



Mercure dans le sol: établissement d'une valeur d'assainissement selon l'OSites et de seuils d'investigation selon l'Osol

Mai 2013

Rapport sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Mentions légales

Mandant

Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Sols et biotechnologie, CH-3003 Berne
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire

Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Reckenholz

Auteurs

Denise Portmann, René Reiser, Reto Meuli (Station de recherche ART)

Accompagnement OFEV

Christiane Wermeille, Roland von Arx, Christoph Reusser

Le présent rapport a été réalisé sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Table des matières

Mercure dans le sol: établissement d'une valeur d'assainissement selon l'OSites et de seuils d'investigation selon l'OSol.....	1
1. Introduction	8
1.1 Contexte et mandat.....	9
1.2 Le mercure.....	10
1.3 La législation suisse	10
2. Seuils d'investigation et valeurs d'assainissement à l'étranger.....	13
2.1 Valeurs indicatives	14
2.2 Seuils d'investigation.....	14
2.3 Valeurs d'assainissement.....	15
2.4 Conclusions	16
3. Etablissement de seuils d'investigation et de valeurs d'assainissement selon la directive de l'OFEFP de 1998.....	18
3.1 Méthodes de détermination	18
3.1.1 Principe.....	18
3.1.2 Méthodes appliquées à la voie de contamination « plantes alimentaires ».....	19
3.1.3 Méthodes appliquées à la voie de contamination « plantes fourragères »	21
3.1.4 Voie de contamination « croissance des plantes »	23
3.1.5 Agrégation des voies de contamination pour établir la valeur d'assainissement.....	23
3.2 Matériel et méthodes.....	23
3.2.1 Données.....	23
3.2.2 Hypothèses et démarche pratique	26
3.3 Résultats.....	28
3.3.1 Seuils d'investigation.....	28
3.3.2 Valeur d'assainissement.....	32
3.4 Evaluation critique et recommandations.....	36
3.5 Discussion.....	42
4. Perspectives	43
5. Références bibliographiques	44
6. Annexes.....	48

Figures

Figure 1: Les trois catégories appliquées pour classer les valeurs limites en vigueur à l'étranger: « source », « genre d'utilisation » et « type de valeur limite ». Les données figurant dans le secteur d'intersection, qui relèvent tout à la fois de l'agriculture, des lois et ordonnances et des seuils d'investigation et valeurs d'assainissement, ont été prises en compte dans la suite de l'étude.	13
Figure 2: Insertion des valeurs limites appliquées à l'étranger dans le schéma suisse des seuils d'investigation et des valeurs d'assainissement, avec la zone intermédiaire entre ces derniers (BEL: Belgique (Flandre), CAN: Canada, ESP: Espagne (Catalogne), FIN: Finlande, GER: Allemagne, LTU: Lituanie, MAS: Malaisie, SUI: Suisse, SWE: Suède). Aucune législation étrangère n'est aussi sévère que l'OSites suisse lorsqu'il s'agit d'ordonner des mesures d'assainissement.	17
Figure 3: Exemple tiré de la directive de l'OFEFP [2]. Diagramme de points illustrant les teneurs en plomb dans le sol et dans les plantes pour l'épinard, avec indication du scénario du meilleur des cas (transfert minimal) et du pire des cas (transfert maximal). Le seuil d'investigation correspond à l'intersection entre les droites décrivant la valeur de tolérance selon l'OSEC et le transfert maximal [2].	20
Figure 4: Exemple tiré de la directive de l'OFEFP [2]. Diagramme de points illustrant les teneurs en plomb dans le sol et dans les plantes pour l'épinard, avec indication du scénario du meilleur des cas (transfert minimal) et du pire des cas (transfert maximal). La valeur d'assainissement correspond à l'intersection entre les droites décrivant la valeur limite selon l'OSEC et le transfert minimal [2]. Celle qui concerne le plomb tombe ici aux environs de 1500 mg/kg. Mais la valeur d'assainissement fixée en fin de compte découle des cultures fourragères et elle se monte à 2000 mg/kg.	21
Figure 5: Exemple du cadmium, tiré de la directive de l'OFEFP [2]. Diagramme de points illustrant les teneurs dans le sol et dans la plante pour l'herbe, avec indication du scénario du meilleur des cas (transfert minimal) et du pire des cas (transfert maximal) [2].	22
Figure 6: Etablissement du seuil d'investigation applicable à la voie de contamination « plantes alimentaires ». Détermination du transfert maximal sol-plante selon le scénario du pire des cas réalistes. a) Tous les points. b) Agrandissement du secteur des concentrations dans le sol comprises entre 0 et 5 mg/kg et des concentrations dans les plantes comprises entre 0 et 2 mg/kg.	29
Figure 7: Etablissement du seuil d'investigation applicable à la voie de contamination « plantes fourragères ». a) Vue d'ensemble (concentration dans le sol comprise entre 0 et 60 mg/kg et dans la plante entre 0 et 3 mg/kg). b) Vue de détail (concentration dans le sol comprise entre 0 et 8 mg/kg et dans la plante entre 0 et 2 mg/kg). Les seuils d'investigation ont été calculés en introduisant les paramètres du tableau 7 dans l'équation 1.	31
Figure 8: Etablissement de la valeur d'assainissement applicable à la voie de contamination « plantes alimentaires ». Calcul du transfert minimal sol-plante selon le scénario du meilleur des cas.	32
Figure 9: Etablissement de la valeur d'assainissement applicable à la voie de contamination « plantes fourragères ». a) Vue d'ensemble (concentration dans le sol comprise entre 0 et 60 mg/kg et dans la plante entre 0 et 3 mg/kg). b) Vue de détail (concentration dans le sol comprise entre 0 et 25 mg/kg et dans la plante entre 0 et 0,5 mg/kg). La valeur d'assainissement a été calculée en introduisant les paramètres du tableau 9 dans l'équation 1.	34
Figure 10: Relation entre le seuil d'investigation relatif aux cultures fourragères calculé avec l'équation 1 et la pente de la droite décrivant le transfert sol-plante (a) pour le mouton et pour le bœuf.	37
Figure 11: Fréquence cumulée des valeurs d'assainissement calculées à partir des facteurs de transfert. A: Teneur en mercure dans le sol de 0,1 à 20 mg/kg. B: Teneur en mercure dans le sol limitée au domaine de 2 à 20 mg/kg.	40
Figure 12: Solubilité du Hg^{2+} en fonction du pH en présence de différents matériaux adsorbants (tiré de [51]).	41

Tableaux

Tableau 1: Synthèse des seuils d'investigation pratiqués à l'étranger (annexe 2, tableau 2): fourchette, moyenne et médiane en mg/kg selon le genre d'utilisation du sol.	14
Tableau 2: Seuils d'investigation pratiqués à l'étranger en comparaison avec la valeur appliquée à l'agriculture en Suisse, avec indication de la source et du pays.	15
Tableau 3: Valeurs d'assainissement appliquées à l'utilisation agricole du sol, avec indication de la source et du pays.	16
Tableau 4: Comparaison entre les études dont les données ont été exploitées pour établir les seuils d'investigation et les valeurs d'assainissement appliqués au mercure (utilisation agricole du sol).	24
Tableau 5: Valeurs assignées à l'ingestion directe de terre (d) par des animaux d'élevage lors de la pâture [2].	27
Tableau 6: Paramètres utilisés pour estimer le seuil d'investigation applicable aux plantes alimentaires selon le scénario du PCR (absorption maximale par les plantes) et seuil d'investigation résultant.	28
Tableau 7: Paramètres utilisés dans l'équation 1 pour estimer les seuils d'investigation applicables aux plantes fourragères selon le scénario du PCR (transfert maximal sol-plante, mouton) et seuils d'investigation résultants.	30
Tableau 8: Paramètres utilisés pour estimer la valeur d'assainissement applicable aux plantes alimentaires selon le scénario du MC (transfert minimal sol-plante) et valeur d'assainissement résultante.	32
Tableau 9: Paramètres utilisés dans l'équation 1 pour estimer la valeur d'assainissement applicable aux plantes fourragères selon le scénario du MC (transfert minimal sol-plante, bœuf) et valeur d'assainissement résultante.	33
Tableau 10: Teneurs en mercure recommandées pour fixer les seuils d'investigation applicables aux cultures alimentaires et aux cultures fourragères selon l'OSol et pour fixer la valeur d'assainissement applicable à l'agriculture et à l'horticulture selon l'OSites.	36
Tableau 11: Comparaison internationale entre les seuils d'investigation relatifs au mercure, au plomb, au cadmium, au cuivre et au zinc assignés aux sols agricoles.	38
Tableau 12: Comparaison internationale entre les valeurs d'assainissement relatives au mercure, au plomb, au cadmium, au cuivre et au zinc assignées aux sols agricoles.	39

Groupe de suivi

Roland Von Arx	OFEV
Christiane Wermeille	OFEV
Christoph Reusser	OFEV
Nicolas Broccard	Service de la protection de l'environnement du canton du Valais
Stéphanie Jüstrich	Service de la protection de l'environnement du canton du Valais

Abréviations

ART	Agroscope Reckenholz-Tänikon
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz (Allemagne)
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Allemagne)
BEL	Belgique
CA	Cultures alimentaires
CAN	Canada
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment
Cd	Cadmium
CF	Cultures fourragères
CP	Croissance des plantes
DHTP	Dose hebdomadaire tolérable provisoire
EnvFin	Ministry of the Environment (Finlande)
EPA	Environmental Protection Agency (Etats-Unis)
ESP	Espagne
FAO	Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FIN	Finlande
GENCAT	Generalitat de Catalunya (gouvernement de Catalogne, Espagne)
GER	Allemagne
Hg	Mercure
HgSO ₄	Sulfate de mercure
LPE	Loi sur la protection de l'environnement
MC	Meilleur des cas
NEPM	National Environmental Protection Measure (Australie)
OFEFP	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OLALA	Ordonnance sur le Livre des aliments pour animaux
OMS	Organisation mondiale de la santé
OSEC	Ordonnance sur les substances étrangères et les composants
OSites	Ordonnance sur les sites contaminés
OSol	Ordonnance sur les atteintes portées aux sols
OVAM	De Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (Société publique des déchets de la Région flamande; Belgique)
Pb	Plomb
PCR	Pire des cas réalistes
SFT	Statens Forurensningstilsyn (Norwegian Pollution Control Authority)
SUI	Suisse
SWE	Suède
VROM	Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment; Pays-Bas)
ZEBS	Zentrale Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien (Allemagne)

Résumé

L'ordonnance sur les sites contaminés (OSites) et l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) ne prescrivent aucune valeur d'assainissement ni seuil d'investigation pour le mercure. Devant cet état de fait, la Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), qui dispose de compétences dans la protection du sol, a été chargée d'établir ces valeurs limites pour les sols agricoles et de formuler des recommandations à ce sujet.

Une revue des valeurs limites mises en œuvre à l'étranger, susceptibles d'être utilisées en Suisse, a fourni des seuils d'investigation compris entre 0,362 mg/kg (Malaisie) et 5 mg/kg (Allemagne) et des valeurs d'assainissement comprises entre 2 mg/kg (Allemagne, Finlande) et 6,6 mg/kg (Canada). Mais ces chiffres ne peuvent pas être repris tels quels, car leur définition et leur champ d'application ne correspondent pas à la manière helvétique d'exécuter la législation en la matière. Il a donc été décidé de déterminer les valeurs limites recherchées en suivant la directive de l'OFEFP intitulée « Etablissement de seuils d'investigation et de valeurs d'assainissement pour les polluants inorganiques dans les sols » (Documents environnement n° 83, Sol, de 1998), sachant que l'adoption d'une méthode similaire permet de comparer directement les seuils obtenus avec ceux qui sont déjà pratiqués pour le plomb, le cadmium, le cuivre et le zinc. Cette similitude méthodologique a été jugée plus importante que l'existence éventuelle d'une approche plus moderne telle que la modélisation numérique.

La directive de l'OFEFP susmentionnée distingue les plantes alimentaires, les plantes fourragères et la croissance des plantes parmi les voies de contamination à partir des sols agricoles. Les seuils d'investigation correspondant aux cultures alimentaires et aux cultures fourragères sont établis en considérant les deux premières voies. La valeur d'assainissement relative à l'agriculture et à l'horticulture est fixée en agrégeant les trois vecteurs.

Les seuils d'investigation sont déterminés en appliquant le scénario du pire des cas réalistes. On admet que le transfert de polluant du sol aux plantes est maximal, puis on établit la teneur en polluant dans le sol pour laquelle la concentration résultante dans les plantes dépasse la limite tolérée dans les aliments ou dans le fourrage. Pour ce qui est de la nourriture des animaux d'élevage, on considère l'ingestion directe maximale de terre par le plus sensible d'entre eux.

Les valeurs d'assainissement sont déterminées d'une manière similaire, mais en appliquant le scénario du meilleur des cas. On admet que le transfert de polluant du sol aux plantes est minimal et on considère aussi l'ingestion directe minimale de terre par l'animal d'élevage moins sensible.

Le transfert minimal et maximal de mercure du sol aux plantes alimentaires et fourragères a été estimé à partir de données expérimentales tirées de la littérature spécialisée. La valeur limite assignée au mercure dans ces plantes (0,5 et 0,114 mg/kg) a été estimée ou tirée de l'ordonnance sur le Livre des aliments pour animaux (OLALA).

Le seuil d'investigation ainsi obtenu pour les cultures fourragères – de 0,05 et 0,15 mg/kg selon la variante – a surtout découlé de l'ingestion directe de sol. C'est pourquoi il est recommandé de fixer comme seuil d'investigation pour ces cultures la valeur indicative de l'OSol, de 0,5 mg/kg, au.

Cette méthode a fourni un seuil d'investigation de 0,85 mg/kg pour les légumes. Mais aucune valeur utilisable du transfert du sol aux végétaux n'a été trouvée pour d'autres plantes alimentaires comme les céréales, les oléagineux, les fruits et les baies. Pour éviter tout risque lié à ces inconnues, il est préférable de ne pas poser la limite à 0,85 mg/kg pour les plantes alimentaires, mais de l'arrondir à la valeur indicative de l'OSol de 0,5 mg/kg. La directive de l'OFEFP préconise par ailleurs de ne fixer des seuils d'investigation différents que lorsque l'écart entre eux est suffisamment grand en regard de l'incertitude des mesures, ce qui était l'arrondi à 0,5 mg/kg.

En ce qui concerne la valeur d'assainissement relative à l'agriculture et à l'horticulture, la contamination via les plantes alimentaires et les plantes fourragères a donné, respectivement, une concentration limite de 20 mg/kg et de 10 mg/kg. Une teneur maximale de 50 mg/kg a été assignée à la contamination via la croissance des plantes sur la base de chiffres trouvés dans la littérature. L'agrégation des trois voies de contamination conduit à recommander une valeur d'assainissement de 20 mg/kg.

Synthèse des valeurs limites recommandées:

	Cultures alimentaires	Cultures fourragères
Seuil d'investigation	0,5 mg/kg	0,5 mg/kg
Valeur d'assainissement	20 mg/kg	

Ces résultats sont entachés d'incertitudes. D'une part, les données expérimentales disponibles sont très disparates, ce qui a occasionné un grand écart entre le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement. D'autre part, les données concernant la contamination via les plantes alimentaires sont relativement peu nombreuses (61 paires sol-plante contre 126 pour les plantes fourragères). Elles ont donc été agrégées dans un corpus de données, ce qui a empêché de traiter séparément les différentes espèces comme prévu initialement. Il a aussi fallu estimer une valeur limite correspondant aux plantes alimentaires représentées dans ce corpus de données, sans pouvoir la tirer de l'ordonnance sur les substances étrangères et les composants (OSEC) comme envisagé dans un premier temps.

La valeur d'assainissement déterminée pour la culture des plantes alimentaires est entachée des mêmes incertitudes. Une analyse de sa plausibilité faisant appel à des facteurs de transfert sol-plante publiés a confirmé l'énorme dispersion des données expérimentales utilisées pour l'établir. La valeur proposée correspond au 30^e percentile des valeurs d'assainissement calculées à partir de facteurs de transfert (75 valeurs dans la fourchette de 1-200 mg/kg). Comme la sécurité alimentaire est garantie par l'obligation d'étudier la menace imputable aux sols qui présentent des teneurs en polluant supérieures au seuil d'investigation, il est possible de recommander sans grand risque une valeur d'assainissement assez élevée en comparaison internationale.

Il y avait également lieu d'examiner l'incidence du méthylmercure et de voir s'il doit faire l'objet de valeurs limites distinctes, comme c'est notamment le cas au Pays-Bas.

On obtiendrait parfois de meilleures corrélations entre les concentrations de mercure dans le sol et dans les plantes en considérant les teneurs solubles dans le sol au lieu des teneurs totales comme ici. Cela permettrait de fixer des valeurs limites plus solidement étayées.

1. Introduction

1.1 Contexte et mandat

En Valais, des investigations réalisées dans le cadre du suivi environnemental du chantier de l'auto-route A9 ont indiqué que le sol était pollué par du mercure à plusieurs endroits entre Viège et Niedergesteln. Le Service cantonal de la protection de l'environnement a donc ordonné une investigation historique au sens de l'ordonnance sur les sites contaminés (OSites). Elle a révélé que le Grossgrundkanal a été souillé par des eaux industrielles rejetées par l'entreprise Lonza AG entre les années 1930 et 1970. Du mercure contenu dans ces eaux usées s'est accumulé dans les sédiments du canal. Lors de travaux d'entretien effectués entre 1930 et le début des années 1990, les boues et les sédiments contaminés ont été retirés du canal et épandus sur des terres agricoles avoisinantes [1], aussi faut-il s'attendre à ce que des terrains voués à l'agriculture renferment du mercure. L'OSites demande, en cas de pollution par des métaux lourds, que les surfaces devant être assainies soient délimitées, mais elle ne fixe aucune concentration limite (valeur d'assainissement) pour le mercure.

La présente étude devait établir la concentration limite de mercure à considérer pour évaluer les besoins d'assainissement des sols selon l'OSites (annexe 3, point 1 « Sites utilisés à des fins agricoles ou horticoles »). Elle visait également à fixer des seuils d'investigation au sens de l'OSol (annexe 1) afin d'appréhender la menace potentiellement occasionnée par la production agricole. Le but consistait à définir pour le mercure des seuils d'investigation et une valeur d'assainissement de portée générale, c'est pourquoi ce projet ne s'est pas spécifiquement attaché au contexte valaisan. Sa réalisation a été confiée à la Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, qui dispose de compétences dans la protection du sol.

L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et la Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) ont conclu à cet effet un contrat basé sur la requête du service valaisan de la protection de l'environnement du 15 février 2012 et sur l'offre de l'ART du 12 juillet 2012. Le projet a été financé conjointement par l'OFEV et par le canton du Valais.

Le mandat comprenait les volets suivants:

- Recherche: passer en revue la bibliographie disponible pour trouver des valeurs d'assainissement déjà appliquées au mercure dans des pays dotés de normes environnementales élevées. La recherche devait porter sur la littérature scientifique et sur les moteurs de recherche sur Internet librement accessibles. Elle devait être complétée par une enquête auprès d'experts suisses et étrangers.
- Evaluation critique des valeurs d'assainissement trouvées: évaluer d'un œil critique les méthodes appliquées pour établir les valeurs d'assainissement trouvées. Les données expérimentales et les études utilisées devaient être acquises, vérifiées et évaluées dans la perspective actuelle.
- Assurance de la qualité: étayer les valeurs d'assainissement trouvées par de nouvelles estimations. La méthode mise en œuvre devait être conforme à la directive de l'OFEFP intitulée « Etablissement de seuils d'investigation et de valeurs d'assainissement pour les polluants inorganiques dans les sols » (Documents environnement n° 83, Sol, de 1998) [2]. La comparabilité avec les valeurs d'assainissement qui figurent déjà dans l'OSites pour d'autres substances est ainsi assurée. Les données nécessaires à cet effet sur les transferts de polluants entre le sol et les plantes devaient être tirées de la littérature – pour autant qu'elles s'y trouvent. Aucune expérience ne devait être réalisée par le mandataire pour des raisons de coûts. Comme les seuils d'investigation selon l'OSol découlent des mêmes données, il y avait lieu de les estimer par la même occasion. L'estimation de la valeur d'assainissement et des seuils d'investigation dépendait toutefois de l'existence et de la qualité des données expérimentales disponibles.

Les composés organo-mercuriels, comme le méthylmercure, ne doivent être considérés que dans la concentration totale de mercure. La détermination de valeurs limites spécifiques dues à la toxicité particulière des composés organiques renfermant du mercure sort du cadre de ce mandat.

1.2 Le mercure

Le mercure apparaît dans la nature sous trois formes: (i) comme élément pur (Hg^0) à l'état gazeux dans l'atmosphère (vapeur de mercure) ou à l'état liquide (mercure métallique), (ii) dans des composés inorganiques en combinaison avec des éléments non métalliques comme le soufre ou le chlore et (iii) dans des composés organiques. Le mercure et ses composés réagissent fortement avec les groupes aminés et sulfhydryles, ce qui affecte le bon fonctionnement des enzymes et des protéines structurales dans le corps. Le système nerveux central est l'organe le plus sensible [3].

