'autres) s'intéressent aux phénomènes de carences en oligo-éléments (ces éléments traces indispensables à la vie et donc à la production végétale et animale) dans différentes plantes cultivées, par exemple, sur des sols pauvres très acides de Bretagne ou des Landes de Gascogne. À la fin des années soixante, les pédologues et géochimistes de l'ORSTOM étudient les sols tropicaux et multiplient les travaux sur les éléments traces, principalement en tant que traceurs des pédogenèses ferrallitiques.

Au fil des années 70, les préoccupations s'inversent. Delas s'attaque à la toxicité du cuivre dans les sols de vignoble. Puis le développement des stations d'épuration est à l'origine d'un grand nombre de recherches visant à parfaire les connaissances dans le domaine de la toxicité des éléments traces. Les boues issues du traitement des eaux usées sont recyclées par épandage sur les terrains agricoles (en l'absence de toute réglementation). En France, le ministère de l'Environnement commence, à la fin de cette décennie, à se préoccuper très sérieusement des sols, en tant que récepteurs de déchets divers et de pollutions. Avec son aide débutent alors des recherches (Juste et collaborateurs) pour connaître le devenir, dans les sols et dans les plantes, de ces éléments traces potentiellement toxiques, présents alors à des teneurs élevées dans les boues. Un effort comparable de recherche est initié à l'échelon européen par la DG XII de la CEE. La géochimie des sols et des altérations se développe et progresse (Pédro, Robert). Dans le même temps, la conscience « écologique » se généralise dans une part croissante de la population française. Le mot « pollution » commence à faire partie du vocabulaire courant, notamment pour tout ce qui concerne les activités industrielles et minières.

En même temps et dans un tout autre contexte, celui de la recherche de gîtes minéraux exploitables, les géologues du BRGM se lancent dans une prospection géochimique systématique des massifs anciens de notre pays (Massif central, Vosges, Massif armoricain, etc.). De nombreux éléments traces sont ainsi dosés systématiquement dans les sédiments de ruisseaux et dans les sols de ces secteurs.

Dans tous les laboratoires, les progrès constants des méthodes analytiques permettent d'abaisser très notablement les seuils de détection en analyses de routine, surtout grâce au développement de la spectrométrie d'absorption atomique. On peut désormais doser tous les éléments présents en traces dans les sols, les eaux et les végétaux.

Dans les années 1980, notamment suite à l'épandage massif de lisiers de porcs en Bretagne, les chercheurs qui s'intéressaient aux carences en oligo-éléments dans certains sols se mettent à étudier les formes chimiques et les risques de toxicité des mêmes éléments dans les mêmes sols. À l'initiative du ministère de l'Environnement, l'Observatoire de la qualité des sols est lancé en 1988. La norme AFNOR U 44-031 de juillet 1985, relative à l'épandage des boues d'épuration, devient d'application obligatoire en août 1988 afin de transposer dans la réglementation française la directive européenne de juin 1986.

Enfin, dans les années 90, les éléments traces s'imposent comme un sujet de recherche majeur. Notons, par exemple, le début de l'inventaire des sites et sols pollués, réalisé par le BRGM à la demande du ministère de l'Environnement (1992) et le lancement en 1994 de l'étude du fond pédogéochimique des sols français (programme INRA-ASPITET), qui se traduira par la publication d'un ouvrage de 400 pages (Baize, 1997). Deux livres importants paraissent dans cette même période : *Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduelles des stations d'épuration urbaines* (ADEME, 1995) et *Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion* (Rapport n° 42 de l'Académie des Sciences, 1998).

Le contexte socio-économique aujourd'hui

Quel est le contexte aujourd'hui, après différentes crises largement rapportées par les médias (ESB, poulets contaminés par de la dioxine, OGM) ? Au plan national, le souci général de sécurité alimentaire et le principe de précaution expliquent en grande partie la présente controverse sur l'épandage des boues d'épuration en agriculture. La prise de conscience, dans l'opinion publique comme chez nos politiques, de l'importance des sols et du maintien de leur qualité commence enfin à se faire.

La nouvelle réglementation (décembre 1997 et janvier 1998) relative à l'épandage des boues de stations d'épuration urbaines, considérées désormais comme des déchets, constitue un grand progrès par son encadrement rigoureux des pratiques, une limitation drastique des flux cumulés de métaux et les suivis qu'elle impose. Une « commission nationale des boues » rassemble depuis plusieurs années toutes les parties concernées par ce problème complexe et cherche à obtenir un consensus. Mais d'autres déchets ou effluents (composts d'ordures ménagères, lisiers) n'ont pas encore donné lieu à des normes réglementaires.

