



■ **SOLS ET TRANSFERTS**

Contamination des sols

Transferts des sols vers les plantes

Anne Tremel-Schaub et Isabelle Feix



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Contamination des sols

Transferts des sols vers les plantes

Anne Tremel-Schaub et Isabelle Feix

EDP Sciences/ADEME

ISBN : 2-86883-793-X

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© 2005, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, PA de Courtaboeuf, 91944 LesUlis Cedex A

et

ADEME Éditions, 2, Square Lafayette, 49004 Angers Cedex.

Sommaire

Remerciements	1 ■
Résumé	3 ■
Introduction	5 ■
1. Rappels sur les éléments-traces	9
1.1. Terminologie	9 ■
■ Définition des métaux et métalloïdes	9 ■
■ Définition des éléments-traces	10 ■
■ Définition des métaux lourds, micro-polluants métalliques, oligo-éléments, contaminants stricts	10 ■
1.2. Cycles bio-géochimiques des éléments-traces	12 ■
■ Généralités sur les cycles bio-géochimiques des éléments-traces	12 ■
■ Influence des activités humaines sur les cycles bio-géochimiques des éléments-traces	13 ■
1.3. Exposition des êtres vivants aux éléments-traces	13 ■
■ Notions de dose et de temps d'exposition	13 ■
■ Exposition de l'homme aux éléments-traces	14 ■
2. Généralités sur les transferts sol-plante des éléments-traces	17
2.1. Pénétration des éléments-traces par les parties aériennes	18 ■
2.2. Prélèvement des éléments-traces par les racines	20 ■
■ Mécanismes de prélèvement des éléments-traces	21 ■
■ Facteurs contrôlant le prélèvement des éléments-traces	29 ■

2.3. Devenir des éléments-traces dans la plante	46 ■
■ Mécanismes de transport des éléments-traces au sein du végétal	47 ■
■ Concentrations en éléments-traces dans les différents organes de la plante	49 ■
■ Les excréations des éléments-traces par la plante	53 ■
■ Formes chimiques des éléments-traces dans la plante et leurs implications dans la toxicité vis-à-vis des animaux et de l'homme	54 ■
2.4. Particularités des éléments	57 ■
■ As	57 ■
■ Cd	58 ■
■ Co	58 ■
■ Cr	59 ■
■ Cu	59 ■
■ Hg	60 ■
■ Mo	61 ■
■ Ni	61 ■
■ Pb	62 ■
■ Se	62 ■
■ Tl	63 ■
■ Zn	64 ■

3. Préviation du transfert sol-plante des éléments-traces

65

3.1. Généralités	65 ■
■ Modèles	67 ■
■ Tests et analyses	70 ■
3.2. Utilisation dans les réglementations et guides de bonnes pratiques	81 ■
■ Mise en place d'une réglementation visant à protéger la qualité d'un sol	81 ■
■ Un premier modèle : le coefficient de répartition plante-sol	85 ■
■ Un deuxième modèle : l'utilisation d'extractions chimiques sélectives et de modèles régressifs	97 ■
■ Un troisième modèle : le flux exporté par la plante, les bilans entrées-sorties	102 ■

4. Aliments d'origine végétale et éléments-traces

105

4.1. Estimation de l'exposition journalière de l'homme aux éléments-traces via les aliments d'origine végétale en France	105 ■
■ Teneurs en éléments-traces dans les végétaux en France	105 ■
■ Teneurs en éléments-traces dans les aliments d'origine végétale en France	106 ■
■ La notion de dose : carences et excès	117 ■

■ Méthodes d'estimation de l'exposition aux éléments-traces par l'alimentation	118 ■
■ Exposition aux éléments-traces par l'alimentation en France	121 ■
4.2. Exposition des animaux d'élevage aux éléments-traces par l'alimentation d'origine végétale en France	128 ■
■ Teneurs des fourrages et des aliments pour le bétail	128 ■
■ La notion de dose : carences et excès	129 ■
■ Exposition aux éléments-traces des animaux d'élevage	129 ■
4.3. Les seuils pour l'alimentation végétale dans les réglementations et guides de bonnes pratiques nationaux et internationaux	131 ■
■ Les seuils dans l'alimentation humaine	131 ■
■ Les seuils dans l'alimentation animale	133 ■

5. Conclusion

5.1. Complexité des mécanismes de transfert des éléments-traces du sol vers la plante et nombre élevé de facteurs les contrôlant	135 ■
5.2. Difficultés pour prévoir le transfert des éléments-traces du sol vers le végétal	136 ■
5.3. Quelques méthodes (quasi) opérationnelles pour évaluer la probabilité de transfert	136 ■
■ Coefficient de répartition plante/sol	136 ■
■ Autres modèles régressifs	137 ■
■ Extraction chimique sélective en séquentielle	137 ■
■ Tests	138 ■
■ Essais in situ	138 ■
5.4. Modifications des concentrations en éléments-traces lors de la transformation du produit agricole récolté en aliment directement consommable	139 ■
5.5. Rôle des quantités d'aliments consommées	139 ■
5.6. Les maillons d'une chaîne complexe	140 ■
Références bibliographiques	141 ■
Annexe 1 - Fiches bibliographiques relatives à des essais de plein champ	157 ■
Annexe 2 - Teneurs naturelles dans les plantes cultivées et dans les aliments à base de végétaux	335 ■
Annexe 3 - Seuils nationaux et internationaux dans les aliments d'origine végétale	373 ■
Annexe 4 - Effets toxiques des éléments-traces en excès sur l'homme	389 ■
Annexe 5 - Lexique de définitions	403 ■
Annexe 6 - Noms latins des plantes cultivées à vocation alimentaire	407 ■



Remerciements

Ce travail de collecte de documents et de synthèse de connaissances scientifiques n'aurait pas pu être réalisé sans la collaboration de nombreuses personnes. Qu'elles en soient vivement remerciées.