Le mercure élémentaire est principalement absorbé par inhalation de vapeur de mercure. En cas d'exposition importante, il peut déjà provoquer des inflammations des bronches, la plupart du temps accompagnées d'une détresse respiratoire et d'une cyanose. Les effets des contaminations chroniques sont des tremblements, des altérations du caractère et des troubles de la mémoire immédiate. Les reins sont également des organes cibles susceptibles d'être endommagés. Les composés inorganiques sont très corrosifs. En cas d'ingestion, ils provoquent des brûlures de la gorge et de l'œsophage, des vomissements, des collapsus circulatoires et des chocs mortels dans le pire des cas. Parmi les composés organiques du mercure, les plus toxiques sont les composés de mercure alkyle à courte chaîne comme le méthylmercure. Ce dernier se forme naturellement suite à la méthylation du mercure inorganique par les micro-organismes qui se trouvent dans les sédiments et les matières en suspension des milieux aquatiques. Il s'accumule tout au long de la chaîne alimentaire, notamment dans le poisson. Les effets toxiques et chroniques-toxiques du méthylmercure affectent surtout le système nerveux central, avec des conséquences particulièrement graves pendant le développement. En cas d'exposition importante, le méthylmercure peut provoquer des convulsions et des paralysies spastiques, tandis que les expositions chroniques sont à l'origine de cas de cécité, de surdité et de retard du développement mental [3].

Le mercure entre dans la composition de nombreux minéraux naturels, qu'on trouve essentiellement dans les roches magmatiques et les régions volcaniques. Doté d'une grande affinité avec le carbone, il est aussi présent dans le pétrole, le charbon et les schistes. Le mercure était déjà utilisé par les Grecs à des fins médicinales et religieuses. A l'heure actuelle, la combustion de charbon, l'extraction de métaux et diverses opérations industrielles comme la production de ciment sont les principales sources anthropiques de mercure [4].

La population en général est surtout affectée par le méthylmercure ingéré avec le poisson et par les vapeurs de mercure provenant des alliages dentaires (amalgames). L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime qu'une personne peut absorber au maximum 100 μg de méthylmercure et au maximum 300 μg de mercure total par semaine sans que sa santé en soit affectée [3]. A l'occasion d'une révision effectuée en 2010, l'OMS a porté la dose hebdomadaire tolérable provisoire (DHTP) de 0,005 à 0,004 milligramme par kilo de poids corporel [5]. Compte tenu de leur toxicité, le mercure et ses composés sont largement interdits. On n'y recourt plus que dans quelques domaines [3]. L'entreprise Lonza AG a utilisé de grandes quantités de mercure comme catalyseur dans la production d'acétaldéhyde, de chlorure de vinyle et de chlore gazeux [1].

1.3 La législation suisse

Les teneurs limites à respecter en Suisse pour protéger les sols contre les substances chimiques sont fixées dans l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) et dans l'ordonnance sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites). L'OSol a pour but

de préserver la fertilité de la terre sur le long terme. Elle demande à la Confédération et aux cantons d'évaluer et de traiter les sols pollués en fonction de valeurs indicatives, de seuils d'investigation et de valeurs d'assainissement qu'elle énumère [6]. L'OSites vise à garantir l'assainissement des sites pollués s'ils causent des atteintes nuisibles ou incommodes à l'environnement ou s'il existe un danger concret que de telles atteintes apparaissent. Elle indique également les étapes à suivre pour traiter les sites pollués. Son art. 2 les définit comme étant les emplacements d'une étendue limitée pollués par des déchets, ce qui implique les sites de stockage définitif, les aires d'exploitation et les lieux d'accidents. L'ordonnance sur les sites contaminés fixe les valeurs et les mesures d'assainissement à mettre en œuvre. Ces mesures ont pour but d'éliminer les substances dangereuses pour l'environnement (décontamination) ou d'empêcher leur dissémination dans l'environnement (confinement) [7].

En substance, les valeurs limites sont fixées d'après les critères suivants dans l'OSol [6] et dans l'OSites [7]:

- Valeur indicative [6]

Art. 8: Mesures cantonales en cas de dépassement d'une valeur indicative

¹ Si, dans une région donnée, une valeur indicative est dépassée ou si les atteintes portées au sol augmentent fortement, les cantons enquêtent sur les causes des atteintes.

² Ils examinent si les mesures mises en œuvre en vertu des prescriptions de la Confédération dans les domaines de la protection des eaux, de la protection contre les catastrophes, de la protection de l'air, des substances dangereuses pour l'environnement et des organismes, ainsi que des déchets et des atteintes physiques portées au sol suffisent pour empêcher l'accroissement des atteintes dans la région concernée.

³ Lorsque la situation l'exige, les cantons prennent des mesures supplémentaires au sens de l'art. 34, al. 1, LPE. Ils en informent préalablement l'OFEV.

⁴ Les cantons mettent ces mesures en œuvre dans un délai maximum de cinq ans après la constatation de l'atteinte portée au sol. Ils fixent les délais selon l'urgence du cas.

- Seuil d'investigation [6]

Art. 9: Mesures cantonales en cas de dépassement d'un seuil d'investigation

¹ Si, dans une région donnée, une valeur d'assainissement est dépassée, les cantons examinent si la santé de l'homme, des animaux ou des plantes peut être menacée.

² Si tel est le cas, les cantons arrêtent les restrictions d'utilisation nécessaires à l'élimination du risque.

- Valeur d'assainissement [6, 7]

OSol:

Art 10: Mesures prises par les cantons en cas de dépassement d'une valeur d'assainissement

¹ Si, dans une région donnée, une valeur d'assainissement est dépassée, les cantons interdisent les utilisations concernées.

² Dans les régions où l'aménagement du territoire a attribué les sols à l'horticulture, à l'agriculture ou à la sylviculture, ils prescrivent des mesures qui permettent de ramener l'atteinte portée au sol en dessous de la valeur d'assainissement, à un niveau tel que l'utilisation envisagée, conforme au milieu, soit possible sans menacer l'homme, les animaux et les plantes.

OSites:

Art. 12: Protection contre les atteintes portées aux sols:

¹ Un sol qui constitue un site pollué ou une partie de site pollué nécessite un assainissement lorsqu'une substance qu'il contient dépasse la valeur de concentration correspondante fixée à l'annexe 3 (valeurs de concentration

pour l'évaluation du besoin d'assainissement des sols). Cela s'applique aussi aux sols faisant déjà l'objet d'une restriction d'utilisation.

² Les sols qui ne nécessitent pas un assainissement au sens de l'al. 1, même s'ils constituent un site pollué ou une partie de site pollué, et les atteintes portées aux sols par les sites pollués sont évalués selon l'ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols.

2. Seuils d'investigation et valeurs d'assainissement à l'étranger

La recherche dans les réglementations étrangères avait pour but d'examiner s'il est possible de reprendre dans les ordonnances suisses des seuils d'investigation et des valeurs d'assainissement existant déjà – en partant du principe qu'ils ont été établis d'une manière retraçable et toxicologiquement plausible au vu des connaissances actuelles. Les valeurs retenues devaient également correspondre au mode d'exécution prescrit par les ordonnances suisses (conséquences en cas de dépassement).

A côté des investigations bibliographiques, l'ART et l'OFEV ont interrogé des experts suisses et étrangers (la liste des personnes contactées figure à l'annexe 1). Puis les auteurs de l'étude ont attribué les 126 valeurs limites obtenues et trouvées à différents domaines relevant des catégories « source », « genre d'utilisation » et « type de valeur limite » (figure 1). Parmi les types de valeurs limites définis, les valeurs indicatives et les valeurs de fond sont celles en deçà desquelles les personnes, les animaux et l'environnement ne courent aucun danger, les seuils d'investigation représentent les valeurs dont le dépassement requiert une étude de la menace éventuelle et les valeurs d'assainissement sont celles dont le dépassement exige la mise en œuvre de mesures. Seules les données figurant dans le secteur d'intersection, c'est-à-dire qui relèvent tout à la fois de l'agriculture, des lois et ordonnances et des seuils d'investigation et valeurs d'assainissement, ont été prises en compte dans la suite de l'étude. D'autres valeurs trouvées par hasard ont été notées, mais pas examinées spécifiquement. Les 126 valeurs sont énumérées à l'annexe 2, dans différents tableaux tenant compte du type de valeur limite et du genre d'utilisation du sol.

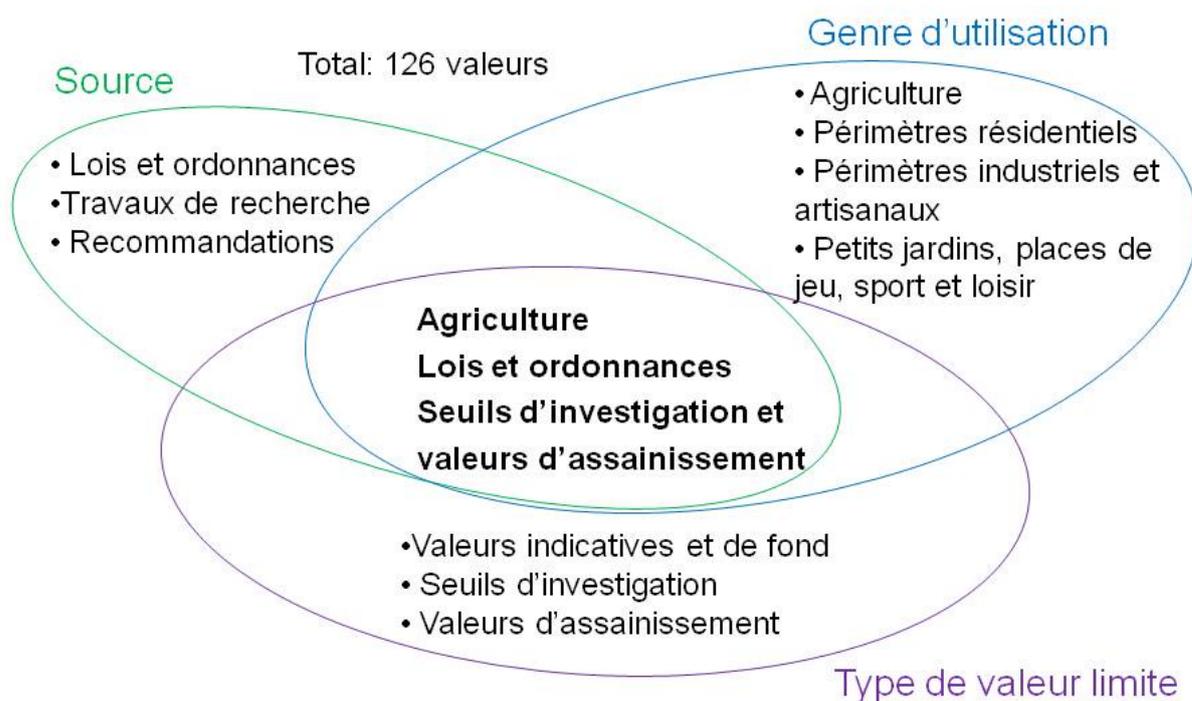


Figure 1: Les trois catégories appliquées pour classer les valeurs limites en vigueur à l'étranger: « source », « genre d'utilisation » et « type de valeur limite ». Les données figurant dans le secteur d'intersection, qui relèvent tout à la fois de l'agriculture, des lois et ordonnances et des seuils d'investigation et valeurs d'assainissement, ont été prises en compte dans la suite de l'étude.

2.1 Valeurs indicatives

Les valeurs indicatives et les valeurs de fond considérées à l'étranger varient entre 0,05 mg/kg (Belgique et Norvège) et 3,5 mg/kg (France). La moyenne des valeurs indicatives trouvées est de 0,6 mg/kg. En Suisse, cette valeur est de 0,5 mg/kg [6].

2.2 Seuils d'investigation

La fourchette, la moyenne et la médiane des seuils d'investigation considérés à l'étranger ont été calculées pour les différentes utilisations du sol (tableau 1). Elles varient fortement dans chaque cas. Certains pays, comme le Royaume-Uni et l'Australie, n'ont assigné aucune limite à l'agriculture. D'autres, comme les Pays-Bas, n'ont pas distingué l'activité agricole dans leurs valeurs limites.

Tableau 1: Synthèse des seuils d'investigation pratiqués à l'étranger (annexe 2, tableau 2): fourchette, moyenne et médiane en mg/kg selon l'utilisation du sol.

	Fourchette	Moyenne	Médiane	Nombre de valeurs
Agriculture	0,362 – 10	2,8	1	7
Périmètres industriels et artisanaux	2 – 4000	580	65	18
Petits jardins, places de jeu, sport et loisir	1 – 400	51	10	19
Périmètres résidentiels	0,83 – 600	74	16	14
Aucune catégorie	0,1 – 36	6,3	2,2	24

Les seuils d'investigation pour les sols agricoles sont indiqués dans le tableau 2. Les chiffres concernant la Malaisie et le Canada sont des valeurs limites recommandées, sans caractère obligatoire.

En vertu de l'OSol, le dépassement du seuil d'investigation impose une étude visant à déterminer si des personnes, des animaux ou des plantes sont menacés concrètement. Si tel est le cas, les cantons limitent l'utilisation du sol de manière à éliminer le danger. Le manuel « Sols pollués – Evaluation de la menace et mesures de protection » [8] se réfère aux valeurs limites établies par Eikmann & Kloke [9] lorsque l'OSol n'en comprend aucune. Selon eux, le seuil d'investigation se monte à 10 mg/kg pour les sols agricoles. Au-dessous de cette teneur, les personnes et les animaux ne sont pas menacés. En Allemagne, d'après la définition de l'ordonnance régissant la protection des sols [10], une étude doit établir si un champ excédant le seuil d'investigation de 5 mg/kg est altéré d'une manière nuisible ou s'il est un site contaminé. En Catalogne, le seuil d'investigation délimite une pollution tolérable en regard de la santé des personnes et des écosystèmes. Lorsque la concentration de 2 mg/kg est dépassée, il y a lieu d'apprécier les risques pour les personnes et pour l'environnement [11]. La Suède a révisé son seuil d'investigation en 2012. Il est désormais fixé à 0,25 mg/kg. Au-delà, un risque d'effets indésirables apparaît par définition et il faut procéder à une étude pour établir si un assainissement est nécessaire [12].

Les définitions diffèrent quelque peu: l'Allemagne, la Suède et Eikmann & Kloke partent du principe que les personnes, les animaux et l'environnement ne courent aucun danger au-dessous du seuil d'investigation, ce qui est le cas pour la valeur indicative dans la législation suisse. Entre la valeur indicative et le seuil d'investigation, la fertilité du sol n'est plus garantie à long terme d'après l'OSol. Le point commun à tous les seuils d'investigation est qu'il faut faire une étude ou analyser les risques en cas de dépassement. Les définitions des seuils d'investigation étrangers invoquées ici sont regroupées dans le tableau 1 de l'annexe 3.

Tableau 2: Seuils d'investigation pratiqués à l'étranger en comparaison avec la valeur utilisée aujourd'hui en Suisse pour les sols agricoles, avec indication de la source et du pays.

Pays	Seuil d'investigation [mg/kg]	Commentaire	Source
Eikmann & Kloke	10		OFEFP [8]
Allemagne	5	Champs	BBodSchV [10]
Canada ¹⁾	0,5		Eisler [13]
Lituanie	0,5		Courriel de K. Kadunas
Malaisie ²⁾	0,362		Eisler [13]
Suède	0,25		EPA [14]
Catalogne	2		GENCAT [11]

¹⁾ Proposed mercury criteria for the protection of selected natural resources

²⁾ Proposed mercury criteria for the protection of human health

2.3 Valeurs d'assainissement

Les valeurs d'assainissement trouvées à l'étranger font l'objet du tableau 3 de l'annexe 2. Celles qui se rapportent à l'agriculture sont synthétisées dans le tableau 3 ci-dessous.

Peu de valeurs d'assainissement trouvées portent sur d'autres domaines que l'agriculture. Une concentration de 5 mg/kg s'applique aux places de jeu en Suisse et aux sites industriels en Finlande. Les autres valeurs ont trait à l'utilisation agricole du sol.

Les 50 mg/kg préconisés par Eikmann & Kloke [9] se distinguent nettement des autres teneurs, qui varient entre 2 et 6,6 mg/kg. Kabata-Pendias & Sadurski [15] attribuent en outre une fourchette générale de 0,5 à 5 mg/kg à la charge de mercure « maximale admissible » dans les sols voués à l'agriculture. Mais cette définition est difficile à classer, car elle pourrait aussi se référer à un seuil d'investigation.

L'OSites prescrit, en cas de dépassement de la valeur d'assainissement, d'interdire l'utilisation du sol touché et d'assainir le site en pratiquant un confinement ou une décontamination [7]. D'après Eikmann & Kloke [9], on ne peut pas exclure toute atteinte aux biens à protéger lorsque la valeur du paramètre du sol « Bodenwert III » est dépassée. Il faut alors se demander comment procéder pour que le site soit utilisable sans danger et l'assainir si nécessaire. En Allemagne, le seuil de déclenchement de mesures est de 2 mg/kg pour les surfaces herbagères. Il est défini comme étant la concentration à partir de laquelle une modification du sol doit être considérée comme nuisible et nécessitant la mise en œuvre de mesures. Sont considérées comme telles la décontamination (élimination totale ou partielle de la pollution), le confinement (immobilisation des polluants ou atténuation de leur dissémination sur le long terme) et les mesures de protection et de limitation (p. ex. restrictions d'utilisation du sol) [10]. Au Canada, le seuil d'assainissement est à 6,6 mg/kg, valeur recommandée par l'agence fédérale en charge de l'environnement. Mais les lois régissant la protection du sol sont édictées par les provinces. L'Alberta, par exemple, a repris directement les teneurs préconisées [16]. Les recommandations canadiennes servent de références pour décider de la réalisation d'investigations plus poussées ou de mesures d'assainissement. Mais elles sont surtout appliquées au sens d'objectifs d'assainissement. Lorsqu'elles sont dépassées, le site doit être assaini. Si cela n'est pas possible pour des raisons techniques ou autres, des restrictions d'utilisation du sol peuvent être prononcées afin de protéger les personnes et l'environnement [17]. La Flandre applique une valeur d'assainissement de 2,9 mg/kg, qui correspond à la pollution du sol présentant un risque considérable pour les personnes et pour l'environnement. Lorsque cette limite est franchie, le site doit être assaini. Sont réputées mesures d'assainissement l'élimination, la neutralisation, l'immobilisation et le confinement des polluants dans le sol. S'il n'est pas possible d'assainir le site avec les meilleurs procédés disponibles sans consentir un coût disproportionné, des restrictions d'utilisation du sol peuvent être prononcées [18]. La Finlande définit sa valeur d'assainissement de 2 mg/kg comme étant un outil aidant à évaluer la pollu-

tion du sol et la nécessité de l'assainir. Lorsqu'elle est dépassée, le terrain doit être remis dans un état tel qu'il ne porte aucune atteinte aux personnes et à l'environnement et ne présente aucun danger pour eux. Mais les mesures à prendre ne font l'objet d'aucune précision [19].

La comparaison de ces valeurs d'assainissement avec la définition suisse de l'OSites révèle que la législation helvétique est nettement plus sévère en la matière. Lorsque la valeur d'assainissement est dépassée, le site doit impérativement être assaini. Il ne suffit pas de modifier son utilisation – ce qui est possible au Canada, en Flandre et en Allemagne. Eikmann & Kloke [9] et la Finlande ne donnent aucune indication précise quant aux mesures à mettre en œuvre. Le point commun à toutes les valeurs d'assainissement est qu'il faut prendre des mesures dans tous les cas où elles sont dépassées. Les définitions des valeurs d'assainissement étrangères invoquées dans cette étude sont regroupées dans le tableau 2 de l'annexe 3.

Tableau 3: Valeurs d'assainissement appliquées aux sols agricoles, avec indication de la source et du pays.