À l'échelon européen, il devient clair que les éléments traces (nommés fâcheusement « métaux lourds ») sont au cœur des préoccupations des administrations bruxelloises :

- révision en cours de la directive européenne de 1986 sur l'épandage des boues d'épuration ;
- établissement d'un état (cartographique et statistique) des teneurs en métaux lourds et en carbone dans les horizons de surface des sols des 15 pays membres ;
- travaux de normalisation sur les stratégies d'échantillonnage, les méthodes d'analyse des ETM et la détermination des fonds pédogéochimiques.

Les auteurs

Ce sont des spécialistes, travaillant presque tous à l'INRA, auxquels se sont joints des chercheurs suisses et belges. Grâce à eux tous, grâce à leurs approches complémentaires, le lecteur fera le tour de ce qui se fait aujourd'hui en matière d'étude des ETM dans les sols agricoles et forestiers quasi-intacts ou plus ou moins contaminés. Mais il ne sera pas question des sites industriels plus ou moins pollués.

Originalité de l'ouvrage

C'est le premier dans son genre en français. Une grande quantité de « littérature grise » (rapports d'expertises demandés soit par des administrations nationales soit par des collectivités territoriales régionales ou locales) est ainsi mise à la disposition d'un large public au lieu de demeurer inaccessible. L'ouvrage expose des résultats d'intérêt local mais surtout des méthodes d'intérêt général : il détaille les possibilités ouvertes par les techniques modernes, les limites de ces méthodes, les précautions à prendre, etc.

Ce livre présente plus particulièrement des études de cas dans lesquelles les raisonnements de la pédologie (échantillonnage par horizons, processus pédogénétiques, stratification par type ou série de sols*) et les caractéristiques intrinsèques des sols (telles que pH, granulométries, teneurs en calcaire, fer ou matières organiques) sont pris en compte pour l'interprétation des mesures en ETM.

Le public visé

Bien qu'écrit par des scientifiques à partir de leurs travaux de recherche, ce livre ne s'adresse pas spécifiquement à d'autres scientifiques. Au contraire, il est destiné à un public assez large, notamment celui des ingénieurs de toutes disciplines qui peuvent avoir à s'intéresser aux problèmes des éléments traces dans les sols : agronomes, géologues, hygiénistes, environnementalistes, écologues, géochimistes, travaillant dans des bureaux d'études, des DRIRE,

* Dans tout cet ouvrage, la désignation des sols est faite selon le *Référentiel Pédologique 1995*, D. Baize et M.-C. Girard coords., AFES, INRA Éditions, Paris, 336 p.

DIREN ou DDASS, des chambres d'agriculture, des agences de l'eau, des services « environnement » des grandes firmes industrielles, des laboratoires d'analyse, etc.

Le contenu de l'ouvrage

Il ne se présente pas comme une monographie mais comme une succession de travaux récents dont l'ordonnement et la complémentarité donne une bonne idée des techniques actuellement disponibles, de leurs possibilités d'utilisation et de leurs limites.

Les 33 chapitres ont été rassemblés en quatre parties. La première réunit des études de cas où les influences humaines n'interviennent guère. La deuxième s'intéresse principalement aux sols agricoles et aux contaminations modérées qu'on peut y observer suite à des pratiques déjà anciennes (épandages de lisiers, traitements à la bouillie bordelaise) ou à des épandages de boues d'épuration. La troisième partie traite des sols agricoles contaminés par des activités industrielles, avec des aperçus sur certaines méthodes de réhabilitation, telles que l'immobilisation *in situ*. Enfin la quatrième partie est particulièrement consacrée aux méthodes d'étude de la mobilité des éléments traces dans les sols et à leur biodisponibilité vis-à-vis des organismes vivants, par différentes approches.

Les lecteurs trouveront enfin, en fin d'ouvrage, trois annexes générales présentant la définition des principaux termes techniques, la signification des abréviations et les méthodes analytiques employées au laboratoire d'analyse des sols de l'INRA d'Arras.

Denis Baize et Martine Tercé

Fonds pédogéochimiques naturels

Estimation des stocks et des flux dans un Andosol jeune

R. M. Semlali, L. Denaix et F. van Oort

Les éléments traces métalliques (ETM) dans les sols proviennent en partie de l'altération de la roche-mère mais aussi de sources externes au sol : dépôts atmosphériques, épandages d'engrais et différentes activités humaines. Certains de ces éléments traces métalliques sont des oligo-éléments nécessaires pour la vie des plantes et des animaux. Mais en excès, ces métaux deviennent toxiques. Les éléments traces métalliques issus de l'altération des minéraux primaires sont redistribués sur et dans les minéraux secondaires, sur la matière organique des sols, et dans la solution du sol. Ces éléments traces métalliques peuvent aussi être prélevés par les plantes ou percoler vers les nappes phréatiques.