Nous exprimons particulièrement notre reconnaissance aux personnes qui ont fait partie du comité de relecture du document : Serge Bourgeois (INA-PG), Françoise Decloître (CNRS-CNERNA, Paris), Frédéric Dor (ADEME, Paris), Brigitte Enriquez (ENV, Maisons-Alfort), Anne Fayolle, Sabine Huet, Thierry Moulin & Nathalie Valentin (MRA Haut-Rhin, Colmar), Alain Gomez & Michel Mench (INRA, Bordeaux), Vincent Houben (CA Maine et Loire), Rémi Koller (ARAA, Strasbourg), Christophe Schwartz (ENSAIA, Nancy), Michel Sentex (MVAB, Toulouse), Thibault Sterckeman (INRA, Arras), Jean-Marc Mérimot & Jacques Wiart (ADEME, Angers).

Nous sommes aussi redevables à toutes les personnes qui ont contribué à ce travail : Domy C. Adriano (Université de Géorgie, États-Unis), Valérie Amans (CA, Besançon), Jean-Yves Baliteau (SADEF, Aspach-le-Bas), Jean-Philippe Bernard (APCA, Paris), Corinne Bitaud (SCPA, Aspach-le-Bas), Jean-Marie Bodet (ITCF, Varades), Roseline Bonnard (INERIS, Verneuil-en-Halatte), Klara Bujtas (Académie des Sciences hongroise, Budapest), Philippe Cambier (INRA, Versailles), J.D. Caseley (ministère de l'Agriculture, Londres), Pierre Castillon (ITCF, Baziège), Fredi Célardin (Laboratoire Cantonal d'Agronomie de Jussy, Suisse), Andrew C. Chang (Université de Californie, États-Unis), Christian Charbonnier (CA, Oraison), Rémi Chaussod (INRA, Dijon), Jean-Pierre Clément (OFEFP de Berne, Suisse), Pierre Coullery (École Polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse), M. De Borde (Laboratoire Interrégional de la Répression des Fraudes d'Illkirch-Graffenstaden), Édith Degans (CREID, Dunkerque), Christelle Dehaine (CA, Amiens), Sergio Facchetti (Joint research Centre Environment Institut d'Ispra, Italie), Damien François (Soufflet Agriculture, Nogent sur Seine), Dominique Frelet (CA, Bois Guillaume), C. Grasmick (ministère

du Travail et des Affaires Sociales), Agnès Grimal (ENSIA, Massy), Éric Guillemot (SNDF, Paris), Gilles Hamelin (Proval, Bihorel), Xavier Hédevin (TVD, Voiron), Päivi Kopponen (Université de Kuopio, Finlande), Michel Lamand (INRA, Saint-Genès Champanelle), Michel Leuillet (ITCF, Paris), J. Lucbert (Institut de l'Élevage, Paris), Jean Madelon (CETIOM, Paris), Ritva Mäkelä-Kurtto (Centre de recherche en Agriculture de Jokioinen, Finlande), Steve McGrath (IACR de Rothamsted, Royaume-Uni), Guy Milhaud (ENV, Maisons-Alfort), Jean-Louis Morel (ENSAIA, Nancy), Sandrine Moro (CA, Troyes), Catherine Motte (CA, Auxerre), Sylvain Ouettet (Environnement Canada, Québec), T. Pauwels (Moulins Soufflet, Pantin), Brigitte Pilard-Landeau (ONF, Compiègne), Daniel Plénet (INRA, Bordeaux), Florence Pouessel (CA, Privas), Dominique Poulain (ENSAR, Rennes), André Pouzet (CETIOM, Paris), Yvan Pruvot (Soufflet Alimentaire, Valenciennes), M. Rauls (ministère de l'Environnement du Saarland, Saarbrücken, Allemagne), Clotilde Renard (APCA, Paris), Gerda Rentschler (Institut Supérieur International de Zittau, Allemagne), Ants Roberts (Ruakura Agricultural Research Centre d'Hamilton, Nouvelle Zélande), Christian Ruer (CA, Châlons-en-Champagne), Pierre Six (CA, Lille), Martine Tercé (INRA, Versailles), Henk Van Latesteijn (Scientific Council for Government Policy de den Haag, Pays-Bas), Jaco Vangronsveld (Université du Limbourg, Belgique), György Varallyay (RISSAC, Budapest), Sylvie Venague (CA, Dijon), Umweltbundesamt de Berlin.