Pays	Valeur d'assainissement [mg/kg]	Commentaire	Source
Eikmann & Kloke	50		OFEFP [8]
Flandre	2,9		OVAM [18]
Allemagne	2	Surfaces herbagères	BBodSchV [10]
Finlande	2	Utilisation du sol autre que l'industrie	EnvFin [19]
Canada	6,6		CCME [17]

2.4 Conclusions

La revue des valeurs limites appliquées au mercure à l'étranger a indiqué que les seuils d'investigation et les valeurs d'assainissement varient fortement d'un pays à l'autre. Il s'est avéré que les seuils étrangers peuvent entrer dans le schéma suisse des valeurs limites (figure 2). Dans tous les pays, le dépassement de ces seuils requiert une évaluation de la menace. Si elle est effective, il faut prendre des mesures pour l'éliminer. A l'étranger, ces mesures consistent souvent en un assainissement, alors qu'en Suisse, seules des restrictions d'utilisation peuvent être prononcées en deçà de la valeur d'assainissement. Par ailleurs, certains seuils de déclenchement de mesures et d'assainissements pratiqués à l'étranger tombent dans une zone intermédiaire entre le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement dans le schéma helvétique (figure 2), car les restrictions d'utilisation y sont aussi admissibles, alors qu'elles ne peuvent être ordonnées en Suisse que dans la fourchette de concentration tombant entre le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement. En Suisse, tout dépassement de la valeur d'assainissement requiert une intervention, car les restrictions d'utilisation ne sont plus admises en vertu de la définition de cette valeur. Vu sous cet angle, il est normal que la valeur d'assainissement soit supérieure dans la législation suisse, alors que le seuil d'investigation, qui déclenche une étude de la menace, est cohérent avec les concentrations appliquées à l'étranger. L'incompatibilité entre les seuils suisses et étrangers a pour conséquence que la valeur d'assainissement, tout du moins, ne peut pas être reprise directement et doit être établie en tenant compte des particularités helvétiques. C'est pourquoi la méthode suivie pour établir les valeurs limites appliquées à l'étranger n'a pas été examinée plus en détail.

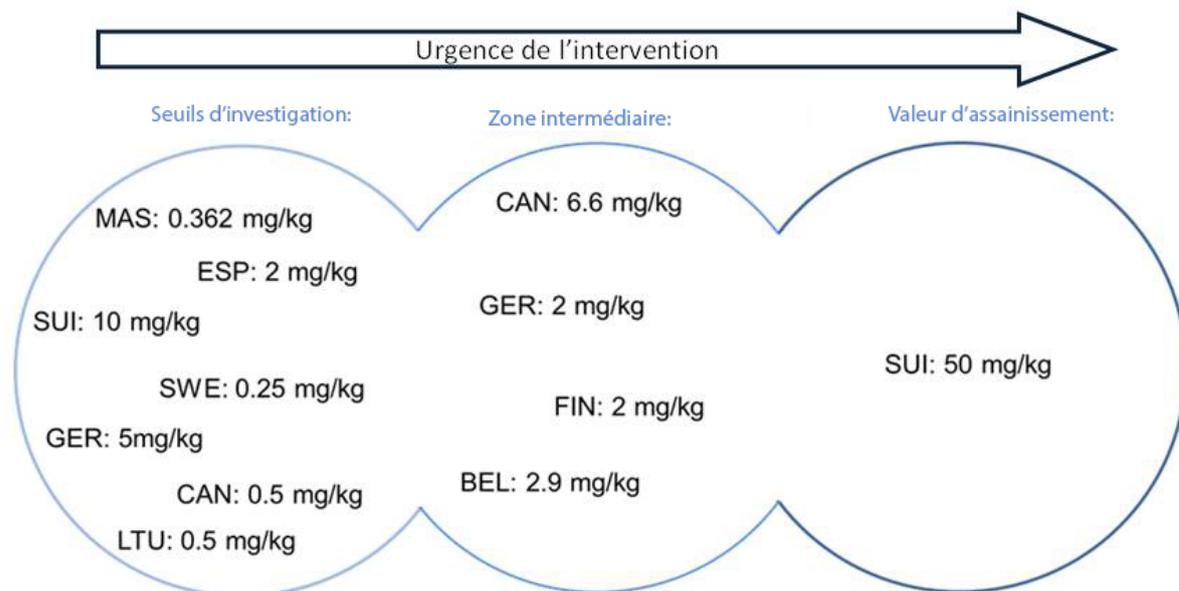


Figure 2: Insertion des valeurs limites appliquées à l'étranger dans le schéma suisse des seuils d'investigation et des valeurs d'assainissement, avec la zone intermédiaire entre ces derniers (BEL: Belgique (Flandre), CAN: Canada, ESP: Espagne (Catalogne), FIN: Finlande, GER: Allemagne, LTU: Lituanie, MAS: Malaisie, SUI: Suisse, SWE: Suède). Aucune législation étrangère n'est aussi sévère que l'OSites suisse lorsqu'il s'agit d'ordonner des mesures d'assainissement.

3. Etablissement de seuils d'investigation et de valeurs d'assainissement selon la directive de l'OFEFP de 1998

Il ne semble pas pertinent de reprendre une valeur d'assainissement au sens de l'OSites et de l'OSol dans une réglementation étrangère, car la correspondance entre les modes d'exécution de la législation est insuffisante (voir chapitre 2). Elle semble meilleure pour les seuils d'investigation, si bien qu'on peut envisager de les reprendre directement dans l'OSol. Mais il règne ici également un certain flou, lié à la valeur indicative suisse. D'une part, les seuils d'investigation étrangers sont considérés comme des valeurs limites certaines, visant à protéger les personnes, les animaux et l'environnement contre des atteintes nuisibles, alors que les concentrations tombant entre la valeur indicative et le seuil d'investigation ne garantissent plus la fertilité du sol en Suisse. D'autre part, les seuils d'investigation étrangers ne distinguent pas les cultures alimentaires et les cultures fourragères.

L'établissement de seuils d'investigation et de valeurs d'assainissement selon la directive de l'OFEFP de 1998 intitulée « Etablissement de seuils d'investigation et de valeurs d'assainissement pour les polluants inorganiques dans le sol » [2] présente l'avantage de permettre une comparaison directe entre les valeurs limites obtenues et les seuils déjà pratiqués pour le plomb, le cadmium, le cuivre et le zinc.

3.1 Méthodes de détermination

3.1.1 Principe

L'OSol prescrit des seuils d'investigation différents pour (i) les cultures alimentaires, (ii) les cultures fourragères et (iii) les utilisations du sol présentant un risque d'ingestion directe par des personnes (enfants) [6]. La valeur d'assainissement varie selon les catégories d'utilisation (i) agriculture et horticulture, (ii) jardins privés et familiaux et (iii) places de jeu [7].

Compte tenu de ces types d'utilisation, la directive de l'OFEFP [2] distingue les voies de contamination suivantes:

Plantes alimentaires: sol → plante → personne

Plantes fourragères: sol → plante → animal → personne / sol → animal → personne

Croissance des plantes: sol → plante

Ingestion directe: sol → personne (enfant)

Un seuil d'investigation et une valeur d'assainissement peuvent être assignés à chacune de ces voies de dissémination. Ils sont fixés au terme d'une estimation de la mise en danger. A cet effet, on étudie le transfert du polluant considéré du sol dans le bien à protéger (analyse de la menace), puis on détermine, à l'aide d'un critère d'appréciation, l'exposition à partir de laquelle cette menace apparaît (appréciation de la mise en danger).

Seule l'utilisation agricole du sol a été considérée dans le présent projet. Par conséquent, un seuil d'investigation a été établi pour chacune des deux voies de contamination « plantes alimentaires » et « plantes fourragères » et une valeur d'assainissement pour la voie « agriculture et horticulture ». La valeur d'investigation assignée à l'agriculture et à l'horticulture combine les vecteurs « plantes alimentaires », « plantes fourragères » et « croissance des plantes ».

Le seuil d'investigation correspond à la teneur en polluant dans le sol à partir de laquelle des personnes, des animaux ou des plantes risquent d'être menacés concrètement. Pour l'établir, il faut donc choisir des scénarios tels qu'aucune situation de danger ne soit omise. Même dans la plus sensible des configurations envisageables (scénario du pire des cas), une menace éventuelle doit être indiquée par le dépassement du seuil d'investigation. Mais le législateur exige qu'une menace soit concrète pour qu'une action juridique puisse être entreprise. Cela signifie qu'il doit y avoir une atteinte à un bien à protéger ou qu'on doit s'attendre à une atteinte dans le cours logique des choses. C'est pourquoi il faut considérer le pire des cas réalistes (PCR) pour établir le seuil d'investigation. Dans ce scénario, on admet que le transfert de polluant du sol aux plantes est maximal [2].

La valeur d'assainissement est établie sur la base de la configuration la plus favorable (scénario du meilleur des cas), ce qui implique que, même dans la meilleure configuration envisageable, des personnes, des animaux ou des plantes restent menacés même lorsque les changements d'utilisation possibles ont été réalisés. Lorsque la valeur d'assainissement est dépassée, le sol ne peut plus être utilisé sans danger. Dans le scénario du meilleur des cas, on admet que le transfert de polluant du sol aux plantes est minimal [2].

3.1.2 Méthodes appliquées à la voie de contamination « plantes alimentaires »

La menace inhérente à la voie de contamination « plantes alimentaires » est analysée en chiffrant le transfert de polluant du sol aux plantes par une analyse quantitative des données disponibles. Pour établir les seuils d'investigation et les valeurs d'assainissement, on regroupe les concentrations dans le sol et dans les plantes, tirées d'études du transfert sol-plante dans le cas de plantes alimentaires poussant sur un sol pollué chimiquement, et on introduit les points correspondants à l'intérieur d'un diagramme. Puis on détermine empiriquement, à l'aide du nuage de points, le transfert sol-plante minimal et maximal et on le trace dans le diagramme (exemples aux figures 3 et 4). On obtient ainsi une corrélation qualitative entre les teneurs en polluant dans le sol et dans les plantes [2].

Détermination du seuil d'investigation applicable aux cultures alimentaires

Le seuil d'investigation applicable aux cultures alimentaires indique la teneur en polluant dans le sol dont le dépassement pourrait entraîner une augmentation inadmissible de la teneur en polluant dans les parties comestibles de la plante. C'est pourquoi on applique la concentration maximale dans les denrées alimentaires comme critère d'appréciation dans l'évaluation de la mise en danger. Cette concentration maximale est tirée de la liste des valeurs de tolérance figurant dans l'ordonnance du DFI sur les substances étrangères et les composants dans les denrées alimentaires (ordonnance sur les substances étrangères et les composants, OSEC) [20]).

Le scénario du pire des cas réalistes qui doit être considéré ici satisfait aux conditions suivantes:

- la plante alimentaire retenue présente une capacité d'accumulation élevée;
- le transfert de polluant du sol dans la plante est supposé maximal;
- la consommation de plantes produites sur place est supposée importante.

La méthode appliquée pour établir le seuil d'investigation est illustrée dans la figure 3, à l'exemple du plomb dans l'épinard. La droite décrivant le transfert maximal sol-plante est calculée et tracée à l'aide du nuage de points. L'intersection de cette droite avec la valeur de tolérance selon l'OSEC (critère d'appréciation) portant sur la plante examinée correspond au seuil d'investigation.

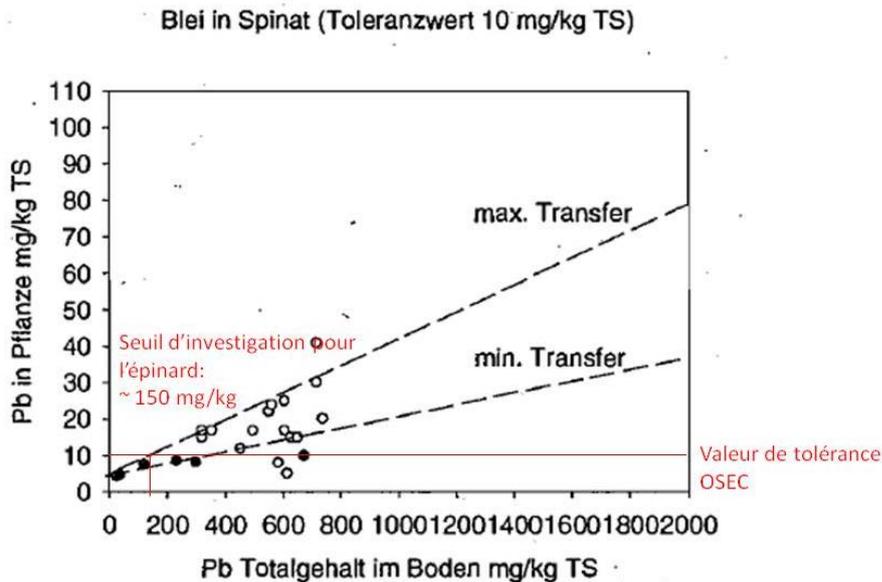


Figure 3: Exemple tiré de la directive de l'OFEFP [2]. Diagramme de points illustrant les teneurs en plomb dans le sol et dans les plantes pour l'épinard, avec indication du scénario du meilleur des cas (transfert minimal) et du pire des cas (transfert maximal). Le seuil d'investigation correspond à l'intersection entre les droites décrivant la valeur de tolérance selon l'OSEC et le transfert maximal [2].

Le seuil d'investigation correspondant aux cultures alimentaires dans le cas du plomb tombe aux environs de 150 mg/kg (figure 3), mais il a été fixé à 200 mg/kg au terme d'un raisonnement critique.

Détermination de la valeur d'assainissement applicable aux cultures alimentaires

Pour établir la valeur d'assainissement applicable aux cultures alimentaires, on considère non pas la valeur de tolérance, mais la concentration limite dans les denrées alimentaires selon l'OSEC [20] comme critère pour l'évaluation de la mise en danger. Lorsque cette concentration est dépassée, les aliments concernés sont retirés du commerce. La valeur d'assainissement indique donc une teneur en polluant dans le sol dont le dépassement entraîne vraisemblablement un danger concret pour les personnes. En l'absence de concentration limite, on applique le triple de la valeur de tolérance conformément à la directive de l'OFEFP [2].

Le scénario du meilleur des cas qui doit être considéré ici satisfait à la condition suivante:

- le transfert de polluant du sol dans la plante est supposé minimal (plante alimentaire n'accumulant pas le polluant ou l'excluant).

La démarche graphique est presque la même que pour établir le seuil d'investigation, sauf que l'on considère le transfert minimal – et non pas maximal – entre le sol et la plante alimentaire examinée (figure 4). La valeur d'assainissement correspond à l'intersection entre la droite décrivant le transfert minimal sol-plante et la valeur limite ou, respectivement, le triple de la valeur de tolérance selon l'OSEC portant sur cette plante. La valeur d'assainissement définitive n'est toutefois fixée qu'au terme de l'agrégation des voies de contamination (chapitre 3.1.5.).

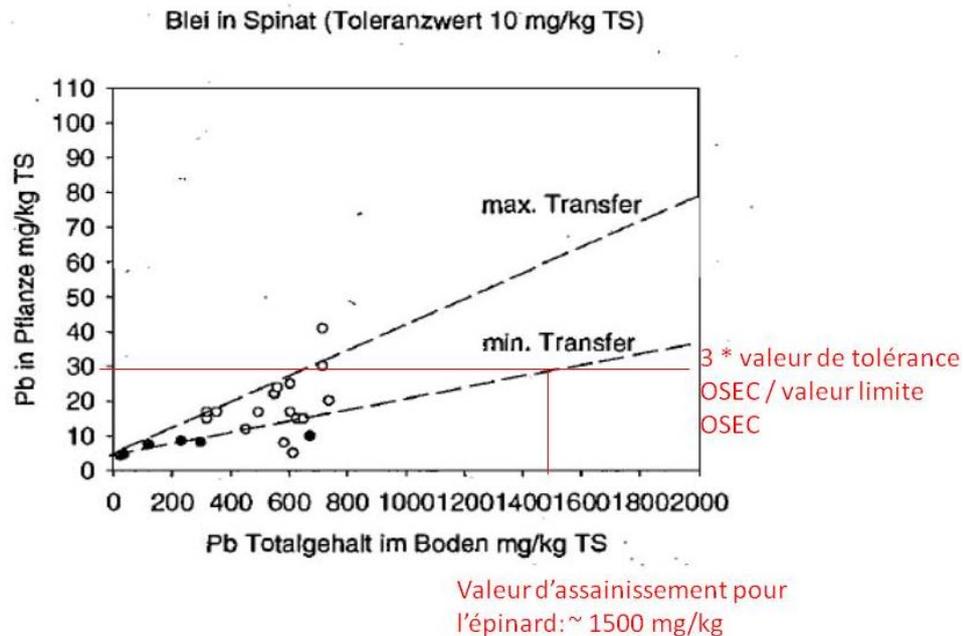


Figure 4: Exemple tiré de la directive de l'OFEFP [2]. Diagramme de points illustrant les teneurs en plomb dans le sol et dans les plantes pour l'épinard, avec indication du scénario du meilleur des cas (transfert minimal) et du pire des cas (transfert maximal). La valeur d'assainissement correspond à l'intersection entre les droites décrivant la valeur limite selon l'OSEC et le transfert minimal [2]. Celle qui concerne le plomb tombe ici aux environs de 1500 mg/kg. Mais la valeur d'assainissement fixée en fin de compte découle des cultures fourragères et elle se monte à 2000 mg/kg.

3.1.3 Méthodes appliquées à la voie de contamination « plantes fourragères »

La voie de contamination « plantes fourragères » cumule trois vecteurs: l'ingestion de polluant par l'animal via la plante ou la terre adhérent à la plante et l'ingestion directe de terre lors de la pâture. L'application de relations mathématiques entre les différentes voies de contamination permet de calculer une concentration limite portant sur les plantes fourragères. Le critère d'appréciation appliqué ici dans l'évaluation de la mise en danger est la teneur maximale dans les aliments pour animaux inscrite dans l'ordonnance du DEFR sur la production et la mise en circulation des aliments pour animaux, des additifs destinés à l'alimentation animale et des aliments diététiques pour animaux (ordonnance sur le Livre des aliments pour animaux, OLALA) [21].

Détermination du seuil d'investigation applicable aux cultures fourragères

Le seuil d'investigation applicable aux cultures fourragères indique une teneur en polluant dans le sol dont le dépassement risque de mettre en péril les animaux d'élevage ou, pour des raisons d'hygiène alimentaire, les personnes qui consomment le produit en résultant.

Le scénario du pire des cas réalistes qui doit être considéré ici satisfait aux conditions suivantes:

- l'animal d'élevage retenu est le plus sensible au polluant considéré;
- le type de fourrage retenu est lié à une exposition importante, ce qui signifie que sa part dans la ration totale est aussi élevée que possible. Il s'agit donc généralement de la pâture;
- la proportion d'ingestion directe est supposée maximale pour l'animal d'élevage retenu;
- le transfert de polluant du sol dans la plante est supposé maximal.

Le seuil d'investigation C_{max} correspondant à la voie de contamination « plantes fourragères » est calculé au moyen de l'équation 1.

$$C_{max} = \frac{\left(\frac{C_{fourrage,max}}{g}\right) - b + bd}{a + d - ad} \quad (\text{équation 1})$$

Avec:

C_{max}	Teneur maximale admise dans le sol (seuil d'investigation, valeur d'assainissement)
$C_{fourrage,max}$	Teneur maximale en substances indésirables dans les aliments pour animaux selon l'OLALA
g	Part de la ration totale. En Suisse, les animaux d'élevage se nourrissent le plus souvent de pâture. Dans ce cas, $g = 1$ (part de 100 %)
d	Proportion d'ingestion directe
a	Pente de la droite dans le diagramme de points
b	Intersection avec l'axe vertical dans le diagramme de points

Les variables a et b utilisées pour établir le seuil d'investigation correspondent respectivement à la pente de la droite décrivant le transfert maximal de polluant dans le diagramme de points et à son intersection avec l'axe vertical. A titre d'exemple, la figure 5 présente le diagramme concernant le cadmium dans l'herbe ainsi que les droites décrivant son transfert tirés de la directive de l'OFEFP [2].

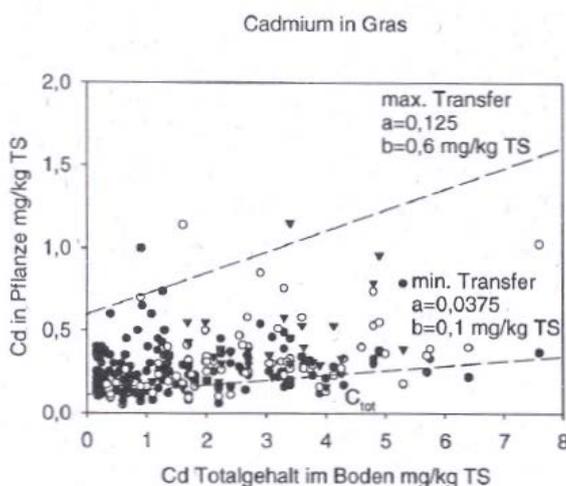


Figure 5: Exemple du cadmium, tiré de la directive de l'OFEFP [2]. Diagramme de points illustrant les teneurs dans le sol et dans la plante pour l'herbe, avec indication du scénario du meilleur des cas (transfert minimal) et du pire des cas (transfert maximal) [2].

Détermination de la valeur d'assainissement applicable aux cultures fourragères

La valeur d'assainissement applicable aux cultures fourragères indique une teneur en polluant dans le sol dont le dépassement rend impossible l'usage qui en était fait jusqu'alors.

Le scénario du meilleur des cas qui doit être considéré ici satisfait aux conditions suivantes:

- le type de fourrage retenu est généralement le plus fréquent. Il s'agit donc de la pâture;
- l'animal d'élevage retenu n'est pas sensible;
- la proportion d'ingestion directe est supposée minimale;
- le transfert de polluant du sol dans la plante est supposé minimal.