Les sols ne sont pas des milieux homogènes. Ils sont différenciés en plusieurs horizons ayant des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques propres. Ces caractéristiques ont des conséquences sur la rétention de métaux dans les horizons du sol, leur mobilité et leur biodisponibilité. Les sols constituent donc un compartiment clé du cycle biogéochimique des métaux dans les écosystèmes. Les sols sont les lieux d'échanges *via* la solution du sol avec les eaux de surface et de profondeur ou avec la biosphère. De plus, suivant le type de sol, le cycle biogéochimique des ETM est fortement différent.

Afin d'estimer les effets des éléments traces métalliques d'origine anthropique sur le fonctionnement biogéochimique du sol, il est nécessaire de distinguer les apports anthropiques des éléments issus du fond géochimique naturel. Une approche quantitative, basée sur des estimations de stocks et de flux d'éléments traces métalliques dans les sols, peut être utilisée pour l'évaluation des parts géogènes et anthropogènes. Cette approche est appliquée ici à l'estimation des stocks, des flux d'éléments majeurs (C, Si, Al, Fe) et des traces (Zn, Cu, Ni, Cr et Pb) dans le cas d'un Andosol, développé dans des scories basaltiques du Puy de la Vache dans le Massif central. La redistribution des ETM lors de la pédogenèse est évaluée par la comparaison des horizons avec le matériau parental ou par la comparaison de l'ensemble du solum avec le matériau parental. Le fonctionnement actuel du sol est évalué à partir des flux d'éléments. Les différents flux pris en compte sont les flux d'eaux gravitaires prélevées *in situ* à la base des horizons, et les pluvio-lessivats (pluies sous couvert végétal).

Notre objectif est l'étude des redistributions des éléments lors de la pédogenèse et l'estimation des parts d'éléments exogènes dans le sol. Pour cela, les concentrations totales en éléments ont été mesurées pour chaque horizon. Afin de comparer entre eux des horizons de masses volumiques différentes, nous avons calculé les concentrations isovolumétriques, c'est-à-dire rapportées à un même volume. Pour quantifier les redistributions à l'échelle du solum, nous avons transformé ces concentrations en stocks par horizon. Ces stocks sont le résultat de redistributions au cours de la pédogenèse, laquelle aurait duré 8 000 ans pour ce sol. Mais les redistributions anciennes peuvent être différentes du fonctionnement actuel. Pour mieux estimer le cycle biogéochimique actuel des métaux, nous avons donc mesuré les concentrations dans les eaux gravitaires percolant d'un horizon à l'autre et calculé des flux entre chaque horizon.

Caractéristiques générales des Andosols

Les Andosols sont caractérisés par des horizons supérieurs souvent très humifères, de couleur sombre, de structure micro-grumeleuse et de texture d'apparence limoneuse. Ils se développent principalement à partir de matériaux volcaniques pyroclastiques récents, mais ont été également observés sous climats tempérés humides sur des coulées de laves anciennes, des tufs volcaniques et sur des matériaux non volcaniques (lœss, argilites, granite) (Quantin, 1995). Les Andosols résultent de deux processus d'altération différents : l'altération de la roche volcanique par hydrolyse et la complexation des produits de l'altération par des acides organiques. L'hydrolyse du verre volcanique libère notamment du silicium et de l'aluminium qui s'associent pour former des composés aluminosilicatés amorphes, les allophanes et l'imogolite. Ceux-ci sont caractérisés par un rapport molaire Al/Si compris entre 1 et 2 et possèdent des charges variables en fonction du pH (Wada, 1989). Ils déterminent essentiellement les propriétés physico-chimiques des Andosols (Shoji *et al.*, 1993 ; Quantin, 1995), c'est-à-dire une forte rétention

Tableau 1.1. Caractéristiques générales de l'Andosol.

Horizon	Profondeur (cm)	Texture	Matière organique (g/kg)	pH eau	S/T	Masse volumique (kg/m ³)
OL	+ 7,5 à + 2,5		887			6,92
OH	+ 2,5 à 0		473			19,8
Ah1	0 à 14	limoneuse	115	5,5	42	520
Ah2	14 à 40	limoneuse	101	5,9	50	590
S	40 à 55	limono-sableuse	55	6,3	46	600
C	55 à 60	sableuse	12,7	6,7	48	630
D	> 60	graveleuse	1,37	8,5	n.d.	700