Résumé

Un des aspects de la sécurité alimentaire est le contrôle des teneurs en éléments-traces des aliments d'origine végétale (pour l'homme et le bétail). Pour assurer de ce point de vue la qualité des denrées, il est nécessaire de connaître les facteurs régissant le transfert des éléments-traces du sol vers la plante – en amont –, puis ceux qui ont une incidence sur la teneur finale de l'aliment – en aval – et donc sur l'exposition des consommateurs aux éléments-traces. L'objectif principal de cette brochure est de faire l'état de l'art sur le transfert de douze éléments-traces (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Tl et Zn) des sols vers les plantes à vocation alimentaire et d'aborder rapidement l'aspect alimentation d'origine végétale. La phytodisponibilité d'un élément est définie comme la quantité d'élément qui peut être prélevée par la plante durant son développement. Elle résulte de processus successifs qui contribuent au transfert de l'élément de la phase solide du sol aux tissus de la plante : l'offre du sol, le transport vers les racines, le prélèvement par les racines, le transport de l'élément vers les différents organes végétaux. La phytodisponibilité est sous l'influence de facteurs liés au sol (pH, potentiel d'oxydo-réduction, capacité d'échange cationique), à la plante et aux micro-organismes du sol (espèce, variété, stade de développement, excréments racinaires), au climat (température, humidité), aux techniques culturales, aux caractéristiques de l'élément et aux interactions entre éléments. D'une façon générale, les teneurs sont plus importantes dans les organes végétatifs (feuilles et tiges) que dans les organes reproducteurs (grains et fruits). Cette répartition est aussi fonction de l'espèce végétale.

Les scientifiques ont mis au point des méthodes de prévision de la phytodisponibilité, afin de prévenir les carences des récoltes en oligo-éléments, la phytotoxicité, ou les fortes concentrations dans les végétaux à vocation alimentaire. Les personnes chargées d'élaborer les seuils réglementaires dans les sols utilisent parfois certaines de ces méthodes dans leurs calculs de risque. Aucune méthode de

prévision de transfert n'est entièrement satisfaisante pour le moment. Les modèles sont une représentation simplifiée de la réalité complexe du transfert, qui prévoient, à l'aide d'équations, le transfert de façon chiffrée. Les modèles mécanistes ne sont actuellement pas applicables de façon simple à des situations concrètes où l'on attend une réponse rapide aux questions de risque de transfert d'un élément-trace vers la chaîne alimentaire. Les modèles fonctionnels peuvent, quant à eux, être utilisés dans des modèles d'évaluation des risques liés à la pollution des sols, dans le cadre notamment de la gestion des sites pollués.

Enfin, que ce soit dans le cadre de la gestion des sites pollués ou dans celui des sols agricoles, les tests et les analyses sont simples à mettre en œuvre et opérationnels, même si les réponses obtenues manquent de précision : analyse de végétaux récoltés à maturité sur le terrain ou cultivés en pots en conditions contrôlées, extractions chimiques sélectives par des complexants organiques (ex. : EDTA, DTPA) ou des solutions salines (ex. : CaCl_2 , NaNO_3 , NH_4NO_3). Les analyses de terre ne peuvent être utilisées que si un référentiel d'interprétation des résultats est disponible pour de nombreux types de sols et de plantes, pour la solution utilisée et l'élément étudié, et si les protocoles sont normalisés, ce qui reste à concrétiser en France. Une autre méthode opérationnelle est l'utilisation de coefficients de répartition moyens, quotients de la concentration en un élément-trace dans la plante et dans le sol. Ces coefficients, spécifiques d'un couple élément/espèce végétale, donnent un ordre de grandeur du transfert rapidement et à moindre frais. Ils permettent de dégager des priorités quant aux choix des éléments-traces ou des espèces pour des études plus poussées. Ils ne sont cependant pas suffisants pour estimer un risque de façon satisfaisante.

La teneur d'un aliment en éléments-traces ne reflète pas toujours celle de la matière première. Il peut y avoir perte ou enrichissement pendant la cueillette, le transport, la transformation du végétal en aliment dans l'usine, le stockage, puis la préparation culinaire. L'agriculteur n'est pas le seul acteur de la qualité d'un aliment. L'estimation des expositions de la population française au Pb, Cd, Hg et Tl par l'alimentation montre qu'elles sont très inférieures aux doses maximales admissibles. Pour maintenir cette sécurité alimentaire, il faut surveiller les teneurs des aliments végétaux les plus consommés. L'estimation des expositions au Cu, Se et Cr indique que la population française est légèrement déficiente. Le Mo, le Cu, le Pb et le Cd sont surtout apportés par des denrées d'origine végétale, le Hg, le Zn, l'As et le Se par des denrées d'origine animale. Le Co, le Ni et le Cr proviennent autant de la consommation de produits végétaux que de produits animaux. Les animaux d'élevage étaient globalement carencés en oligo-éléments. Aujourd'hui, les compléments pallient ces insuffisances.

Un autre objectif de cette brochure est de servir de manuel de référence pratique dans les domaines suivants : teneurs courantes en éléments-traces dans les organes consommés des végétaux, seuils réglementaires ou recommandés en éléments-traces dans les aliments d'origine végétale, expérimentations de plein champ ayant pour but d'étudier le transfert sol-plante des éléments-traces. Ces sujets sont traités sous forme d'annexes synthétiques.



Introduction

La France est incontestablement une grande puissance agricole, elle occupe la première place européenne pour de nombreux indicateurs :

- surface agricole utile (21 % de la SAU de l'Union européenne des 15 et 18 % des 25),
- 23 % de la production agricole de l'Union européenne des 15,
- 2nd exportateur mondial de produits agricoles et alimentaires,
- production de l'Union européenne des 15 (33 % blé, 34 % maïs, 52 % vin, 29 % bovins et 29 % volatiles).

Au sein de l'économie française, l'agriculture et les industries agro-alimentaires tiennent aussi une grande place : 55 % du territoire, et elles contribuent fortement à l'amélioration du solde de la balance commerciale.