La démarche graphique est presque la même que pour établir le seuil d'investigation, sauf que l'on considère le transfert minimal – et non pas maximal – entre le sol et la plante fourragère examinée (figure 5). La valeur d'assainissement est calculée au moyen de l'équation 1. Les variables a et b correspondent respectivement à la pente de la droite décrivant le transfert minimal de polluant et à son intersection avec l'axe vertical. La valeur d'assainissement définitive n'est toutefois fixée qu'au terme de l'agrégation des voies de contamination (chapitre 3.1.5).

3.1.4 Voie de contamination « croissance des plantes »

La mise en danger d'une plante peut être interprétée de diverses manières, par exemple en termes de baisse de rendement, de troubles de la croissance ou de concentration limite phytotoxique.

La méthode la plus simple consiste à évaluer la baisse de rendement. On détermine d'abord le rendement normal – en considérant qu'il est égal au 90^e percentile du rendement trouvé dans l'étude à défaut de surface de référence. Puis on réalise une analyse qualitative des données ou une analyse de régression. La valeur d'assainissement est établie en considérant une baisse de rendement de 25 % comme critère d'appréciation [2].

La valeur d'assainissement liée à la croissance des plantes peut aussi être fixée en passant par la valeur limite phytotoxique. Dans ce cas, on détermine le transfert de polluant sol-plante, puis on tire directement la valeur d'assainissement de la limite de toxicité pour la plante. Il est également possible d'estimer qualitativement la mise en danger. Si une étude met en regard des concentrations dans le sol et des troubles de la croissance, l'évaluation de la mise en danger peut en tenir compte.

3.1.5 Agrégation des voies de contamination pour établir la valeur d'assainissement

La valeur d'assainissement liée à l'agriculture et à l'horticulture est obtenue en agrégeant les voies de contamination « plantes alimentaires », « plantes fourragères » et « croissance des plantes ». Elle n'est atteinte que lorsque l'utilisation du sol ne peut plus être modifiée (p. ex. passage d'une culture fourragère à une culture alimentaire), les différents types d'utilisation du sol étant limités par des critères de qualité ou de croissance. Ainsi, la valeur d'assainissement est égale à la plus grande des deux teneurs minimales parmi les paires de valeurs liées à la croissance des plantes (CP) et aux cultures alimentaires (CA) et à la croissance des plantes et aux cultures fourragères (CF) (équation 2).

$$\text{Valeur d'assainissement} = \max[\min(\text{CP};\text{CA});\min(\text{CP};\text{CF})] \quad (\text{équation 2})$$

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Données

Les données utilisées pour établir les seuils d'investigation et la valeur d'assainissement ont été obtenues en recherchant des informations existantes: enquête auprès d'experts, exploration de banques de données (Web of knowledge) et d'Internet (Google scholar). Il a fallu contacter personnellement l'auteur de la plupart des études utilisées pour obtenir des données originales, car les publications ne mentionnaient souvent que des fourchettes de concentrations ou des teneurs moyennes concernant le mercure. Les études exploitées (tableau 4) sont commentées dans le paragraphe suivant.

Tableau 4: Comparaison entre les études dont les données ont été exploitées pour établir les seuils d'investigation et la valeur d'assainissement appliqués au mercure (utilisation agricole du sol).

Etude	Type d'essai	Espèces de plantes	Type de sol et utilisation	pH du sol	Climat	Préparation de l'échantillon	Analyse
Caille et al. [22]	Essai en pot	Fétuque rouge, colza, chou blanc		7,1		Décomposition à l'acide fort	Spectrométrie d'absorption atomique par technique en phase vapeur à froid
Chunilall et al. [23]	Essai en pot	Epinard	Sol agricole	5,56-6,75		Décomposition par micro-ondes	Spectrométrie d'absorption atomique par technique en phase vapeur à froid
Chunilall et al. [24]	Essai en pot	Amarante	Sol agricole	5,56-6,75		Décomposition par micro-ondes	Spectrométrie d'absorption atomique par technique en phase vapeur à froid
Egler et al. [25]	Essai en champ	Racine d'igname, manioc, ciboulette, patate douce, chou blanc, plantes de pâturages	Jardins potagers		Tropical humide (Amazonie)	Décomposition à l'acide fort	Spectrométrie d'absorption atomique par technique en phase vapeur à froid
Kloke [26]		Salade, céleri-rave			(Allemagne)		
Krüger & Gröngröft [27]	Essai en champ	Plantes de pâturages	Sol alluvial inondé	4,0-7,5	Tempéré (Allemagne)		
Lenka et al. [28]	Essai en champ	Amarante, aubergine, melon amer, haricot, chili, gombo, tomate, chou blanc, oignon	Jardins potagers	~5,2	Tropical (savane d'Inde)	Décomposition à l'acide fort	Spectrométrie d'absorption atomique par technique en phase vapeur à froid
Li et al. [29]	Essai en champ	Maïs	« Sol jaune brun »	4,4-6,7	Subtropical humide (Chine)	Sol: décomposition par micro-ondes; plantes: décomposition à l'acide dans un bain d'eau	Spectrométrie d'absorption atomique par technique en phase vapeur à froid
Loreda et al. [30]	Essai en champ	Herbacées		4,55-7,79	Chaud et humide (Espagne)	Décomposition à l'acide fort	Spectrométrie d'absorption atomique sans flamme
Liu et al. [31]	Essai en champ	Amarante, aubergine, brocoli, chou chinois, haricot, concombre, jing jie, carotte, ail-ciboulette, poireau, pak choï, poivron, colza, radis, haricot asperge, céleri-branche, tomate, épinard d'eau, chou blanc			Continental (Chine)	Décomposition par micro-ondes	Spectrométrie d'absorption atomique par technique en phase vapeur à froid
Rodrigues et al. [32]	Essai en champ	Plantes de pâturages		3,0-7,0	(Portugal)	Aucune, sol analysé directement	Spectrométrie d'absorption atomique par thermolyse sur amalgame d'or
Senila et al. [33]	Essai en champ	Plantes vivaces		4,5-8,1	(Roumanie)	Aucune, sol analysé directement	Spectrométrie d'absorption atomique par thermolyse et technique en phase vapeur à froid
Sipter et al. [34]	Essai en champ	Tomate, courge, haricot, oignon, carotte, oseille	Jardins potagers	~6-6,5	Continental (Hongrie)	Décomposition par micro-ondes	Spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif
Wang et al. [35]	Essai en champ	Plantes de pâturages		8,26-9,19	Chaud et humide (Chine)	Décomposition à l'acide fort	Spectrométrie d'absorption atomique par technique en phase vapeur à froid
Wiersma et al. [36]	Essai en champ	Plantes de pâturages			(Pays-Bas)		

Données utilisées

Essais en pot

Faute de données suffisantes pour exploiter seulement des essais en champ, les valeurs recherchées ont aussi été établies sur la base d'essais en pot. Les points correspondants sont en vert dans les diagrammes des figures 6 à 9. Caille et al. [22] et Chunilall et al. [23, 24] ont étudié l'absorption de mercure par l'herbe, le riz et des légumes ainsi que par l'épinard et l'amarante. Caille et al. ont utilisé des sédiments extraits d'un canal contaminé pour réaliser leurs expérimentations. Le sol avait un pH de 7,11 et une teneur en mercure de 17,1 mg/kg avant les essais. Chunilall et al. [23], [24] ont étudié l'absorption de mercure par l'épinard et l'amarante, dont les graines sont consommées comme céréales et les feuilles comme légumes. Ils ont transféré des sols agricoles typiques contenant 0, 10, 25 et 50 ppm de mercure (HgSO_4). Leur pH variait entre 6,75 lors du traitement de contrôle et 5,56 après l'ajout de 50 ppm de mercure. La concentration de mercure dans le sol et dans les plantes a été mesurée après cinq et dix semaines de croissance.

Données de terrain issues de régions minières

L'établissement des seuils d'investigation et de la valeur d'assainissement a aussi fait appel à des données tirées d'études sur la pollution au mercure imputable à l'activité minière. Loredó et al. [30] ont analysé des échantillons de sols et de plantes provenant de la région minière des Asturies, dans le nord de l'Espagne, dont le climat est chaud et humide. Le pH du sol, variant entre 4,55 et 7,79, était plus élevé avec une couverture herbeuse qu'en son absence. Sipter et al. [34] ont étudié, dans un essai en champ pratiqué à proximité d'une mine hongroise de plomb et de zinc, la contamination de jardins potagers en métaux lourds et les risques éventuels pour la santé de la population locale. Le pH du sol avait une valeur comprise entre 6 et 6,5 sous ce climat continental. Senila et al. [33] ont mesuré des concentrations en mercure dans des échantillons de sols et de plantes provenant d'une région urbaine de Roumanie parsemée de mines. Le pH du sol variait entre 5,8 et 7,5 selon la surface examinée. Les données à ce sujet ont été mises à disposition par Marin Senila.

Données de terrain issues d'autres régions polluées

Les autres données exploitées sont tirées d'études portant sur la pollution générale au mercure de terrains voués à l'agriculture ou à l'horticulture. Klocke [26] a publié des teneurs mesurées, lors d'essais réalisés en Allemagne, dans des sols et dans des salades et céleris-raves y poussant. Mais les sources originales n'ont pas été retrouvées, si bien qu'il n'est pas possible de préciser le climat et les caractéristiques des terrains. On a considéré que les conditions climatiques de la région étaient comparables à celles de la Suisse et que ces données pouvaient donc être prises en compte. Krüger & Gröngöft [27] ont mesuré les concentrations en métaux lourds dans des sols alluviaux inondés situés le long de l'Elbe. Mais leur rapport ne donne aucune indication au sujet du climat, du pH et du type de sol. Les données désignées par « LAU (2001) » (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt), « Köster & Merkel (1985) » et « Krüger (2001) » dans le chapitre 3.3 ont été fournies par Frank Krüger.

Liu et al. [31] ont analysé des sols agricoles et des légumes provenant de quatre secteurs de la banlieue de Zhengzhou, en Chine. Leur but était d'examiner l'absorption et la bioaccumulation de métaux lourds dans différents légumes. Le climat de la région est continental avec des printemps chauds.

Au Portugal, Rodrigues et al. [32] ont mesuré la concentration en mercure dans 136 échantillons de sols et 129 de plantes prélevés dans des pâturages. Silvia Rodrigues a fourni les résultats des analyses de tous ces échantillons.

Wiersma et al. [36] ont examiné la teneur en métaux lourds dans plusieurs sortes de légumes et plantes fourragères ainsi que dans les sols correspondants, en menant leurs investigations dans les principaux sites de production respectifs. Leur article ne donne aucune indication au sujet du climat, du pH et du type de sol. Mais comme les conditions régnant aux Pays-Bas sont comparables à celles de la Suisse, leurs données ont été prises en compte dans la présente étude.

Données non retenues

En règle générale, les concentrations dans le sol inférieures à 0,5 mg/kg (valeur indicative suisse selon l'OSol) – en gris dans les diagrammes des figures 6 à 9 – n'ont pas été retenues pour établir les valeurs limites recherchées. Les chiffres tirés de recherches pratiquées sous des climats différents de celui de la Suisse – en bleu dans les diagrammes des figures 6 à 9 – n'ont pas non plus été retenus. Cela concerne les études d'Egler et al. [25] ainsi que Lenka et al. [28], Li et al [29] et Wang et al [35].

Egler et al. [25] ont étudié la pollution au mercure dans des sols et des plantes de deux petits villages proches de mines d'or, en Amazonie brésilienne. Ils ont examiné la terre, des parties de légumes comestibles poussant dans des jardins potagers et des plantes tirées de pâturages. La région est soumise à un climat tropical humide. Lenka et al. [28] ont analysé des échantillons de plantes et de sols prélevés dans des jardins potagers proches d'une usine de chlore-alcali. Les terres agricoles entourant les jardins avaient un pH de 5,2. Cette étude s'est déroulée dans la savane tropicale de l'Inde.

Li et al. [29] se sont penchés sur la pollution occasionnée par de petites usines pratiquant la pyrometallurgie du zinc dans le sud-ouest de la Chine (Weining). Ils ont mesuré la concentration de mercure dans des échantillons d'eau, de sol et de plantes (maïs). Le pH variait entre 4,4 et 6,7 selon le lieu de prélèvement, sous un climat subtropical humide. Comme les teneurs mesurées dans le sol étaient en outre inférieures à la valeur indicative suisse, cette étude n'a plus été considérée par la suite. Les points en provenant sont en gris dans les figures 6 et 8.

Wang et al. [35] ont étudié la concentration de mercure dans des sols et des plantes d'une région minière chinoise exploitant ce métal sous un climat chaud et humide. Certaines espèces examinées y sont transformées pour nourrir les animaux d'élevage. Le pH variait entre 7,09 et 8,74 selon le lieu de prélèvement. Les résultats des mesures ont été transmis par Jianxu Wang. Les conclusions de cette étude ne sont pas utilisables pour établir les seuils d'investigation et les valeurs d'assainissement recherchés. Le pH du sol est trop élevé et le régime climatique n'est pas comparable à celui de la Suisse. De plus, les teneurs mesurées dans le cadre de cette étude sont si hautes qu'elles ne sont pas exploitables pour définir une concentration limite applicable à l'agriculture (concentration dans le sol jusqu'à 1200 mg/kg).

3.2.2 Hypothèses et démarche pratique

Voie de contamination « plantes alimentaires »

Les données sur l'absorption de mercure par les plantes alimentaires ne sont guère nombreuses (61 paires). Celles qui ont été trouvées concernaient toutes des légumes (tableau 4). C'est pourquoi aucun chiffre se rapportant aux céréales, aux pommes de terre, aux légumineuses, aux baies et aux fruits n'a pu être utilisé dans la présente étude. Le manque de données a aussi empêché d'établir, pour certaines sortes de légumes, les diagrammes de points selon la directive de l'OFEFP [2]. Les données trouvées au sujet des légumes ont donc été agrégées dans un diagramme pour obtenir une approximation. L'établissement des valeurs limites recherchées a aussi exploité des essais en pot. L'évaluation critique des seuils tient compte de ces contraintes.

D'autres contraintes sont dues au manque de valeurs limites concernant le mercure dans les aliments. D'après la directive de l'OFEFP [2], il y a lieu d'établir un diagramme de points pour chaque sorte de plante alimentaire (figure 3) et d'appliquer la valeur limite correspondante comme critère d'appréciation (paragraphe 3.1.2). Mais la liste des concentrations maximales admises (valeurs de tolérance et valeurs limites) pour les métaux et les métalloïdes (liste 2 annexée à l'OSEC) ne mentionne des teneurs que pour les poissons, les crustacés, les champignons de culture, la gélatine, le collagène, les

compléments alimentaires, le sel comestible et les boissons. La valeur de tolérance relative aux champignons de culture (0,5 mg/kg) représente l'unique seuil appliqué à une plante alimentaire. Même le règlement de l'UE indiqué à titre subsidiaire ne fixe aucune valeur de tolérance ni valeur limite à la teneur en mercure dans les plantes alimentaires [37]. La directive de l'OFEFP [2] contient, dans son annexe 2, des valeurs de tolérance portant sur le mercure présent dans ces plantes qui avaient été calculées à partir de valeurs indicatives recommandées par le ZEBS (Zentrale Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien des deutschen Bundesgesundheitsamtes). Variant entre 0,13 mg/kg (petits pois frais) et 1,56 mg/kg (concombres) pour les légumes et les fruits, elles sont bien corrélées avec la teneur en matière sèche. La valeur de tolérance indiquée est égale à 0,03 mg/kg pour les céréales et les légumineuses et à 0,09 mg/kg pour les pommes de terre. La valeur moyenne se monte à 0,57 mg/kg pour les légumes et à 0,19 mg/kg pour les fruits et les baies. Les données les plus significatives figurant dans le diagramme de points appliqué aux plantes alimentaires concernent l'épinard et l'amarante, des légumes dont la part de matière sèche vaut approximativement 10 %, ce qui donne une valeur indicative selon le ZEBS de 0,5 mg/kg. Kabata-Pendias & Pendias [38] proposent une teneur maximale de 50 ppb (poids à l'état frais) qui s'appliquerait à toutes les plantes alimentaires. Elle était la valeur indicative selon le ZEBS de 0,5 mg/kg si on admet que la proportion de matière sèche est de 10 %. Une estimation basée sur la dose hebdomadaire tolérable provisoire (DHTP) préconisée par l'OMS en 2010, de 0,004 mg de mercure par kilo de poids corporel [5], indique qu'une personne de 60 kilos qui consomme chaque jour 200 grammes de légumes frais ayant une teneur en matière sèche de 10 % absorbe environ 30 % de la DHTP. Ces considérations ont amené à assigner une valeur de tolérance de 0,5 mg/kg aux légumes représentés dans le corpus de données utilisé ici pour établir les valeurs limites applicables aux sols. Signalons toutefois que ces estimations ne sont pas valables pour les autres plantes alimentaires.

Le critère d'appréciation appliqué pour établir la valeur d'assainissement est la valeur limite – et non pas la valeur de tolérance – selon l'OSEC. Correspondant au triple de la valeur de tolérance d'après la directive de l'OFEFP [2], elle a été fixée à 1,5 mg/kg pour le corpus de données sur les légumes.

Voie de contamination « plantes fourragères »

Des données concernant les plantes de pâturages ont été collectées pour décrire la voie de contamination « plantes fourragères ». Elles étaient disponibles en beaucoup plus grande quantité (126 paires) que celles concernant les plantes alimentaires. Pour établir le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement, on a admis que les pâturages étaient entièrement broutés. Le critère d'appréciation utilisé était la valeur maximale assignée par l'OLALA aux aliments pour animaux. En ce qui concerne les teneurs maximales en substances indésirables dans les aliments pour animaux, son annexe 10 renvoie à l'annexe 1 du Règlement (UE) n° 574/2011, qui fixe à 0,1 mg/kg la concentration maximale du mercure dans les matières premières des aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %. Rapportée à la matière sèche, la teneur maximale en mercure est donc de 0,114 mg/kg dans les aliments pour animaux. Pour calculer le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement à l'aide de l'équation 1, il fallait encore définir la part de la ration totale et la proportion d'ingestion directe de sol. La part de la ration totale est de 100 % pour des animaux qui se nourrissent de pâture, si bien que la variable g de l'équation 1 est égale à 1. La proportion d'ingestion directe (variable d dans l'équation 1) varie d'un animal à l'autre. Le mouton ou le bœuf a été considéré selon le scénario examiné (tableau 5).

Tableau 5: Valeurs assignées à l'ingestion directe de terre (d) par des animaux d'élevage lors de la pâture [2].

Culture	Animal d'élevage	Ingestion directe de terre lors de la pâture [% de la consommation totale (MS)]
Herbage, consommation directe	Bœuf	1-10
	Mouton	10-30

On a appliqué le scénario du pire des cas réalistes (PCR) au mouton ($d = 0,3$) pour établir le seuil d'investigation et le scénario du meilleur des cas (MC) au bœuf ($d = 0,01$) pour établir la valeur d'assainissement.

Pour établir le seuil d'investigation, l'intersection des droites décrivant le transfert sol-plante avec l'axe vertical a été placée à $0,05 \text{ mg/kg}$ (scénario du PCR) pour la contamination via les plantes alimentaires et les plantes fourragères. Cette valeur, correspondant à la concentration moyenne de mercure dans les plantes qui poussent sur un sol non contaminé [38], semblait aussi cohérente avec les séries de données utilisées ici. Pour établir la valeur d'assainissement, l'intersection des droites décrivant le transfert sol-plante avec l'axe vertical a été placée à 0 mg/kg (scénario du MC).

3.3 Résultats

3.3.1 Seuils d'investigation

Voie de contamination « plantes alimentaires »

Les résultats obtenus en étudiant le seuil d'investigation applicable aux cultures alimentaires sont présentés dans les diagrammes de points de la figure 6. La droite décrivant le transfert maximal jugé réaliste est tracée en noir. Son intersection avec la valeur de tolérance estimée pour les aliments, de $0,5 \text{ mg/kg}$ pour les légumes (voir paragraphe 3.2.2), fournit un seuil d'investigation de $0,85 \text{ mg/kg}$ (tableau 6). La figure 6a comprend toutes les données invoquées pour déterminer la droite décrivant le transfert et la figure 6b l'emplacement du seuil d'investigation résultant.

Tableau 6: Paramètres utilisés pour estimer le seuil d'investigation applicable aux cultures alimentaires selon le scénario du PCR (absorption maximale par les plantes) et seuil d'investigation résultant.