La superficie totale de la France (55 millions d'hectares) se répartit comme suit :

- 30 millions d'hectares – surface agricole utile,
- 3 millions d'hectares – territoire agricole non cultivé (parcours, landes, friches, etc.),
- 15 millions d'hectares – bois et forêts,
- 7 millions d'hectares – territoire non agricole (sols bâtis, routes, parcs et jardins, etc.).

Il est donc tout à fait primordial, surtout dans le cadre de la prévention de la pollution diffuse des sols, d'évaluer les risques liés à la présence d'éléments-traces dans les sols agricoles.

Les risques concernent trois types de « cibles » :

- la santé de l'homme (le consommateur des produits agricoles) *via* la contamination de la chaîne alimentaire par les cultures et le bétail (bio-accumulation),

- les écosystèmes très anthropisés que constituent les agrosystèmes (phytotoxicité pour les cultures, zootoxicité pour le bétail et écotoxicité pour les organismes vivants du sol ou la faune et la flore sauvages des écosystèmes terrestres),
- l’outil primaire de production et le patrimoine foncier national que constituent les sols agricoles (risques économiques de dévaluation des terres et des produits agricoles).

La pollution diffuse par les éléments-traces entraîne une lente mais progressive accumulation dans les sols. En raison des surfaces concernées, ses effets, lorsqu’ils seront visibles sur de grandes superficies, seront quasi irréversibles car il ne pourra pas être raisonnablement envisagé de décontaminer tous les sols concernés.

Paradoxalement, les pouvoirs publics français ne se préoccupent de la protection des sols agricoles que depuis peu (comparativement à celle de l’eau et de l’air). C’est également récemment que le monde agricole (propriétaires et fermiers) et les repreneurs de produits agricoles (industries agro-alimentaires, coopératives, grande distribution, etc.) se soucient de la « contamination » des cultures par les éléments-traces. Leurs craintes (principalement économiques) sont la dépréciation des terres (revente de parcelles) et celle des produits agricoles (exportations, etc.). Elles se traduisent, de plus en plus souvent, dans le cas des repreneurs de produits agricoles, par des obligations de type « parcelle n’ayant pas reçu de boues d’épuration », « parcelle se trouvant à plus d’un kilomètre d’un grand axe routier », et dans le cas du monde agricole, par des recommandations de type « ne pas épandre de boues d’épuration ou de composts urbains » (ex. : vigne).

Il est vrai que s’« attaquer » à l’évaluation des risques liés à la pollution des sols agricoles est complexe :

- Il existe de nombreuses sources potentielles de pollution. Outre les boues d’épuration et les composts urbains (qui ne concernent que moins de 5 % de la surface agricole utile), les dépôts atmosphériques au voisinage d’industries ou d’axes routiers, certaines pratiques agricoles courantes (telles que : épandage des effluents d’élevage, engrais phosphatés et bouillie bordelaise) sont susceptibles d’apporter des éléments-traces.
- La spéciation des éléments-traces, qui influe sur leur mobilité et biodisponibilité, dépend de nombreux facteurs (sources de pollution, itinéraires techniques, conditions pédo-climatiques, etc.).
- Les espèces végétales, voire les variétés, présentent des capacités de bioaccumulation très variables.
- Il existe un très grand nombre de voies de transfert du sol vers les écosystèmes et l’homme.
- Etc.

Il est vrai également que le sol a un certain « pouvoir tampon » qui lui permet d’accumuler durant des décennies des éléments-traces amenés de manière diffuse, avant que des effets néfastes ne soient constatés.

Par ailleurs, les recherches sur les éléments-traces (dans les boues essentiellement) et leur évolution, une fois introduits dans les sols, ont été nombreuses depuis 30 ans, tant en France qu’à l’étranger. La majorité des recherches concerne leur comportement dans le sol et leur transfert dans les cultures. En France on dénombre environ 50 sites expérimentaux, essais et observatoires (passés ou en cours). Il est donc apparu indispensable de rassembler les informations à la fois riches, mais dispersées dans de nombreux articles scientifiques souvent en anglais ou, pire dans des rapports « dormant au fond d’armoires », pour les synthétiser, les « vulgariser » et les rendre accessibles par les ingénieurs et techniciens chargés de conseiller les agriculteurs, les « chargés environnement » des instituts techniques agricoles ou agro-alimentaires, voire dans une certaine mesure, les « évaluateurs » des risques liés à la pollution des sols agricoles. Nous espérons que cette brochure établira un pont entre la recherche et la mobilisation de ses résultats par les opérateurs de terrain.

Afin de rédiger cette synthèse, il fallait une personne capable de faire le lien entre ces deux mondes. C’est pourquoi l’ADEME a confié ce travail à Anne Trémel-Schaub, qui a réalisé son doctorat sur le transfert sol-plantes du thallium au sein de l’INRA de Bordeaux et qui travaille depuis au sein de l’Association de Relance Agronomique d’Alsace à Colmar.

Les inquiétudes actuelles portant essentiellement sur la qualité sanitaire des cultures, nous avons choisi de ne traiter dans cette brochure que des transferts vers les plantes cultivées à vocation alimentaire

(homme et bétail), en laissant provisoirement de côté les plantes « sauvages » (qui relèvent plus de problèmes de bioaccumulation et biomagnification dans les écosystèmes naturels terrestres). Nous avons également choisi de traiter en priorité les éléments-traces (par rapport aux micro-polluants organiques) pour deux raisons :

- les connaissances scientifiques sur ces éléments sont les plus nombreuses,
- ce sont les polluants qui posent le plus de problèmes à long terme puisqu'ils ne se dégradent pas et tendent à s'accumuler progressivement dans la biosphère et plus particulièrement dans les agro-systèmes.

Douze éléments-traces sont pris en compte : l'As, le Cd, le Co, le Cr, le Cu, le Hg, le Mo, le Ni, le Pb, le Se, le Tl et le Zn. Ils ont été choisis en raison de la fréquence élevée des effets toxiques de ces éléments pour l'homme ou le bétail et de leur présence dans les réglementations protégeant ces organismes vis-à-vis du risque de leur transfert du sol vers les cultures.

D'un point de vue réglementaire en France :

- les teneurs en Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn dans les boues et/ou les sols doivent être contrôlées lors de l'épandage de boues urbaines (Arrêté du 8 janvier 1998) ; des boues, effluents et déchets industriels provenant des installations classées pour la protection de l'environnement (Arrêté 17 août 1998),
- les teneurs en Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn, As et Mo doivent être contrôlées pour la mise sur le marché d'amendements organiques, d'amendements calciques ou magnésiens, d'amendements organiques avec engrais et d'engrais (Arrêté du 21 décembre 1998 et guide pour la constitution des dossiers de demande d'homologation de 2001),
- les teneurs en As, Cd, Hg et Pb doivent être contrôlées dans l'alimentation animale (Arrêté du 12 janvier 2001).

Le Tl était présent dans l'ordonnance suisse sur la protection des sols contre les atteintes (Osol de 1986). Il a été éliminé en 1997 de la liste des éléments potentiellement à risque, mais nous avons choisi de l'inclure dans cette synthèse bibliographique en raison de sa forte toxicité pour l'homme et du peu de données existant sur cet élément en France. Le Cu, le Zn, le Mo, le Co et le Se sont apportés sous forme de granulés ou de pierres à lécher dans les rations alimentaires du bétail pour pallier les carences. Mais en raison de la toxicité de ces éléments pour les animaux à des doses élevées, ils apparaissent dans les réglementations allemande et britannique concernant les teneurs des aliments pour le bétail.

Cette brochure est la toute première d'une nouvelle collection ADEME sur les transferts et modèles liés à la pollution des sols (à venir : état de l'art sur les transferts des composés traces organiques et des éléments-traces des sols vers le bétail). De plus, elle complète utilement la brochure ADEME / INRA « Les micropolluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines » (collection « valorisation agricole des boues d'épuration ») de Juste *et al.* (1995).

Après un rappel succinct sur les éléments-traces (chapitre 1), il nous a semblé utile de présenter l'état des connaissances scientifiques acquises sur les transferts sol-plantes des éléments-traces (chapitre 2). Ce chapitre explique les mécanismes de prélèvement par les racines et de transport au sein du végétal, en précisant les facteurs contrôlant le prélèvement, la répartition dans les différents organes végétatifs et la spéciation des éléments-traces au sein du végétal. Les particularités de chaque élément y sont également présentées.

Le chapitre 3 présente les différents modèles, tests, analyses et essais permettant de prévoir les transferts sol-plantes (y compris ceux utilisés dans la réglementation et les guides de bonnes pratiques pour la fixation des seuils en éléments-traces dans les sols, dans les produits épandus, etc.). Des recommandations sur l'utilisation de ces outils sont également données dans le chapitre 3 pour tous les opérateurs de terrain qui conseillent les agriculteurs.

La connaissance de la teneur en éléments-traces dans les produits agricoles récoltés (à la parcelle) ne suffit pas pour évaluer leurs teneurs dans les aliments d'origine végétale (dans notre assiette ou dans la mangeoire du bétail), et encore moins pour évaluer l'exposition de l'homme ou des animaux *via* ces aliments. En effet, l'épluchage, la séparation du grain de son enveloppe, la cuisson, le conditionnement, la multiplicité (ou non) des approvisionnements, etc. peuvent concentrer, ajouter ou au contraire diluer les éléments-traces dans les aliments. Afin de sensibiliser le « technicien ou ingénieur agricole » plus proche

de la culture que du contenu de l'assiette, le chapitre 4 est consacré à l'exposition de l'homme et des animaux d'élevage, aux éléments-traces *via* les aliments d'origine végétale en France. Ce chapitre fait également le point sur les seuils pour l'alimentation végétale tant en France qu'à l'étranger.

Dans le souci de valoriser les expérimentations effectuées, essentiellement *in situ*, en France ou en Suisse, l'annexe 1 rassemble près de 20 fiches (une par expérimentation). Outre la présentation de toutes ces expérimentations selon un même plan et de manière synthétique, ces fiches offrent l'avantage de contenir une analyse critique et de présenter des résultats de traitement comparables (certains ont été calculés *a posteriori* à partir des données brutes des documents). Tous les sites français n'ont malheureusement pas pu être traités, faute de temps ou parce que certaines expérimentations n'étaient pas terminées. Néanmoins, tous ceux qui mettent en place ou qui gèrent déjà des sites expérimentaux pourront puiser des conseils et des idées dans l'annexe 1 et pourront comparer leurs résultats avec ceux des fiches.

L'annexe 2, qui constitue un référentiel des teneurs « naturelles » (ou du moins habituelles) dans les plantes cultivées et dans les aliments à base de végétaux, complète le chapitre 4. Elle montre la grande variabilité tant inter- qu'intra-espèces.

L'annexe 3 détaille les seuils nationaux et internationaux dans les aliments d'origine végétale et complète également le chapitre 4. Elle permettra de répondre aux nombreuses questions que le monde agricole se pose vis-à-vis de l'exportation de ses produits.