Valeur de tolérance estimée pour le mercure dans les légumes	$0,5 \text{ mg/kg MS}$
Droite décrivant le transfert maximal (figure 6)	
Pente (a)	$0,53$
Intersection avec l'axe vertical (b)	$0,05$
Seuil d'investigation résultant	$0,85 \text{ mg/kg}$

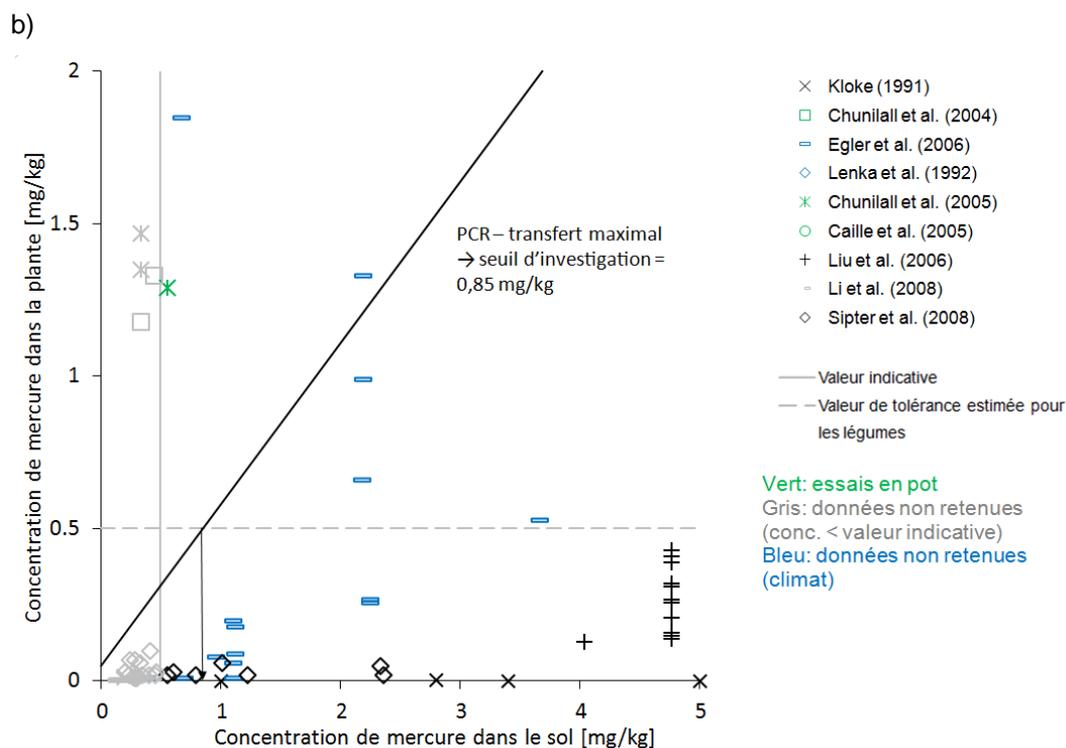
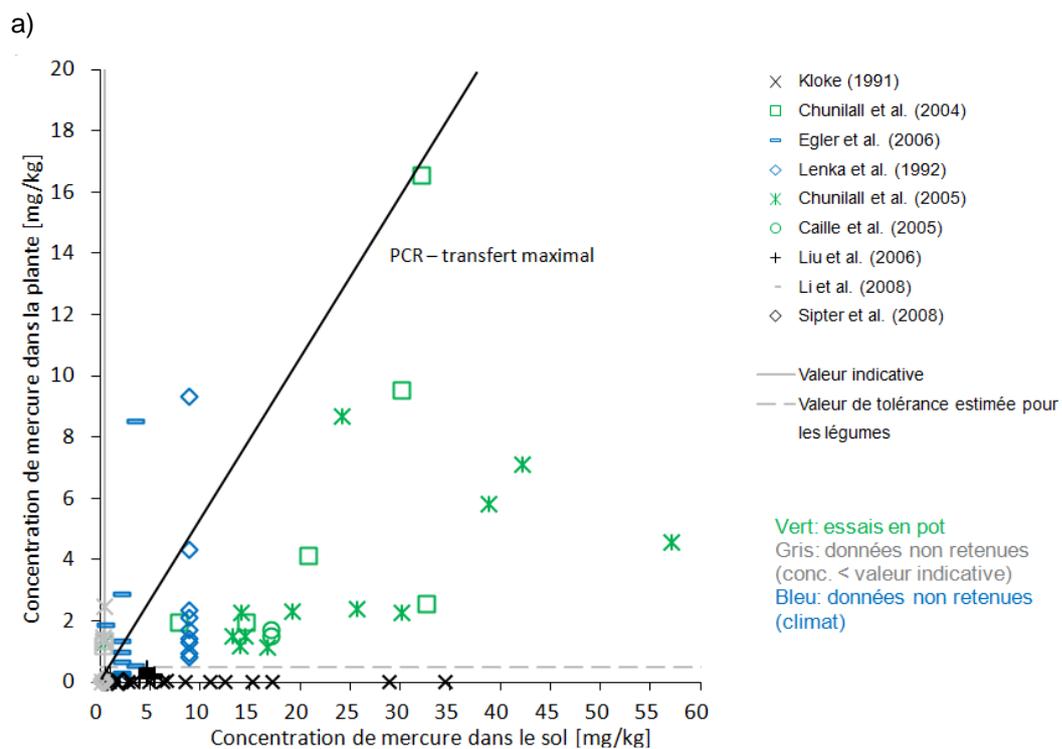


Figure 6: Etablissement du seuil d'investigation applicable à la voie de contamination « plantes alimentaires ». Détermination du transfert maximal sol-plante selon le scénario du pire des cas réalistes. a) Tous les points. b) Agrandissement du secteur des concentrations dans le sol comprises entre 0 et 5 mg/kg et des concentrations dans les plantes comprises entre 0 et 2 mg/kg.

Voie de contamination « plantes fourragères »

Deux seuils d'investigation (C_{max}) ont été calculés pour les plantes fourragères, en appliquant l'équation 1 aux données collectées concernant leur teneur en mercure (figure 7). La combinaison de la valeur limite de 0,114 mg/kg selon l'OLALA, de la pente de la droite décrivant le transfert maximal a et de son intersection avec l'axe vertical b (figure 7) a donné, dans la première variante (tableau 7), un seuil d'investigation plusieurs fois inférieur à la valeur indicative selon l'OSol de 0,5 mg/kg. La deuxième variante, également plausible, a aussi donné un seuil d'assainissement nettement inférieur à la valeur indicative, bien que la droite ait une pente moindre.

Tableau 7: Paramètres utilisés dans l'équation 1 pour estimer les seuils d'investigation applicables aux plantes fourragères selon le scénario du PCR (transfert maximal sol-plante, mouton) et seuils d'investigation résultants.

	Variante 1	Variante 2
Teneur maximale en mercure dans les aliments pour animaux selon l'OLALA ($C_{fourrage, max}$)	0,114 mg/kg MS	0,114 mg/kg MS
Part de la ration totale (g)	1	1
Proportion d'ingestion directe (d)	0,3	0,3
Droites décrivant le transfert (figure 7)		
Pente (a)	0,95	0,32
Intersection avec l'axe vertical (b)	0,05	0,05
Seuils d'investigation résultants	0,05 mg/kg MS	0,15 mg/kg MS

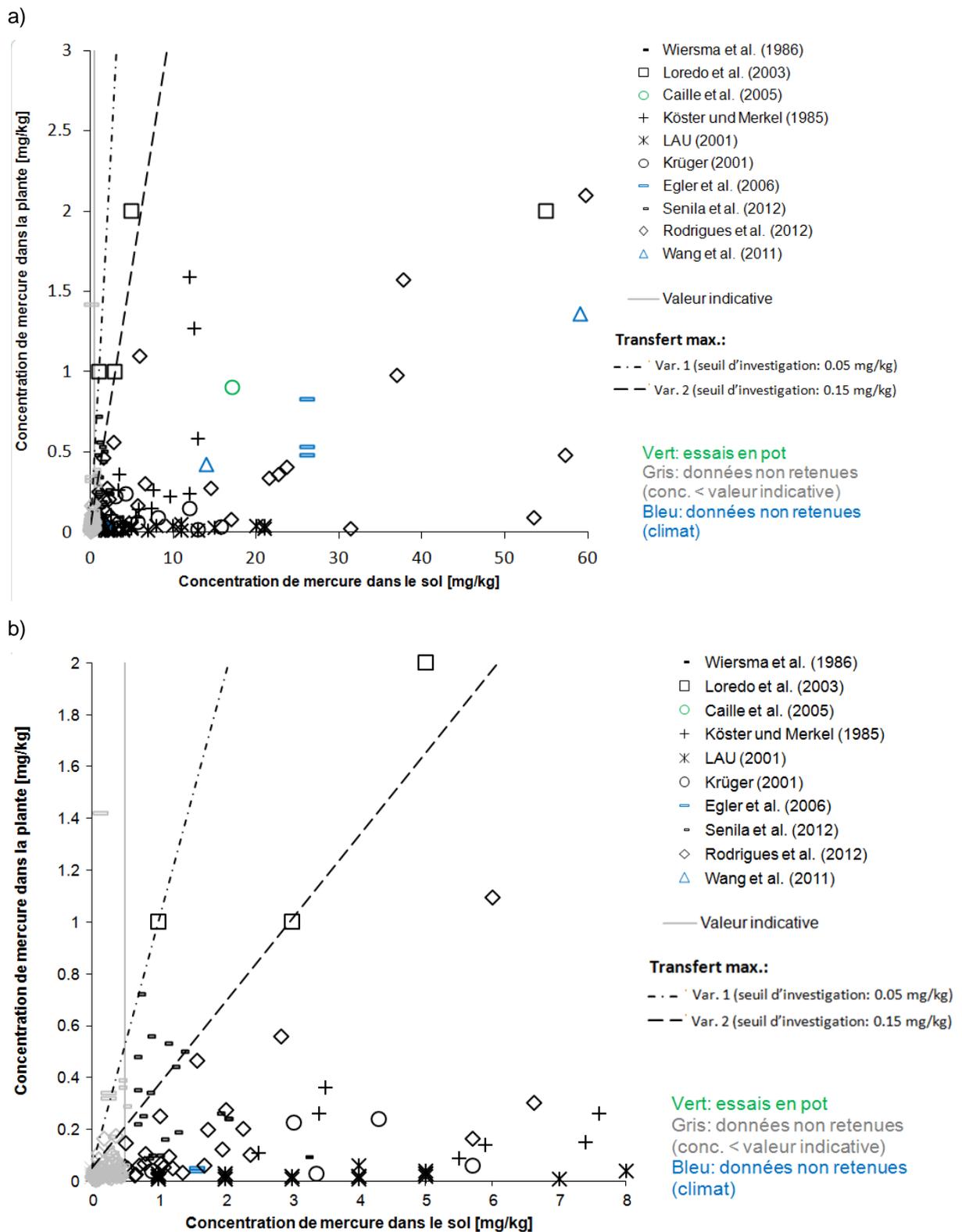


Figure 7: Etablissement du seuil d'investigation applicable à la voie de contamination « plantes fourragères ».

a) Vue d'ensemble (concentration dans le sol comprise entre 0 et 60 mg/kg et dans la plante entre 0 et 3 mg/kg).

b) Vue de détail (concentration dans le sol comprise entre 0 et 8 mg/kg et dans la plante entre 0 et 2 mg/kg). Les seuils d'investigation ont été calculés en introduisant les paramètres du tableau 7 dans l'équation 1.

3.3.2 Valeur d'assainissement

Voie de contamination « plantes alimentaires »

La valeur d'assainissement applicable à la voie de contamination « plantes alimentaires » a été déterminée de la même manière que le seuil d'investigation, à ceci près que c'est le scénario du meilleur des cas (transfert sol-plante minimal et intersection avec l'axe horizontal à 0 mg/kg) qui a été considéré ici. En outre, le critère d'appréciation mis en œuvre était le triple de la valeur de tolérance, soit 1,5 mg/kg (tableau 8). La droite correspondant au meilleur des cas a été tracée dans le diagramme de points (figure 8). Ses paramètres ont fourni une valeur d'assainissement de 20 mg/kg (tableau 8).

Tableau 8: Paramètres utilisés pour estimer la valeur d'assainissement applicable aux cultures alimentaires selon le scénario du MC (transfert minimal sol-plante) et valeur d'assainissement résultante.

Valeur limite estimée pour le mercure dans les légumes	1,5 mg/kg MS
Droite décrivant le transfert minimal (figure 8)	
Pente (a)	0,075
Intersection avec l'axe vertical (b)	0
Valeur d'assainissement résultante	20 mg/kg

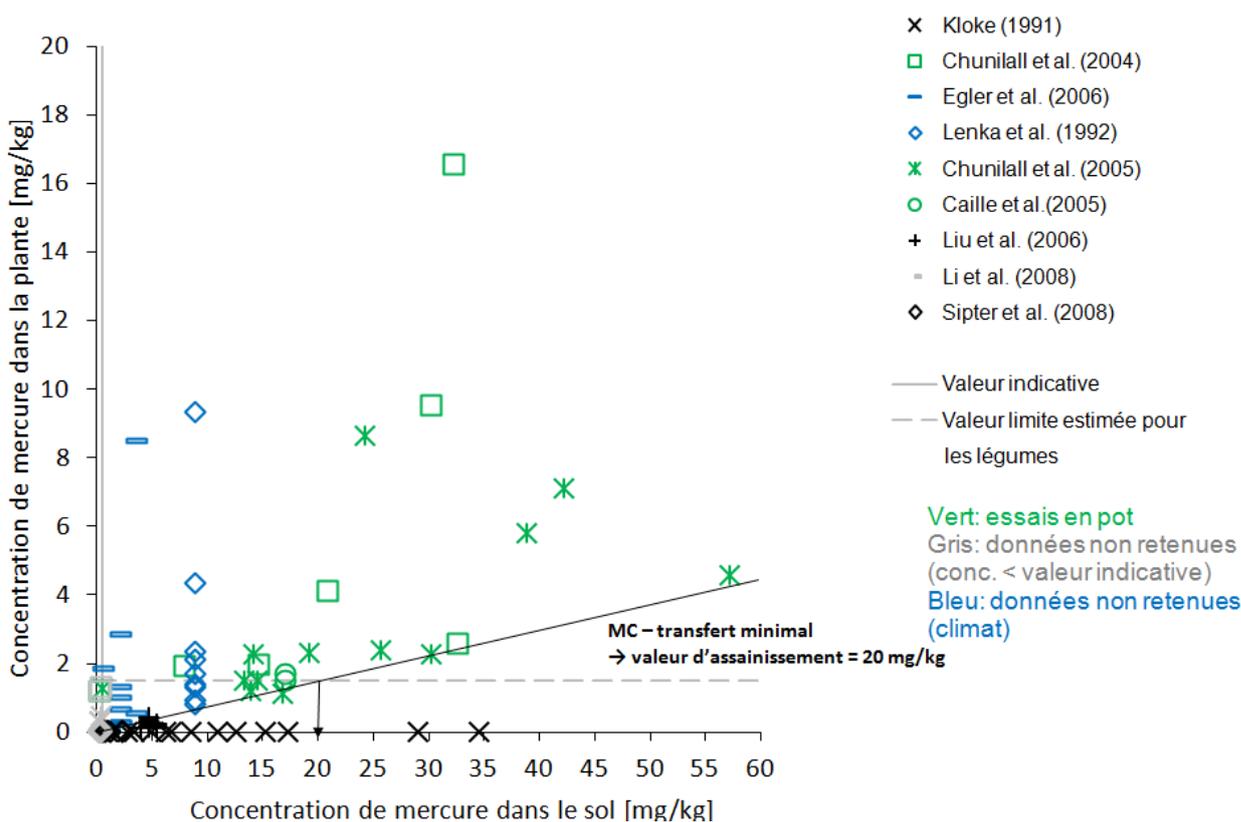


Figure 8: Etablissement de la valeur d'assainissement applicable à la voie de contamination « plantes alimentaires ». Calcul du transfert minimal sol-plante selon le scénario du meilleur des cas.

Voie de contamination « plantes fourragères »

La valeur d'assainissement applicable à la voie de contamination « plantes fourragères » a été déterminée de la même manière que le seuil d'investigation, à ceci près que c'est le scénario du meilleur des cas (transfert sol-plante minimal et intersection avec l'axe horizontal à 0 mg/kg) qui a été considéré ici. La droite décrivant le transfert minimal jugé réaliste a été tracée dans le diagramme de points (figure 9). Ses paramètres, introduits dans l'équation 1, ont donné une valeur d'assainissement de 10 mg/kg (tableau 9).

Tableau 9: Paramètres utilisés dans l'équation 1 pour estimer la valeur d'assainissement applicable aux plantes fourragères selon le scénario du MC (transfert minimal sol-plante, bœuf) et valeur d'assainissement résultante.

Teneur maximale en mercure dans les aliments pour animaux selon l'OLALA ($C_{\text{fourrage, max}}$)	0,114 mg/kg MS
Part de la ration totale (g)	1
Proportion d'ingestion directe (d)	0,01
Droite décrivant le transfert (figure 9)	
Pente (a)	0,0013
Intersection avec l'axe vertical (b)	0
Valeur d'assainissement résultante	10 mg/kg

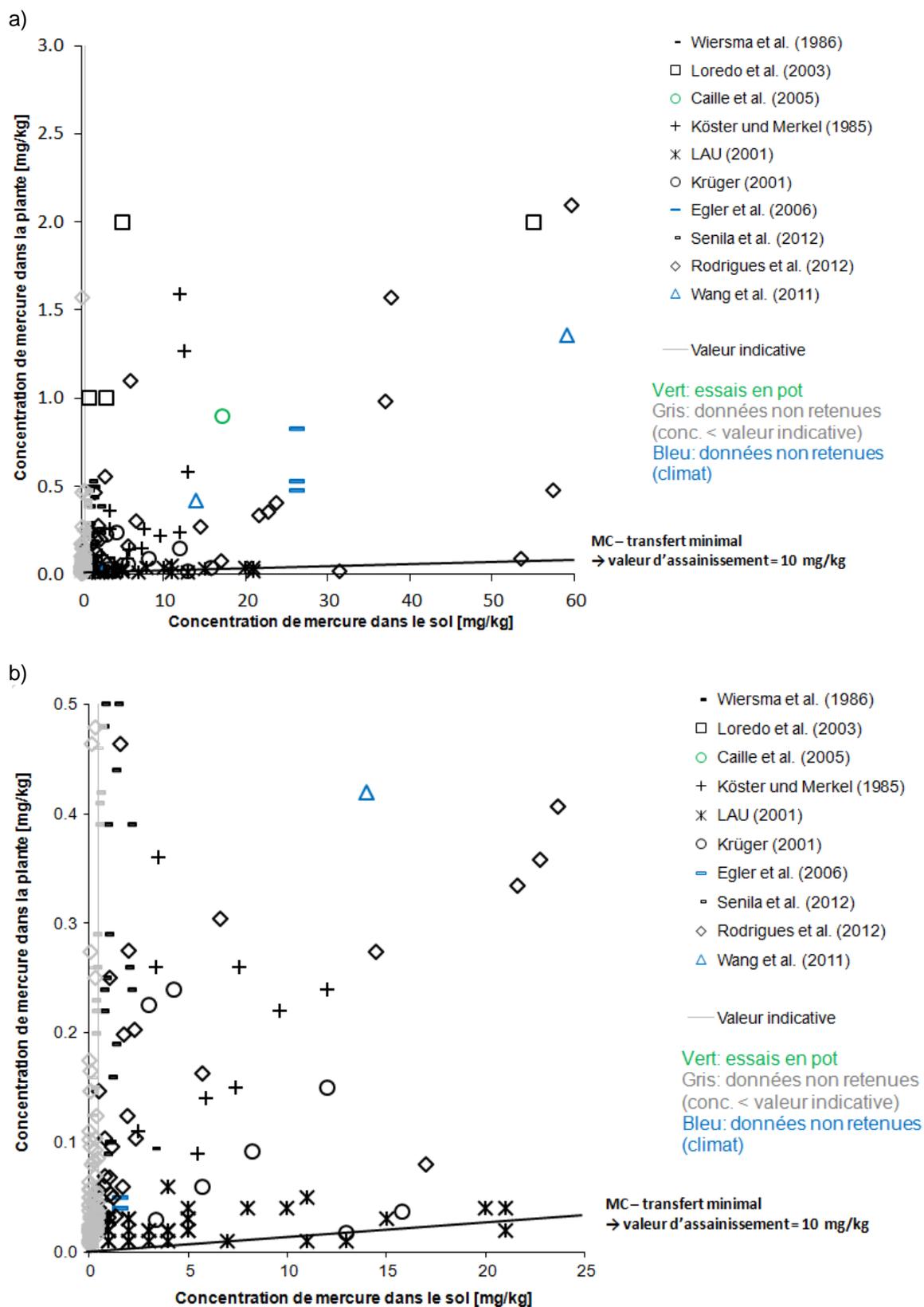


Figure 9: Etablissement de la valeur d'assainissement applicable à la voie de contamination « plantes fourragères ».

a) Vue d'ensemble (concentration dans le sol comprise entre 0 et 60 mg/kg et dans la plante entre 0 et 3 mg/kg).

b) Vue de détail (concentration dans le sol comprise entre 0 et 25 mg/kg et dans la plante entre 0 et 0,5 mg/kg). La valeur d'assainissement a été calculée en introduisant les paramètres du tableau 9 dans l'équation 1.