Un très bref rappel sur les effets toxiques des éléments-traces sur l'homme est fait dans l'annexe 4. Cette annexe, qui n'a pas la prétention de remplacer les nombreux traités de médecine sur le sujet, n'est là que pour sensibiliser et informer le lecteur.

Un lexique est disponible en annexe 5. Il définit les termes scientifiques ou techniques utilisés dans la brochure.

Enfin, les noms latins des principales cultures à vocation alimentaire (pour l'homme et le bétail) sont listés en annexe 6. Elle permettra à ceux qui désirent en savoir (toujours) plus, de consulter plus aisément certains documents scientifiques.

Cette brochure est issue de la lecture d'environ 200 documents, et n'est donc pas exhaustive sur le sujet. Les ouvrages consultés sont en majorité français, allemands, britanniques, scandinaves, américains et australiens, pays qui ont plus particulièrement étudié ce domaine. Seul le transfert sol-plante a été traité. La contamination des végétaux par la voie atmosphérique existe, mais son importance par rapport au prélèvement par les racines étant controversée, nous avons choisi de ne pas traiter en détail cet aspect.

Le lecteur pressé pourra ne lire que les encadrés « Les bases... » figurant dans les chapitres 2 et 3 et ceux « À retenir sur... » figurant à la fin des chapitres 2, 3 et 4. Quant au lecteur curieux ou dont le besoin de connaissance n'a pas été complètement assouvi, il pourra se reporter à la bibliographie et procéder à une analyse plus fouillée sur les points qui l'intéressent. Les références listées sont pour la plupart consultables au Centre national de documentation de l'ADEME à Angers, ouvert au public (prendre RDV).

Isabelle Feix
Département Gestion biologique et Sols – ADEME



1.

Rappels

sur les éléments-traces I

1.1. Terminologie

1.1.1. Définition des métaux et métalloïdes

Les éléments chimiques sont désignés par des symboles chimiques (C pour carbone, Pb pour plomb) et classés dans la table périodique, encore appelée tableau de Mendeleïev (Figure 1.1). Comme les lettres de l'alphabet se combinent pour former des mots, les éléments chimiques se combinent pour former des molécules, base de toute matière.

La table périodique est constituée de 7 lignes horizontales (périodes ou séries) et 16 colonnes verticales (groupes ou familles). Les éléments d'un même groupe se ressemblent généralement du point de vue comportement chimique, tandis que dans une période donnée, les éléments varient progressivement, avec des caractères très électropositifs (éléments métalliques) sur le côté gauche du tableau, jusqu'à des caractères très électronégatifs (éléments non métalliques) sur le côté droit. **Les métaux** sont caractérisés par l'existence d'un réseau métallique à l'état solide (des ions positifs dans une mer d'électrons) et par une tendance à céder des électrons (s'oxyder).

Les 6 gaz rares inertes (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) plus les halogènes (F, Cl, Br, I, At), l'H, le B, le C, l'N, l'O, le P et le S sont des non-métaux. Si, Ge, **As, Se, Sb** et Te sont des **métalloïdes** (qui ont un caractère métallique partiel ou peuvent exister sous des formes métalliques ou non métalliques). Les 68 éléments naturels restants sont des métaux et ont, sous leur forme élémentaire pure, des caractères physiques communs : bonne conductivité électrique et thermique, haute densité, malléabilité et ductilité (Bargagli, 1998).

À la différence des produits phytosanitaires ou du nylon, qui sont des molécules de synthèse produites par l'homme, les éléments sont tous présents de façon naturelle et normale dans la croûte

terrestre. Ils se combinent avec d'autres éléments chimiques pour former des composés minéraux et organo-minéraux plus ou moins stables.

1.1.2. Définition des éléments-traces

Les éléments sont dits *traces* par rapport à leur concentration massique dans un certain milieu. Lorsque leur teneur est inférieure à un pour mille en moyenne dans la croûte terrestre, ce sont des éléments-traces de la croûte. Lorsque leur concentration est inférieure à 0,1 pour mille dans les êtres vivants (certains auteurs donnant une limite de 1 % dans les plantes), ils sont qualifiés d'éléments-traces des êtres vivants. Certains métaux sont des éléments majeurs (Ca, Mg, K), d'autres des éléments-traces (Zn, Cd, Cu, Co, Cr, Tl, Hg, Ni, Mo, Pb). Certains métalloïdes ou non-métaux sont des éléments majeurs (C, O), d'autres des éléments-traces (Se, As).

Le carbone et l'azote sont des éléments-traces dans la croûte terrestre, mais des éléments majeurs chez les animaux et les végétaux. À l'inverse, le fer, le manganèse et l'aluminium sont des éléments majeurs dans la croûte terrestre, alors qu'ils sont présents à l'état de traces dans les êtres vivants.

1.1.3. Définition des métaux lourds, micro-polluants métalliques, oligo-éléments, contaminants stricts

La dénomination élément-trace est parfois confondue avec celles de métal lourd, de micro-polluant métallique ou encore d'oligo-élément.

Le terme de **micro-polluant métallique** implique trois notions :

- élément-trace,
- qui pollue (c'est-à-dire dont l'accumulation, au-delà d'un certain seuil dans le milieu, revêt un danger pour les organismes),
- métallique.

Les **oligo-éléments** sont des éléments-traces indispensables aux êtres vivants. Ceux-ci sont carencés si la concentration de ces éléments dans leurs tissus est inférieure à un seuil. Les oligo-éléments ne sont pas les mêmes pour les animaux et pour les plantes.