Voie de contamination « croissance des plantes »

Seules quelques données appropriées ont été trouvées pour décrire la voie de contamination « croissance des plantes ». L'une des « règles graduées » utilisées par Eikmann & Kloke [9] pour déterminer les paramètres du sol (Bodenwerte) I à III se rapporte à la toxicité pour les plantes. Ils fixent le seuil des effets phytotoxiques généraux à une teneur en mercure dans le sol comprise entre 50 et 100 mg/kg. Mais d'autres valeurs figurant dans leur canevas signalent des effets toxiques à plus faible concentration déjà. Par exemple, la laitue à tondre connaît une baisse de rendement de 50 % lorsque la charge de mercure dans le sol est de 40 mg/kg et le blé manifeste des anomalies de croissance allant jusqu'à l'atrophie lorsqu'elle atteint 5 à 50 mg/kg [39]. Une étude de 1973 propose 50 à 100 mg de mercure par kilo de terre comme valeur limite de phytotoxicité, car la croissance est entravée à partir de 50 mg/kg [40]. Une autre étude, qui fournit des concentrations de mercure toxiques pour les tissus végétaux, indique que le chou blanc subit une perte de rendement de 25 % (ce qui correspond à la valeur critique selon la directive de l'OFEFP [2]) lorsque la concentration atteint 6 mg/kg [41]. En introduisant cette valeur dans nos scénarios de transfert sol-plante, on obtient une teneur dans le sol de 13 à 44 mg/kg dans le cas de l'absorption maximale (seuil d'investigation) et de 68 à 95 mg/kg dans le cas de l'absorption minimale (valeur d'assainissement). Comme la phytotoxicité est un critère intervenant dans la valeur d'assainissement et que, comme déjà mentionné, d'autres études proposent une valeur limite du même ordre de grandeur (50-100 mg/kg), on peut admettre que la valeur d'assainissement liée à la croissance des plantes est supérieure à 50 mg/kg.

Agrégation des voies de contamination

Pour déterminer la valeur d'assainissement applicable à l'agriculture et à l'horticulture, on a agrégé les voies de contamination « plantes alimentaires » (PA), « plantes fourragères » (PF) et « croissance des plantes » (CP) en les introduisant dans l'équation 2:

Valeur d'assainissement = max [min (20 mg/kg; > 50 mg/kg); min (10 mg/kg, > 50 mg/kg)]

Il en résulte une valeur d'assainissement de 20 mg/kg.

3.4 Evaluation critique et recommandations

L'établissement des seuils d'investigation et de la valeur d'assainissement selon la directive de l'OFEFP [2] est entaché d'incertitudes. La corrélation entre le mercure total contenu dans le sol et dans la plante s'est avérée faible. Il en résulte que les points introduits dans les diagrammes sont très dispersés et que l'écart entre le transfert minimal et le transfert maximal du sol à la plante est large. L'écart entre le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement est par conséquent relativement large aussi, ce qui multipliera probablement le nombre de sites devant faire l'objet d'investigations.

Les données se rapportant à la voie de contamination « plantes alimentaires » étaient disponibles en quantités limitées. La plupart de celles qui ont été trouvées concernaient des légumes comme l'épinard, l'amarante, le chou et la salade. Les paires de données relatives aux légumes-racines étaient rares et aucune n'a été trouvée au sujet des céréales, des oléagineux, des fruits et des baies. Ainsi, la directive de l'OFEFP [2] n'a pu être suivie que partiellement. Au vu de l'insuffisance des paires de données disponibles par espèce, il n'était pas judicieux d'estimer le transfert à partir du sol pour chaque plante et de le comparer avec la valeur de tolérance correspondante. On a préféré constituer un corpus de données regroupant toutes celles qui portaient sur des légumes et établir les valeurs limites recherchées en estimant des valeurs de tolérance moyennes. Cette procédure simplifiée a généré des incertitudes au sujet du seuil d'investigation et de la valeur d'assainissement assignés aux cultures alimentaires.

Le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement recommandés sont regroupés dans le tableau 10 et commentés ensuite.

Tableau 10: Teneurs en mercure recommandées pour le seuil d'investigation applicable aux cultures alimentaires et fourragères selon l'OSol et pour la valeur d'assainissement applicable à l'agriculture et à l'horticulture selon l'OSites.

	Cultures alimentaires	Cultures fourragères
Seuil d'investigation	0,5 mg/kg ¹⁾	0,5 mg/kg ¹⁾
Valeur d'assainissement	20 mg/kg	

¹⁾ Identique à la valeur indicative selon l'OSol

Seuils d'investigation

Comme signalé plus haut, il n'a pas été possible de suivre strictement la directive de l'OFEFP [2] en ce qui concerne la voie de contamination « plantes alimentaires », faute de données disponibles en suffisance. Ce document recommande d'appliquer le pire des scénarios réalistes pour établir le seuil d'investigation, ce qui signifie qu'il est déterminé par la plante alimentaire dont le diagramme de points affiche la plus faible teneur limite dans le sol. Mais comme le mercure faisait l'objet d'un seul diagramme, regroupant les données sur les légumes, le scénario du pire des cas n'a pu être appliqué qu'à l'ensemble des légumes. Les configurations les plus sensibles ont certes été prises en considération pour les données collectées, mais il n'est pas certain que le pire des cas ait réellement été appréhendé à cause du manque d'informations concernant les céréales, les fruits et les baies. Il faut faire preuve de prudence, car les valeurs de tolérance applicables à ces plantes selon le ZEBS (0,03 à 0,2 mg/kg) sont nettement inférieures à la valeur de tolérance de 0,5 mg/kg attribuée aux légumes dans le paragraphe 3.3.1. C'est pourquoi il est recommandé de ne pas assigner directement aux cultures alimentaires le seuil d'investigation de 0,85 mg/kg calculé au paragraphe 3.3.1, mais de l'arrondir à 0,5 mg/kg pour qu'il corresponde au seuil d'investigation portant sur les cultures fourragères et à la valeur indicative selon l'OSol. Le chapitre 6.3 de la directive de l'OFEFP [2] va dans ce sens en préconisant que l'écart minimal entre les différents seuils d'investigation tienne compte de

l'incertitude des mesures effectuées sur les polluants. En admettant que l'écart minimal relatif au cadmium, de 50 %, soit aussi pertinent dans le cas du mercure, l'écart minimal entre les seuils d'investigation applicables aux cultures alimentaires et aux cultures fourragères devrait au moins être égal à 0,4 mg/kg.

En ce qui concerne la voie de contamination « plantes fourragères », des données étaient disponibles en suffisance et la base de données était donc satisfaisante, car la directive de l'OFEFP [2] permet de regrouper les plantes de pâturages dans un seul diagramme de points. Les calculs effectués avec l'équation 1 ont fourni, pour les deux variantes retenues, des seuils d'assainissement largement inférieurs à la valeur indicative selon l'OSol. La valeur maximale assignée aux aliments pour animaux tombe si bas que la pente de la droite décrivant le transfert sol-plante (a) peut être choisie de manière arbitraire entre 0 et 1 sans qu'un seuil d'investigation (C_{max}) supérieur à 0,5 mg/kg ne soit atteint pour le mouton (figure 10). Le seuil se trouve déjà au-dessous de la valeur indicative en ne considérant que l'ingestion directe de terre. Pour le bœuf, il ne dépasserait la valeur indicative que dans le cas d'une pente inférieure à 0,1. Or les droites de transfert sol-plante ont des pentes de 0,95 et 0,32 dans les deux variantes exposées au chapitre des résultats. L'application d'une pente inférieure à 0,1 et le choix du bœuf comme animal de pâturage ne décrivent pas le scénario du pire des cas. Pour ces différentes raisons, il est recommandé de placer le seuil d'investigation au même niveau que la valeur indicative.

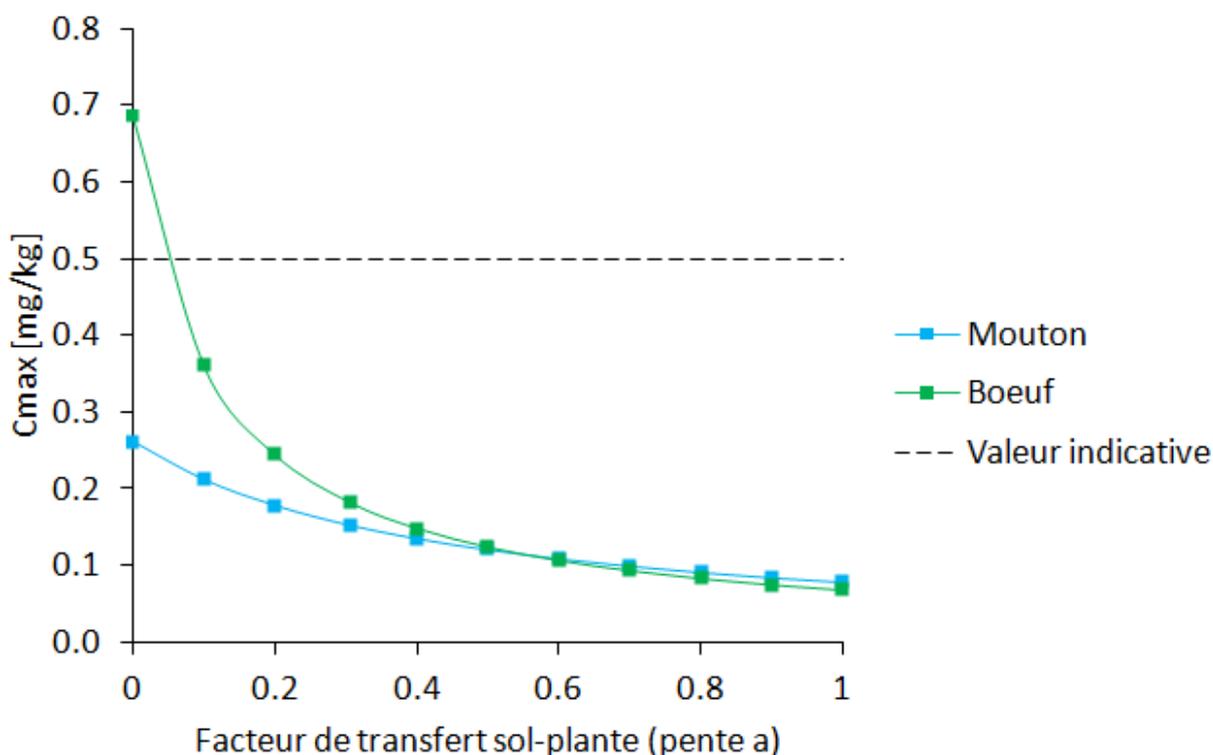


Figure 10: Relation entre le seuil d'investigation relatif aux cultures fourragères calculé avec l'équation 1 et la pente de la droite décrivant le transfert sol-plante (a) pour le mouton et pour le bœuf.

La revue des seuils d'investigation pratiqués à l'échelle internationale montre qu'une limite placée à 0,5 mg/kg tombe dans un domaine pertinent (tableau 11). Les seuils d'investigation fixés à l'étranger correspondent sensiblement à la définition suisse de l'OSol, mais les voies de contamination considérées diffèrent ou ne sont pas précisées, ce qui complique la comparaison.

Les comparaisons à l'échelle internationale portant sur les seuils d'investigation appliqués à d'autres métaux lourds ne révèlent aucune divergence systématique qui serait imputable à des définitions ou à

des applications différentes des valeurs limites. Ainsi, ce n'est pas toujours le même pays qui a la valeur la plus faible ou la plus élevée (tableau 11). Les différences semblent plutôt dues aux méthodes de calcul mises en œuvre.

Tableau 11: Comparaison internationale entre les seuils d'investigation relatifs au mercure, au plomb, au cadmium, au cuivre et au zinc pour les sols agricoles.

	Mercure [mg/kg]	Plomb [mg/kg]	Cadmium [mg/kg]	Cuivre [mg/kg]	Zinc [mg/kg]
Résultat (chap. 3.3)	0,5				
Suisse [6]	-	200	2	150	-
OFEFP [8]	10	500	2	50	300
Allemagne [10]	5				
Canada ¹⁾ [13]	0,5				
Lituanie (K. Kadunas)	0,5				
Malaisie ²⁾ [13]	0,362				
Catalogne [11]	2	60	2,5	90	170
Suède [14]	0,25	80	0,4	100	350

¹⁾ Proposed mercury criteria for the protection of selected natural resources

²⁾ Proposed mercury criteria for the protection of human health

Valeur d'assainissement

La valeur d'assainissement recommandée, de 20 mg/kg, correspond au scénario du meilleur des cas pour les données disponibles. Ce sont les teneurs liées à la voie de contamination « plantes alimentaires » qui ont été déterminantes lors de l'agrégation. Les teneurs liées aux plantes fourragères et à la croissance des plantes n'ont pas été considérées. Pour établir la valeur d'assainissement, on a admis, conformément à la conception de l'OSol, que le terrain ne peut plus être utilisé sans danger et que les restrictions d'utilisation ne permettent plus d'échapper à la menace lorsqu'elle est dépassée. Au-dessous de la valeur d'assainissement, une menace est toujours possible, mais on doit la cerner en étudiant si le seuil d'investigation est dépassé et on peut s'y soustraire dans le cas idéal en restreignant l'utilisation du sol.

Les valeurs recommandées sont supérieures à celles qui sont appliquées à l'étranger (chapitre 2). Une comparaison à l'échelle internationale montre que les valeurs d'assainissement pratiquées en Suisse sont systématiquement plus élevées qu'à l'étranger (tableau 12). C'est probablement dû au fait que la législation suisse lie plus étroitement l'intervention à la valeur d'assainissement: en cas de dépassement, l'assainissement est obligatoire et la restriction d'utilisation n'est pas une mesure suffisante, alors que les réglementations étrangères l'autorisent souvent. En Suisse, seuls la décontamination et le confinement (immobilisation des polluants sur le long terme) sont considérés comme des mesures d'assainissement (art. 16 OSites).

Tableau 12: Comparaison internationale entre les valeurs d'assainissement relatives au mercure, au plomb, au cadmium, au cuivre et au zinc pour les sols agricoles.

	Mercuré [mg/kg]	Cadmium [mg/kg]	Cuivre [mg/kg]	Plomb [mg/kg]	Zinc [mg/kg]
Résultat (chap. 3.3.)	20				
Suisse [7]		30	1000	2000	2000
Eikmann & Kloke [9]	50	5	200	1000	600
Belgique [18]	2,9	2	120	200	333
Allemagne [10]	2	20	300	1200	
Finlande [19]	2	10	150	200	250
Canada [17]	6,6	1,4	63	70	200

La situation est toutefois insatisfaisante dans la mesure où les plantes alimentaires font l'objet de données relativement peu abondantes, concernant un nombre limité de variétés. Il a donc fallu simplifier la procédure d'estimation préconisée par la directive de l'OFEFP de 1998 [2]. La valeur d'assainissement établie repose ainsi sur une base de données assez étroite. Les facteurs de transfert estimés sont en revanche publiés en plus grand nombre que les paires de données. Généralement déterminés par régression linéaire à partir d'une série de paires de données par variété de plante, ils indiquent la relation entre la concentration dans le sol et dans la plante qui pousse sur cette terre. Quelque 75 facteurs de transfert, se rapportant à 22 espèces de plantes alimentaires, trouvés dans la littérature [42-45] ont été considérés pour étayer la valeur d'assainissement de 20 mg/kg proposée ici et pour s'assurer de sa plausibilité. On a ainsi calculé, pour chaque facteur de transfert, une « valeur d'assainissement » par variété de plante en résolvant l'équation suivante:

$$VA = \frac{C_{\text{plante TVT}}^{\text{max}}}{FT_{\text{TVT}/\text{TVT}}}$$

Avec:

VA	Valeur d'assainissement [mg/kg]
$C_{\text{plante TVT}}^{\text{max}}$	Valeur limite dans la plante (poids sec)
$FT_{\text{TVT}/\text{TVT}}$	Facteur de transfert sol-plante (poids sec)

Si on rapporte les concentrations limites dans les plantes $C_{\text{plante TVT}}^{\text{max}}$ – égales au triple de la valeur de tolérance selon la directive de l'OFEFP de 1998 [2] – à ces facteurs de transfert (équation ci-dessus), on obtient des valeurs d'assainissement comprises entre 1 et 200 mg/kg (figure 11). Les 20 mg/kg proposés ici pour les plantes alimentaires sur la base du scénario du meilleur des cas tombent dans le tiers inférieur de la distribution des fréquences. Les courbes n'incluent pas les chiffres relatifs aux plantes à graines comme les céréales, le colza ou le tournesol, car la concentration de mercure dans les graines était généralement inférieure au seuil de détection analytique ou n'était pas corrélée avec sa concentration dans le sol [46-50]. Szabo & Fodor [49] ont trouvé lors d'un essai en champ jusqu'à 111 mg/kg de mercure dans la paille de blé sans en détecter dans les grains. La largeur de l'extrapolation représente un problème crucial dans ces estimations découlant de facteurs de transfert: les concentrations dans le sol ne dépassaient pas 20 mg/kg et elles étaient souvent inférieures à 1 mg/kg.

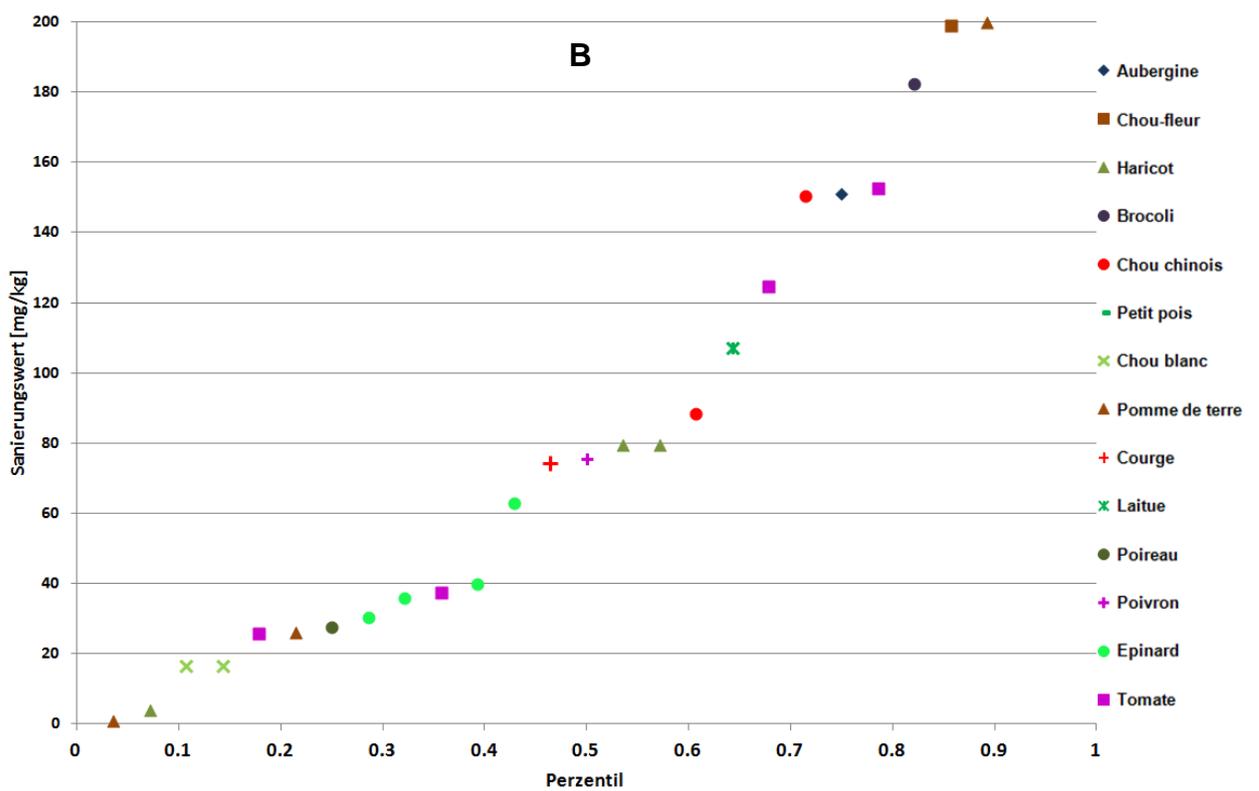
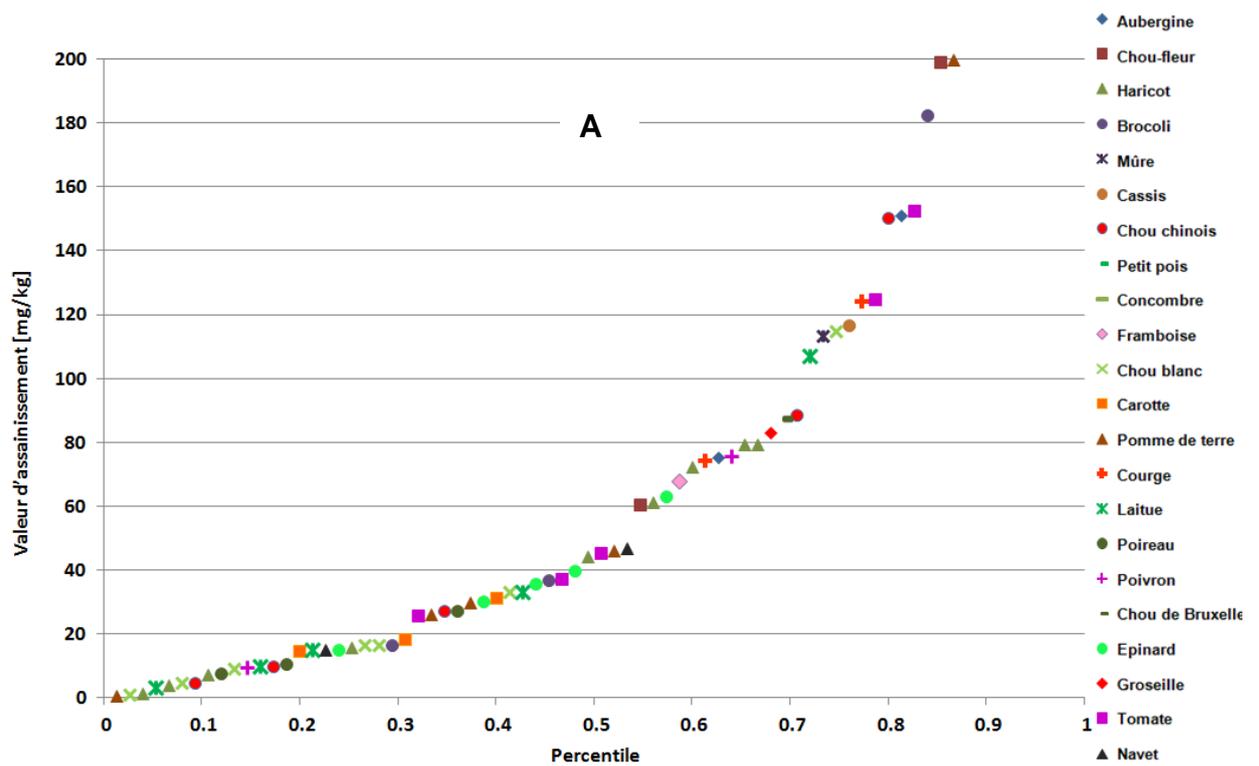


Figure 11: Fréquence cumulée des valeurs d'assainissement calculées à partir des facteurs de transfert.
 A: Teneur en mercure dans le sol de 0,1 à 20 mg/kg.
 B: Teneur en mercure dans le sol limitée au domaine de 2 à 20 mg/kg.