Les éléments dont le caractère essentiel pour les êtres vivants n'a pas été démontré sont appelés **contaminants stricts**. Il en résulte la classification suivante pour l'homme (Tableau 1.1).

Tableau 1.1: Classification des oligo-éléments et des contaminants stricts.

<p>Pour l'homme (étudiés dans ce document)</p> <p>Oligo-éléments à risque élevé de carence</p> <p>Oligo-éléments à faible risque de carence (non prouvée chez l'homme)</p> <p>Contaminants stricts</p>	<p>Cu, Zn, Se, Cr, Mo</p> <p>Ni, Co, As</p> <p>Pb, Cd, Hg, Tl</p>
<p>Pour les plantes supérieures (Bargagli, 1998)</p> <p>Éléments essentiels</p> <p>Éléments bénéfiques</p> <p>Contaminants stricts</p>	<p>B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn</p> <p>Cl, Cr, F, I, Li, Na, Ni, Rb, Se, Si, Sr, Ti, V</p> <p>Br, Cd</p>

Les **métaux lourds** sont des métaux formant des précipités insolubles avec les sulfures. D'autres définitions existent : métaux dont la masse volumique est supérieure à 6 g.mL^{-1} (parfois la définition donne une limite de $4,5$ ou $5,0 \text{ g.mL}^{-1}$); métal dont le numéro atomique est supérieur à 20.

Les métaux lourds sont réputés toxiques, alors que certains sont des oligo-éléments (Cu, Zn, Fe). C'est pourquoi le terme de métal lourd est souvent appliqué à tort à des éléments en raison de leur toxicité. De plus, certains éléments sont déclarés métaux lourds alors qu'ils sont des métalloïdes (Se, As) ou qu'ils ne sont pas « lourds » (Be, Al). De fait, il est préférable de ne pas utiliser ce vocable, devenu ambigu.

1.2. Cycles bio-géochimiques des éléments-traces

1.2.1. Généralités sur les cycles bio-géochimiques des éléments-traces

Les teneurs en éléments-traces sont variables selon les types de roches. Certaines roches ont des concentrations très élevées en éléments-traces (jusqu'à plusieurs pour cent), et sont qualifiées de minerais. Le sol résulte de l'altération de la roche mère sous-jacente sous l'influence de processus physiques, chimiques et biologiques. Les éléments-traces présents dans les roches se retrouvent donc dans les sols, à des teneurs variables selon la composition initiale de la roche mère et le type de pédogenèse qui a eu lieu. De même, les éléments-traces sont présents dans tous les autres compartiments de l'environnement de façon naturelle et normale, dans les eaux, dans l'air et dans les êtres vivants.

À l'échelle planétaire, les quantités d'éléments-traces sont toujours les mêmes. Par contre leur localisation et leur forme chimique peuvent être modifiées par des phénomènes naturels ou par l'intervention de l'homme. Par exemple, l'exploitation d'un minerai de Pb (prélevé à plusieurs dizaines ou centaines de mètres de profondeur) disperse l'élément dans la biosphère (qui présente quelques mètres d'épaisseur) autour de la mine, puis autour des usines métallurgiques (avec augmentation des

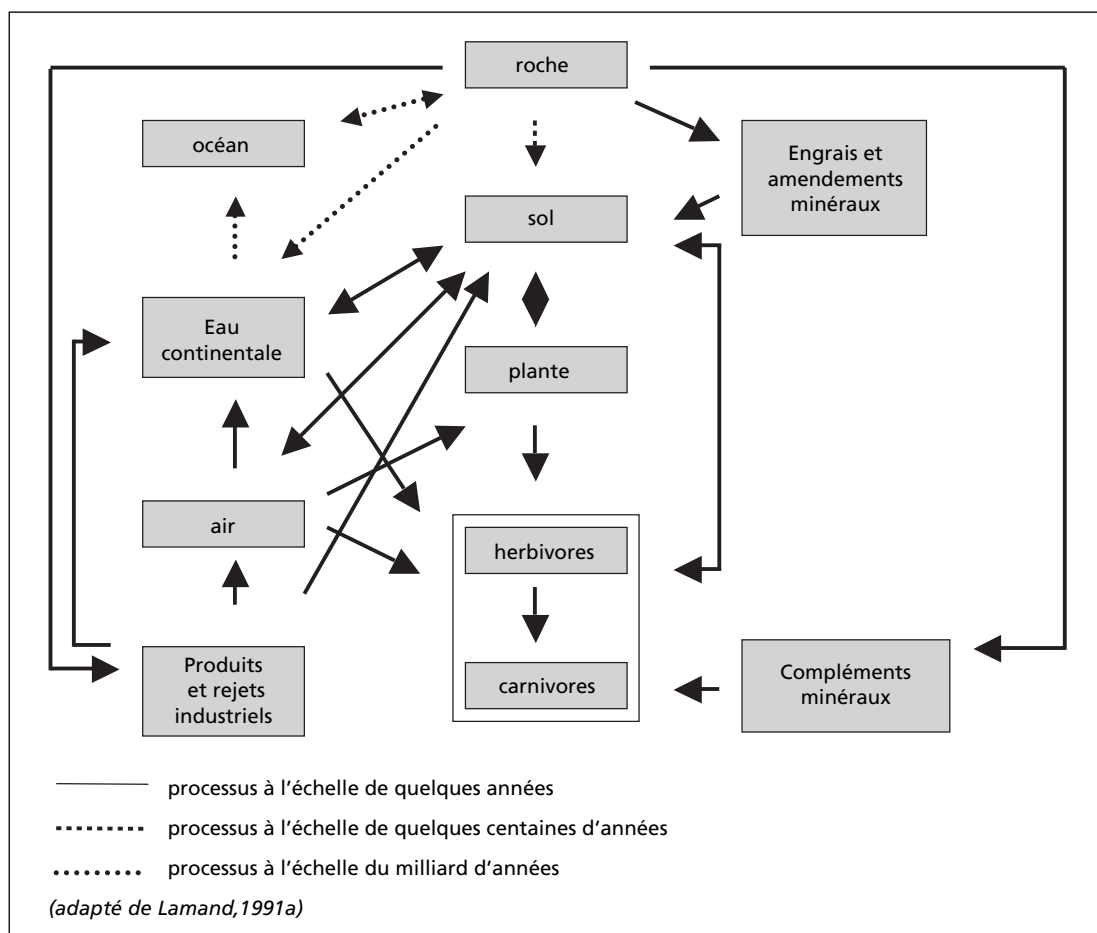


Figure 1.2: Cycle des éléments-traces au sein de la biosphère.

(Juste, 1988); *mobilité spatiale*: aptitude d'un élément à se déplacer dans un profil de sol; la mobilité chimique et la mobilité spatiale sont liées.

MB: matière brute, encore appelée matière fraîche. Les concentrations sont parfois exprimées sur la base de la matière brute, par exemple en mg de nickel par g de pulpe de betterave brute, non séchée. Cette façon de faire prévaut dans le domaine alimentaire, car les données de consommation sont en matière brute.

MS: matière sèche: les concentrations sont souvent exprimées sur la base de la matière sèche, par exemple en mg de nickel par g de terre sèche. Ceci permet de comparer les concentrations, sans tenir compte du taux d'humidité des différentes matrices (terres, végétaux, etc.).

Ni: symbole chimique du nickel.

NOAEL: *no observed adverse effect level*. C'est la dose la plus élevée pour laquelle on n'observe pas d'effet toxique.

Norme: document établi par consensus et approuvé par un organisme reconnu (AFNOR, BSI, DIN, NNI, CEN, ISO, etc.), qui fournit, par des usages communs et répétés, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal, dans un contexte donné. La norme est volontaire et marque la volonté de son utilisateur de s'aligner sur les bonnes pratiques reconnues (Mathieu, 1996). La norme (pour une démarche, un procédé, une méthode d'échantillonnage ou d'analyse, etc.) ne doit pas être confondue avec les seuils (chiffres).

Oligo-élément: micro-élément indispensable à un être vivant, qui présente des carences si sa concentration est inférieure à un seuil. Les oligo-éléments ne sont pas tout à fait les mêmes pour les plantes, les animaux et les micro-organismes. Les oligo-éléments sont toxiques au-delà d'un seuil (Juste, 1993).

Oxydation: perte d'électron.

Pb: symbole chimique du plomb.

Phloème: dans la plante, vaisseau conducteur de sève élaborée.

Phyto Disponibilité: capacité de substances à être prélevées par les plantes (ISO, 1993).

Phytosidérophore: molécule excrétée par les racines de certaines graminées, formant des complexes assimilables par les racines avec les métaux du sol (Fe, Zn, Cd).

ppb: partie par billion: $\mu\text{g.kg}^{-1}$, ng.g^{-1} , $\mu\text{g.L}^{-1}$, ng.mL^{-1} .

ppm: partie par million: mg.kg^{-1} , $\mu\text{g.g}^{-1}$, mg.L^{-1} , $\mu\text{g.mL}^{-1}$.

Réduction: gain d'électron.

RfD: *reference dose* en anglais: limite de sécurité en français. C'est la dose pour laquelle il est raisonnable de penser que la probabilité d'observer un effet indésirable est la plus faible possible, en tenant compte des différences de sensibilité pouvant exister entre les individus:

$$\text{RfD} = \frac{\text{NOAL}}{\text{facteur de sécurité}}$$

avec facteur de sécurité = 10 en général (CSHPF, 1996b).

Rhizosphère: volume de sol en interaction avec la racine.

Se: symbole chimique du sélénium.

Sidérophore: molécule excrétée par certaines bactéries, formant des complexes assimilables par les racines avec les métaux du sol.

Solution du sol: eau du sol contenant des solutés (éléments majeurs et traces, matière organique soluble).

Spéciation: formes chimiques d'un élément dans un milieu (dans le sol, dans les tissus végétaux, etc.).

Stomate: cellule végétale par laquelle entrent et sortent les gaz (vapeur d'eau, dioxyde de carbone).

Sytoplasme: milieu intérieur de la cellule (à l'intérieur de la membrane plasmique).

Tl: symbole chimique du thallium.

Valence: un élément est à l'état de valence I (monovalent) s'il a perdu un électron, à l'état II (divalent) s'il en a perdu deux, etc.

Valeur guide: valeur recommandée par une autorité sans obligation légale (ISO, 1993). Seuil non réglementaire. Par exemple les seuils en Pb, Hg et Cd dans les aliments émanant du CSHPF sont des valeurs guide.

Valeur légale contraignante: valeur contraignante produite par la législation (ISO, 1993). Seuil réglementaire.

Xylème: dans la plante, vaisseau conducteur de sève brute.

Zn: symbole chimique du zinc.