L'extrême dispersion des facteurs de transfert et des valeurs d'assainissement qui en découlent reflète probablement la faible corrélation entre les teneurs en mercure total dans les sols et dans les plantes. De nombreuses raisons peuvent expliquer cela:

a) Forme du mercure

Le mercure est présent dans la nature sous forme ionique (Hg^{2+}), sous forme métallique (Hg^0) ou dans des composées organiques. Les voies de pollution et la disponibilité du mercure diffèrent d'une forme à l'autre.

b) Caractéristiques du sol

La solubilité du Hg^{2+} dans le sol – et par conséquent sa disponibilité pour les plantes – varie en fonction du pH (figure 12). Elle diminue fortement au-delà d'un pH de 5,5 [51]. Elle dépend aussi de la teneur en argile et en matière organique du sol, l'adsorption sur les matériaux organiques étant indépendante du pH.

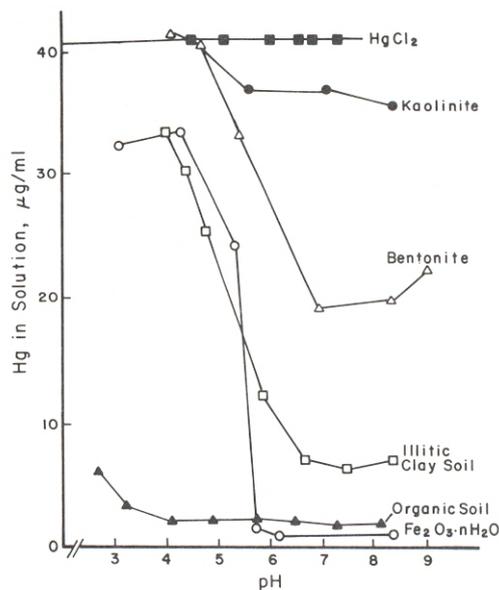


Figure 12: Solubilité du Hg^{2+} en fonction du pH en présence de différents matériaux adsorbants (tiré de [51]).

c) Espèce de plante

L'absorption de mercure varie d'une espèce de plante à l'autre, mais elle est habituellement faible. La corrélation entre sa teneur dans le sol et dans les racines est souvent encore significative [47, 51], mais il est généralement si peu concentré dans la tige, les feuilles et les semences (< 0,5 % de la concentration dans les racines) [52] que la corrélation n'est plus significative [46, 47]. De nombreuses espèces de plantes semblent dotées d'une barrière entravant efficacement le passage du mercure des racines aux pousses [51, 53].

d) Dépôts atmosphériques

La pollution de l'air par du mercure se manifeste dans les pousses. Le mercure transporté par l'air est absorbé par les feuilles, puis distribué dans le reste de la plante. Sa migration est même plus importante depuis les feuilles que depuis les racines [51, 54]. La pollution de l'air peut provenir d'un dégazage de mercure élémentaire ou organique à partir du sol ou encore, par exemple, de rejets d'industries voisines suivis de dépôts atmosphériques [46, 47, 50, 53]. Ces mécanismes sont susceptibles de fausser les facteurs de transport lorsque l'étude a été menée sur un site touché par des émissions industrielles.

La vérification de la plausibilité des résultats esquissée ici semble étayer la valeur d'assainissement proposée de 20 mg/kg. Elle tombe dans le quartile inférieur des valeurs approchées pour les concentrations dans le sol supérieures à 2 mg/kg (figure 11B), c'est pourquoi il semble qu'il faille plutôt la corriger vers le haut. Mais la vérification de la plausibilité au moyen des facteurs de transfert montre que la valeur d'assainissement proposée n'est pas trop élevée, car les facteurs appliqués ici extrapolent les valeurs d'assainissement largement au-delà des domaines de concentration dans lesquels ils ont été déterminés. Il en résulte d'importantes incertitudes. La corrélation faible entre la teneur dans le sol et dans la plante ne justifie aucunement une telle extrapolation. Le choix des données de la figure 8 était donc beaucoup plus plausible, puisqu'il a permis d'interpoler une valeur d'assainissement.

3.5 Discussion

Seuils d'investigation

Les seuils d'investigation établis ici, de 0,5 mg/kg pour les plantes alimentaires aussi bien que fourragères, sont identiques à la valeur indicative selon l'OSol actuellement en vigueur. Ce cas de figure s'était déjà présenté lors de la détermination des seuils d'investigation appliqués au cadmium. La valeur de tolérance était déjà dépassée pour toutes les plantes alimentaires alors que la concentration dans le sol était encore inférieure à 1 mg/kg. Le fait de ramener le seuil d'investigation au niveau de la valeur indicative (0,8 mg/kg) aurait eu pour effet de susciter de nombreuses investigations, d'après un argument avancé à l'époque. Comme cela ne semblait pas judicieux « pour des raisons pratiques et économiques » et qu'une forte augmentation de la concentration dans les plantes n'avait été observée qu'à partir d'une teneur dans le sol de 3 mg/kg, on avait fixé le seuil d'investigation relatif au cadmium à 2 mg/kg, ce qui l'avait amené dans le domaine des valeurs limites en vigueur à l'étranger. Ayant estimé que le fait d'appliquer les valeurs de tolérance relatives aux plantes alimentaires comme critère d'appréciation générerait une sécurité suffisante, on avait jugé défendable de poser le seuil d'investigation à 2 mg/kg. Mais prendre une décision de cette nature pour fixer les valeurs limites se rapportant au mercure reviendrait à tenir compte d'impératifs socio-économiques et à sortir des considérations purement scientifiques invoquées dans la présente démarche d'établissement des seuils d'investigation.

Valeur d'assainissement

Lors de l'agrégation des voies de contamination considérées pour établir la valeur d'assainissement, c'est la plus haute des deux valeurs se rapportant aux cultures alimentaires et aux cultures fourragères qui est jugée déterminante. Cela est motivé par le fait que la valeur d'assainissement doit être fixée à une hauteur telle que, lorsqu'elle est dépassée, il ne puisse plus être possible de prononcer des restrictions d'utilisation du sol. En d'autres termes, ni les cultures alimentaires, ni les cultures fourragères ne sont autorisées au-delà de la valeur d'assainissement. C'est la valeur relative aux plantes alimentaires qui a été déterminante dans le cas présent. Mais, pour les concentrations tombant entre le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement, l'évaluation de la menace pourrait amener à ce que des plantes alimentaires puissent être cultivées alors les cultures fourragères et le pâturage seraient interdits.

La hauteur de la valeur d'assainissement n'est pas déterminante pour la sécurité alimentaire, en partant du principe que l'étude de la menace occasionnée par un sol pollué par du mercure en concentration tombant dans le domaine d'investigation (comprise entre le seuil d'investigation et la valeur d'assainissement) révèle les risques pour la sécurité d'une manière fiable. La fiabilité de l'étude de la menace influence l'ampleur du risque résiduel. En ce sens, le niveau de la valeur d'assainissement n'a qu'une incidence indirecte sur la sécurité alimentaire. Il est par contre essentiel en termes de coûts. Plus il est élevé, plus les investigations et les assainissements obligatoires seront nombreux.

4. Perspectives

Les seuils d'investigation et la valeur d'assainissement recommandés dans le présent rapport s'appliquent aux teneurs totales en mercure, car seules celles-ci ont été mesurées dans les échantillons de plantes et de sols traités dans les études examinées. Or les composés organiques du mercure sont beaucoup plus toxiques que les inorganiques. C'est pourquoi cette problématique est abordée dans le rapport « Le mercure dans les sols: composés organiques du mercure » (Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Juin 2013).

D'après les données disponibles, il semble qu'il n'y ait pas de corrélation statistique significative entre les teneurs totales en mercure dans le sol et dans les plantes. Cela peut être dû à l'utilisation de corpus de données pour examiner les plantes alimentaires, mais il se pourrait aussi que la teneur totale en mercure dans le sol ne corresponde pas à la fraction disponible pour les plantes. En considérant la concentration en mercure soluble dans le sol, on obtiendrait peut-être une meilleure corrélation, qui étayerait plus solidement les valeurs limites. On pourrait donc aussi établir les seuils d'investigation applicables à ces fractions solubles, comme prévu dans l'OSol. Les données relatives aux sols et aux plantes devraient alors provenir d'expériences spécifiques à la Suisse, car la composition des solvants d'extraction varie généralement d'un pays à l'autre.

5. Références bibliographiques

1. Canton du Valais (2011): Communiqué de presse « Pollution au mercure le long du Grossgrundkanal ». Dernière consultation le 17.10.2012; http://www.vs.ch/Public/doc_detail.asp?ServiceID=&DocumentID=27922.
2. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (1998): Etablissement de seuils d'investigation et de valeurs d'assainissement pour les polluants inorganiques dans les sols. Documents environnement n° 83 – Sol. Auteurs: Hämman, M. & Gupta, S.K.
3. Office fédéral de la santé publique OFSP (2012): Fiche d'information « Mercure ». Dernière consultation le 17.10.2012; <http://www.bag.admin.ch/themen/chemikalien/00228/03912/index.html?lang=fr>.
4. Fitzgerald, W.F. & Lamborg, C.H. (2003): Geochemistry of Mercury in the Environment. *Treaties on Geochemistry* 9, pp. 107-148.
5. FAO/WHO (2011): Evaluation of certain contaminants in food. Seventy-second JEFCA Report. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JEFCA). WHO Technical Report Series No. 959; http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_959_eng.pdf.
6. Ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées au sol (OSol, RS 814.12). Dernière consultation le 05.10.2012; <http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.12.fr.pdf>.
7. Ordonnance du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites, RS 814.680). Dernière consultation le 05.10.2012; <http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.680.fr.pdf>.
8. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (2005): Manuel – Sols pollués. Evaluation de la menace et mesures de protection. Auteurs: Mailänder, R.A. & Hämman, M.
9. Eikmann, T. & Kloke, A. (1993): Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-) Stoffe in Böden. *In* Bodenschutz, ergänzbares Handbuch, G. Einsele Editor. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
10. Bundesregierung (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Dernière consultation le 18.10.2012; <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschv/gesamt.pdf>.
11. Generalitat de Catalunya (2005): Real Decreto 9/2005. Dernière consultation le 18.10.2012; <http://www.boe.es/boe/dias/2005/01/18/pdfs/A01833-01843.pdf>.
12. Swedish Environmental Protection Agency EPA (1996): Development of Generic Guideline Values. Dernière consultation le 18.10.2012; <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-4639-X.pdf>.
13. Eisler, R. (2006): Proposed Mercury Criteria for Protection of Natural Resources and Human Health. *In* Mercury: Hazards to living organisms. R. Eisler Editor. CRC Press, Boca Raton, FL.
14. Swedish Environmental Protection Agency EPA (2012): Table of generic guideline values. Dernière consultation le 05.11.2012; <http://www.naturvardsverket.se/en/In-English/Start/Operations-with-impact-on-the-environment/Remediation-of-contaminated-areas/Classification-and-risk-assessment/Generic-guideline-values-for-contaminated-soils/Table-of-generic-guideline-values/>.
15. Kabata-Pendias, A. & Sadurski, W. (2004): Trace elements and compounds in soil. *In* Elements and their compounds in the environment, Merian, E, Anke, M., Ichnat, M. & Stoeppler, M. Editoren. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim.
16. Government of Alberta (2010): Alberta Tier 1 soil and groundwater remediation guidelines. Dernière consultation le 31.10.2012; <http://environment.gov.ab.ca/info/library/7751.pdf>.
17. Canadian Council of Ministers of the Environment CCME (1999): Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health: Mercury. Dernière consultation le 18.10.2012; <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/>.
18. Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (Flemish Office of Waste Management, OVAM) (1996): Order of the Flemish government establishing the Flemish regulation on soil remediation and soil protection. Dernière consultation le 18.10.2012; <http://navigator.emis.vito.be/milnav-consult/plainWettekstServlet?wettekstId=23754&lang=en>.
19. Ministry of the Environment, Finland (2007): Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs. Dernière consultation le 18.10.2012; <http://www.finlex.fi/fi/laki/kaannokset/2007/en20070214.pdf>.

20. Ordonnance du DFI du 26 juin 1995 sur les substances étrangères et les composants dans les denrées alimentaires (ordonnance sur les substances étrangères et les composants, OSEC, RS 817.021.23). Dernière consultation le 05.10.2012; <http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/817.021.23.fr.pdf>.
21. Ordonnance du DEFR du 26 octobre 2001 sur la production et la mise en circulation des aliments pour animaux, des additifs destinés à l'alimentation animale et des aliments diététiques pour animaux (ordonnance sur le Livre des aliments pour animaux, OLALA, RS 916.307.1). Dernière consultation le 05.10.2012; <http://www.admin.ch/ch/f/rs/9/916.307.1.fr.pdf>.
22. Caille, N., Vauleon, C., Leyval, C. & Morel, J.-L. (2005): Metal transfer to plants grown on a dredged sediment: use of radioactive isotope ²⁰³Hg and titanium. *Science of the Total Environment* 341, pp. 227-239.
23. Chunilall, V., Kindness, A. & Jonnalagadda, B. (2004): Heavy metal uptake by spinach leaves grown on contaminated soils with lead, mercury, cadmium and nickel. *Journal of Environmental Science and Health B39*(3), pp. 473-481.
24. Chunilall, V., Kindness, A. & Jonnalagadda, B. (2005): Heavy metal uptake by two edible *Amaranthus* herbs grown on soils contaminated with lead, mercury, cadmium and nickel. *Journal of Environmental Science and Health* 40, pp. 375-384.
25. Egler, S.G., Rodrigues-Filho, S., Villas-Bôas, R.C. & Beinhoff, C. (2006): Evaluation of mercury pollution in cultivated and wild plants from two small communities of the Tapajós gold mining reserve, Pará State, Brazil. *Science of the Total Environment* 368, pp. 424-433.
26. Kloke, A. (1991): Nutzungsmöglichkeiten und Sanierung belasteter Böden. VDLUFA-Schriftenreihe, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA). Vol. 34/1991, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
27. Krüger, F. & Gröngroft, A. (2003): The difficult assessment of heavy metal contamination of soils and plants in Elbe river floodplains. *Acta Hydrochimica et hydrobiologica* 31(4-5), pp. 436-443.
28. Lenka, M., Panda, K.K. & Panda, B.B. (1992): Monitoring and Assessment of mercury pollution in the vicinity of a Chloralkali plant. IV. Bioconcentration of mercury in In Situ aquatic and terrestrial plants at Ganjam, India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 22, pp. 195-202.
29. Li, G., Feng, X., Qiu, G., Bi, X., Li, Z., Zhang, C., Wang, D., Shang, L. & Guo, Y. (2008): Environmental mercury contamination of an artisanal zinc smelting area in Weining County, Guizhou, China. *Environmental Pollution* 154, pp. 21-31.
30. Loredó, J., Pereira, A. & Ordóñez, A. (2003): Untreated abandoned mercury mining works in a scenic area of Asturias (Spain). *Environment International* 29, pp. 481-491.
31. Liu, W.-X., Li, H.-H., Li, S.-R. & Wang, Y.-W. (2006): Heavy metal accumulation of edible vegetables cultivated in agricultural soil in the suburb of Zhengzhou City, People's Republic of China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 76, pp. 163-170.
32. Rodrigues, S.M., Henriques, B., Reis, A.T., Duarte, A.C., Pereira, E. & Römken, P.F.A.M. (2012): Hg transfer from contaminated soils to plants and animals. *Environmental Chemistry Letters* 10, pp. 61-67.
33. Senila, M., Levei, E.A., Senila, L.R., Oprea, G.M. & Roman, C.M. (2012): Mercury in soil and perennial plants in a mining-affected urban area from Northwestern Romania. *Journal of Environmental Science and Health* 47, pp. 614-621.
34. Sipter, E., Rózsa, E., Gruiz, K., Tátrai, E. & Morvai, V. (2008): Site-specific risk assessment in contaminated vegetable gardens. *Chemosphere* 71, pp. 1301-1307.
35. Wang, J., Feng, X., Anderson, C.W.N., Zhu, W., Yin, R. & Wang, H. (2011): Mercury distribution in the soil-plant-air system at the Wanshan mercury mining district in Guizhou, Southwest China. *Environmental Toxicology and Chemistry* 30 (12), pp. 2725-2731.
36. Wiersma, D., van Goor, B.J. & van der Veen, N.G. (1986): Cadmium, Lead, Mercury, and Arsenic concentrations in crops and corresponding soils in the Netherlands. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 34, pp. 1067-1074.
37. Commission des communautés européennes (2006): Règlement (CE) n° 1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires. Dernière consultation le 30.10.2012; <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:364:0005:0024:fr:PDF>.

38. Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. (2001): Trace Elements in Soils and Plants, CRC Press, Boca Raton, Florida.
39. Eikmann, T., Kloke, A. & Lühr, T.H. (1991): Grundlagen und Wege zur Ermittlung von Bodenwerten für das Drei-Bereiche-System. *In* IWS Schriftenreihe. Erich Schmidt Verlag, Berlin, pp. 279-351.
40. Koronowski, P. (1973): Nebenwirkungen von Quecksilberverbindungen auf Mensch und Tier. *In* Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem. Berlin.
41. Macnicol, R.D. & Beckett, P.H.T. (1985): Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. *Pant and Soil* 85, pp. 107-129.
42. Ian, M. & Claire, C. (2009): Supplementary information for the derivation of SGV for mercury Environment Agency, UK. Dernière consultation le 23.01. 2013; <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/SCHO0309BPQA-e-e.pdf>.
43. Qian, J.P., Zhang, L., Chen, H.Z., Hou, M., Niu, Y.F., Xu, Z.P. & Liu, H.L (2009): Distribution of Mercury Pollution and Its Source in the Soils and Vegetables in Guilin Area, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 83(6), pp. 920-925.
44. Zheng, N., Wang, Q.C. & Zheng, D.M. (2007): Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables. *Science of the Total Environment* 383(1-3), pp. 81-89.
45. Wang, X., Wang, F.H., Chen, B., Sun, F.F., He, W., Wen, D., Liu, X.X. & Wang, Q.F. (2012): Comparing the health risk of toxic metals through vegetable consumption between industrial polluted and non-polluted fields in Shaoguan, south China. *Journal of Food Agriculture & Environment* 10(2), pp. 943-948.
46. Feng, X.B., Li, G.H. & Qiu, G.L. (2006): A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang County, Guizhou, China. Part 2. Mercury contaminations to soil and crop. *Science of the Total Environment*. 368(1), pp. 47-55.
47. Niu, Z.C., Zhang, X.S., Wang, Z.W. & Ci, Z.J. (2011): Field controlled experiments of mercury accumulation in crops from air and soil. *Environmental Pollution* 159(10), pp. 2684-2689.
48. Granato, T.C., Pietz, R.I., Gschwind, J. & Luehing, C. (1995): Mercury in soils and crops from field receiving high cumulative sewage-sludge applications – Validation of U.S. EPA's risk assessment for human ingestion. *Water Air and Soil Pollution* 80(1-4), pp. 1119-1127.
49. Szabo, L. & Fodor, L. (2006): Uptake of microelements by crops grown on heavy metal-amended soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37(15-20), pp. 2679-2689.
50. De Vries, W., Romkens, P. & Schutze, G. (2007): Critical soil concentrations of cadmium, lead, and mercury in view of health effects on humans and animals. *In* *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 191, G. W. Ware Editor. Springer, New York, pp. 91-130.
51. Adriano, D.C. (1986): Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer, New York.
52. Greger, M., Wang, Y.D. & Neuschütz, C. (2005): Absence of Hg transpiration by shoot after Hg uptake by roots of six terrestrial plant species. *Environmental Pollution* 134(2), pp. 201-208.
53. Patra, M. & Sharma, A. (2000): Mercury toxicity in plants. *Botanical Review* 66(3), pp. 379-422.
54. Kaiser, G. & Tölg, G. (1980): Mercury. *In* The handbook of environmental chemistry, Otto Hutzinger Editor. Springer-Verlag Berlin, pp. 1-58.
55. Commission des communautés européennes (2008): Règlement (CE) n° 149/2008 de la Commission du 29 janvier 2008 modifiant le règlement (CE) n° 396/2005 du Parlement européen et du Conseil pour y ajouter les annexes II, III et IV fixant les limites maximales applicables aux résidus de produits figurant à son annexe I. Dernière consultation le 05.12.2012; <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2008R0149:20080901:FR:PDF>.
56. FAO/WHO (2007): Evaluation of certain food additives and contaminants (Sixty-seventh JEFCA Report). Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JEFCA), WHO Technical Report Series, 940; http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_940_eng.pdf.

57. Carlon, C., D'Alessandro, M. & Swartjes, F. (2007): Derivation methods of soil screening values in Europe. European Communities. Dernière consultation le 18.10.2012; http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eu soils_docs/other/EUR22805.pdf.
58. Wilke, B.-M., Fucks, M., See, R., Skoluda, R., Hund-Rinke, K., Görtz, T., Nöker, R., Peters, R., Pieper, S., Kratz, W., Römbke, J., Kalsch, W., Moser, T., Sittinger, P. & Steiger, H. (2001): Entwicklung ökotoxikologischer Orientierungswerte für Böden. *In* Übergreifende Angelegenheiten Bodenökologie, Bodenqualität. Umweltbundesamt Editor.
59. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (2000): Circular on target and intervention values. Dernière consultation le 18.10.2012; http://esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS_I2000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf.
60. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (2007): Regeling bodemkwaliteit. Dernière consultation le 18.10.2012; http://wetten.overheid.nl/BWBR0023085/geldigheidsdatum_18-10-2012.
61. Statens Forurensningstilsyn (Norwegian Pollution Control Authority, SFT) (1999): Guideline values for the risk assessment of contaminated sites. Dernière consultation le 18.10.2012; <http://www.klif.no/publikasjoner/andre/1691/ta1691.pdf>.
62. National Environmental Protection Council NEPM (2011): Guideline on Investigation levels for soil and groundwater. Dernière consultation le 18.10.2012; http://www.scew.gov.au/archive/site-contamination/pubs/asc-nepm/schedule_b1_guideline_on_investigation_levels_for_soil_and_groundwater_sep10.pdf.
63. IHOBE SA: Investigación de la contaminación del suelo. Dernière consultation le 18.10.2012; <http://www.ihobe.net/Paginas/Ficha.aspx?IdMenu=8eefd843-1f7a-43dc-bc9a-ca08859ccaf6>.
64. Morgan, H., De Búrca, R., Martin, I. & Jeffries, J. (2009): Soil Guideline Values for mercury in soil. Environment Agency, UK. Dernière consultation le 18.10. 2012; <http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/SCHO0309BPQG-e-e.pdf>.
65. United States Environmental Protection Agency EPA (2002): Supplemental Guidance for developing soil screening levels for superfund sites. Dernière consultation le 18.10.2012; http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/pdfs/ssg_main.pdf.
66. Government of Japan (2002): Soil Contamination Countermeasure Act (No. 53). Dernière consultation le 18.10.2012; <http://www.env.go.jp/en/laws/water/sccact.pdf>.
67. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu (2009): Soil remediation circular. Dernière consultation le 18.10.2012; <http://de.scribd.com/doc/40493438/Soil-Remediation-Circular-2009>.
68. Alloway, B.J. (1999): Schwermetalle in Böden, Analytik, Konzentrationen und Wechselwirkungen. Springer, Berlin.
69. Bundesregierung (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz, BBodSchG). Dernière consultation le 16.10.2012; <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschg/gesamt.pdf>.
70. Ministry of the Environment, Finland (2000): Environmental Protection Act. Dernière consultation le 13.10.2012; <http://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2000/en20000086.pdf>.

6. Annexes

Annexe 1: Personnes et experts contactés

Nom	Institution	Rue	Localité	Pays
Dr. Chris Anderson	Massey University			Nouvelle-Zélande
Prof. Paul Bardos	r3 Environmental Technology Ltd	Russell Building Whiteknights	PO Box 233 Reading RG6 6DW	Royaume-Uni
Dr. Beat Brüscheiler	Office fédéral de la santé publique OFSP, division Sécurité alimentaire	Stauffacherstrasse 101	8004 Zurich	Suisse
Dr. Hector Conesa	Universidad Politécnica de Cartagena	Paseo Alfonso XIII, 48	30203 Cartagena	Espagne
Dominique Darmendrail	Direction générale du BRGM	Tour Mirabeau, 39-43, Quai André Citroën	75739 Paris cedex 15	France
Esther Goidts	Direction générale opérationnelle de l'agriculture, des ressources naturelles et de l'environnement	Avenue Prince de Liège 15	B-5100 Namur	Belgique
Kestutis Kadunas	Lithuanian geological survey, Ministry of the environment	S. Konarskio str. 35	LT- 03123 Vilnius	Lituanie
Frank Krüger	ELENA Boden Wasser Monitoring	Zehrener Dorfstrasse 22	39619 Arendsee	Allemagne
Tina Leger	Ministère de l'écologie, du dévelop- pement durable et de l'énergie (DGPR-B3S)	Grande Arche Paroi Nord	92 055 La Défense Cedex	France
Huifang Ma	ETH Zürich Institute for terrestrial ecosystems	Universitätstrasse 16	8092 Zürich	Suisse
Dr. Peter Nadebaum	GHD	Level 8, 180 Lonsdale Street	Melbourne, Victoria, 3000	Australie
Prof. Dr. Thorsten Reemtsma	Helmholtz centre for environmental research, Department of analytical chemistry	Permoserstrasse 15	04318 Leipzig	Allemagne
Prof. Dr. Jörg Rinklebe	Bergische Universität Wuppertal, Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen	Pauluskirchstrasse 7	42285 Wuppertal	Allemagne
Dr. Brett Robinson				Nouvelle-Zélande
Dr. Sónia Rodrigues	Universidade de Aveiro CESAM Centro de estudos do ambiente et do mar	Campus Universitário de Santiago	3810-193 Aveiro	Portugal
Dr. Sarah Rothenberg	Department of environmental health sciences, PHRC, 401	921 Assembly Street	SC 29208 Columbia	Etats-Unis
Prof. Dr. Rainer Schulin	ETH Zürich Institute for terrestrial ecosystems	Universitätstrasse 16	8092 Zürich	Suisse
Marin Senila	INCDO-INOE 2000, Research institute for analytical instrumentation ICIA	Donath Street 67, CP 717, OP 5	400293 Cluj-Napoca	Roumanie
Emese Sipter	Department of labor and environmental health, Semmelweis University	Nagyvárad tér 4	1089 Budapest	Hongrie
Dr. Susan Tandy	ETH Zürich Institute for terrestrial ecosystems	Universitätstrasse 16	8092 Zürich	Suisse
Dr. Jan Wiederhold	ETH Zürich Institute of biogeochemistry and pollutant dynamics	Universitätstrasse 16	8092 Zürich	Suisse
Dr. Ming Hung Wong	Hong Kong Baptist University Department of biology	Kowloon Tong		China

Annexe 2: Valeurs limites appliquées au mercure à l'étranger

- Tableau 1: Valeurs indicatives

(Les concentrations inférieures à ces valeurs ne présentent aucun danger pour les personnes, les animaux et l'environnement.)

	Valeur indicative [mg/kg]	Commentaire	Source
Allemagne	0,1	Limon	BBodSchV [10]
Allemagne	0,5	Limon	BBodSchV [10]
Allemagne	1	Argile	BBodSchV [10]
Belgique (Flandres)	0,05		Carlou et al. [57]
Chine	0,15	Réserves naturelles	Courriel de Huifang Ma
Chine	0,3-1	Terres agricoles	Courriel de Huifang Ma
Chine	1,5	Forêts	Courriel de Huifang Ma
Finlande	0,2		Eisler [13]
France	3,5		Courriel de D. Darmendrail
Norvège	0,05 - 0,2	Valeur générale	SFT [61]
Pays-Bas	0,3	Objectif	Eisler [13]
Pays-Bas	0,5	Valeur de fond	Eisler [13]
Pays-Bas	0,15	Valeur de fond	VROM [60]
Pays-Bas	0,3		Wilke et al. [58]
Pays-Bas	0,3	Objectif	VROM [59]
Pays-Bas	0,3	Valeur de fond	VROM [59]
Slovaquie	0,3		Carlou et al. [57]
Suède	0,25	Périmètres résidentiels, petits jardins	EPA [12]
Suède	2,5	Périmètres industriels et artisanaux	EPA [12]
Tchéquie	0,4		Carlou et al. [57]

- Tableau 2: Seuils d'investigation

(Les concentrations supérieures à ces valeurs nécessitent des études au cas par cas, généralement sous la forme d'analyses des risques.)

- Tableau 2.1: Périmètres industriels et artisanaux

	Seuil d'investigation [mg/kg]	Commentaire	Source
En général	2		Eisler [13]
Allemagne	80		BBodSchV [10]
Australie	200	Méthylmercure	NEPM [62]
Australie	800	Mercure inorganique	NEPM [62]
Australie	200	Méthylmercure	Courriel de P. Nadebaum
Australie	4000	Mercure inorganique	Courriel de P. Nadebaum
Belgique	11	Flandres	OVAM [18]
Canada	24	Périmètres artisanaux	CCME [17]
Canada	50	Périmètres industriels	CCME [17]
Espagne	40	Pays basque	IHOBE [63]
Etats-Unis	340		EPA [65]
France	600		Courriel de D. Darmendrail
Pays-Bas	4,8		VROM [60]
Royaume-Uni	26	Mercure élémentaire	Morgan et al. [64]
Royaume-Uni	3600	Mercure inorganique	Morgan et al. [64]
Royaume-Uni	410	Méthylmercure	Morgan et al. [64]
Suède	5	Avec extraction d'eau souterraine	EPA [12]
Suède	7	Sans extraction d'eau souterraine	EPA [12]

– Tableau 2.2: Périmètres résidentiels

	Seuil d'investigation [mg/kg]	Commentaire	Source
Allemagne	20		BBodSchV [10]
Australie	1		Eisler [13]
Australie	30	Méthylmercure	Courriel de P. Nadebaum
Australie	130	Mercure inorganique	Courriel de P. Nadebaum
Australie	30	Méthylmercure	NEPM [62]
Australie	600	Mercure inorganique	NEPM [62]
Belgique	4,8	Flandres	OVAM [18]
Espagne	4	Pays basque	IHOBE [63]
Etats-Unis	23		EPA [65]
France	7		Courriel de D. Darmendrail
Pays-Bas	0,83		VROM [60]
Royaume-Uni	1	Mercure élémentaire	Morgan et al. [64]
Royaume-Uni	170	Mercure inorganique	Morgan et al. [64]
Royaume-Uni	11	Méthylmercure	Morgan et al. [64]

– Tableau 2.3: Petits jardins, places de jeu, sport et loisir

	Seuil d'investigation [mg/kg]	Commentaire	Source
En général	1		Eisler [13]
En général	2		OFEFP [8]
Allemagne	10	Places de jeu pour enfants	BBodSchV [10]
Allemagne	50	Parcs et installations de loisir	BBodSchV [10]
Australie	10	Méthylmercure, petits jardins	Courriel de P. Nadebaum
Australie	40	Hg inorganique, petits jardins	Courriel de P. Nadebaum
Australie	10	Méthylmercure, places de jeu	Courriel de P. Nadebaum
Australie	80	Hg inorganique, places de jeu	Courriel de P. Nadebaum
Australie	10	Méthylmercure, petits jardins	NEPM [62]
Australie	200	Hg inorganique, petits jardins	NEPM [62]
Australie	14	Méthylmercure, places de jeu	NEPM [62]
Australie	400	Hg inorganique, places de jeu	NEPM [62]
Belgique	4,8	Flandres	OVAM [18]
Canada	6,6		CCME [17]
Espagne	4	Places de jeu (Pays basque)	IHOBE [63]
Espagne	15	Parcs et installations de loisir (Pays basque)	IHOBE [63]
Royaume-Uni	26	Mercure élémentaire	Morgan et al. [64]
Royaume-Uni	80	Mercure inorganique	Morgan et al. [64]
Royaume-Uni	8	Méthylmercure	Morgan et al. [64]

– Tableau 2.4: Agriculture

	Seuil d'investigation [mg/kg]	Commentaire	Source
En général	10		OFEFP [8]
Allemagne	5		BBodSchV [10]
Canada	0,5		Eisler [13]
Espagne (Catalogne)	2		GENCAT [11]
Lituanie	0,5		Courriel de K. Kadunas
Malaisie	0,362		Eisler [13]
Suède	1		EPA [12]

– Tableau 2.5: Utilisation du sol non définie

	Seuil d'investigation [mg/kg]	Commentaire	Source
En général	0,4	Calculs avec Diabex	Wilke et al. [58]
En général	0,2	Calculs avec Fame	Wilke et al. [58]
Allemagne	2		Eisler [13]
Allemagne	20		Carlton et al. [57]
Autriche	2		Carlton et al. [57]
Belgique (Wallonie)	9		Carlton et al. [57]
Danemark	1		Carlton et al. [57]
Danemark	0,1		Wilke et al. [58]
Etats-Unis (New Jersey)	1		Eisler [13]
Ex-URSS	2,1		Eisler [13]
Finlande	0,5		Carlton et al. [57]
Indonésie / Chine	20		Courriel de Chris Anderson
Japon	15		Japan Act No 53/2002 [66]
Japon	3		Eisler [13]
Norvège	1		SFT [61]
Pays-Bas	2		Eisler [13]
Pays-Bas	10		Eisler [13]
Pays-Bas	36	Mercure inorganique	VROM [67]
Pays-Bas	4	Mercure organique	VROM [67]
Pays-Bas	2,2		Wilke et al. [58]
Pays-Bas	10		VROM [59]
Slovaquie	2		Carlton et al. [57]
Suède	5		Carlton et al. [57]
Tchéquie	2,5		Carlton et al. [57]

- Tableau 3: Valeurs d'assainissement

(Les concentrations supérieures à ces valeurs nécessitent des mesures.)

	Valeur d'assainissement	Utilisation du sol	Source
	[mg/kg]		
En général	10	Places de jeux pour enfants	OFEFP [8]
En général	20	Jardins privés et petits jardins	OFEFP [8]
En général	50	Surfaces agricoles, cultures fruitières et maraîchères	OFEFP [8]
En général	0,5 - 5	Agriculture	Kabata-Pendias & Sadurski [15]
Allemagne	2	Surfaces herbagères	BBodSchV [10]
Belgique	2,9	Agriculture	OVAM [18]
Canada	6,6	Agriculture	CCME [17]
Finlande	5	Industrie	EnvFin [19]
Finlande	2	Autre que l'industrie	EnvFin [19]
Suisse	5	Jardins privés et potagers, places de jeux et autres lieux où des enfants jouent régulièrement	OSites [7]

- Tableau 4: Valeur maximale tolérée dans les sols traités avec des boues d'épuration

	Concentration limite [mg/kg]	Source
En général	0,1 - 1	Kabata-Pendias & Sadurski [15]
Allemagne	1	Alloway [68]
Belgique (Wallonie)	1	Courriel d'Esther Goidts
Danemark	0,5	Alloway [68]
Etats-Unis	8	Alloway [68]
Finlande	0,2	Alloway [68]
France	1	Alloway [68]
Norvège	1	Alloway [68]
Royaume-Uni	1	Alloway [68]
Suède	0,5	Alloway [68]
Union Européenne	1 - 1,5	Alloway [68]

Annexe 3 – Définition des seuils d'investigation et des valeurs d'assainissement appliqués au mercure à l'étranger

Tableau 1: Seuils d'investigation

	Suisse [6] Seuil d'investigation	Eikmann & Kloke [9] BWII (paramètre du sol)	Allemagne [10, 69] Seuil d'investigation	Suède [12, 14] Valeur générale recommandée	Espagne (Catalogne) [11] Valeur générale de référence
	-	10 mg/kg	5 mg/kg	0,25 mg/kg (2012) / 1 mg/kg (1996)	2 mg/kg
Définition	« Les seuils d'investigation indiquent, pour une utilisation donnée, le niveau d'atteinte à partir duquel, selon l'état des connaissances, la santé de l'homme, des animaux et des plantes peut être menacée. » (Art. 2, al. 5, OSol)	« Teneur dans le sol, tenant compte du bien à protéger et de son utilisation, qui, malgré une atteinte permanente à ce bien, ne pénalise pas la qualité de vie et de service « normale » qu'il offre. » (Eikmann & Kloke, p. 7 [trad.])	« Valeurs dont le dépassement exige, en tenant compte de l'utilisation du sol, d'étudier le cas et d'établir si le sol est altéré de manière nuisible ou s'il est un site contaminé. » (§8, al. 1.1, BBodSchG [trad.])		Concentration d'un polluant supérieure au seuil maximal tolérable en regard de la santé des personnes et des écosystèmes. (Art. 2, 9/2005, GENCAT)
Conc. < limite			« Si la teneur ou la concentration d'un polluant est inférieure au seuil d'investigation correspondant figurant dans l'annexe 2 (seuils de mesures, d'investigation et de précaution), le soupçon d'altération nuisible du sol ou de présence d'un site contaminé est levé. » (§4, al. 2, phrase 1, BBodSchV [trad.])	Au-dessous de cette valeur, il n'y a aucun risque, à court ou à long terme, d'effet négatif sur les personnes et sur l'environnement. (EPA, 1996, p. 23)	
Concentration > limite	« Si, dans une région donnée, un seuil d'investigation est dépassé, les cantons examinent si la santé de l'homme, des animaux ou des plantes peut être menacée. » (Art. 9, al. 1, OSol)	Fonction de cette valeur: inciter à étudier comment éliminer les dangers menaçant les biens à protéger qui doivent rester sur le site, éviter les usages inadéquats et examiner les possibilités d'utilisation du sol / du site. (Eikmann & Kloke, p.3)	« Lorsque les seuils d'investigation fixés dans une réglementation au sens du §8, al. 1, phrase 2, n° 1, sont dépassés, l'autorité compétente doit prendre les mesures nécessaires pour établir si le sol est altéré de manière nuisible ou s'il est un site contaminé. L'investigation et l'appréciation tiendront notamment compte du type et de la concentration des polluants, de la possibilité de leur dissémination dans l'environnement et de leur absorption par des personnes, des animaux et des plantes ainsi que de l'utilisation du bien-fonds selon le §4, al. 4. » (§9, al. 2, phrase 2, BBodSchV [trad.])	Au-dessus de cette valeur, il y a un risque d'effets indésirables. Une concentration supérieure à cette valeur ne provoque pas un tel effet dans tous les cas (Tiré de EPA, 2012) Les valeurs sont comparées avec les concentrations régnant sur le site pour déterminer la gravité de la pollution de ce site et pour établir s'il doit être assaini. (Tiré de EPA, 2012)	Etude des risques pour la santé des personnes et pour les écosystèmes. Au terme de l'appréciation des risques, le détenteur de l'installation, ou le propriétaire du terrain si c'est approprié, doit indiquer à l'autorité si le sol est pollué ou non. (Art. 4, al. 3, 9/2005, GENCAT)
Mesures	« Ils servent à évaluer s'il est nécessaire de restreindre l'utilisation d'un sol au sens de l'art. 34, al. 2, LPE. » (Art. 2, al. 5, OSol) « Si tel est le cas, les cantons arrêtent les restrictions d'utilisation nécessaires à l'élimination du risque. » (Art. 9, al. 2, OSol)				

Tableau 2: Valeurs d'assainissement

	Suisse [7] Valeur d'assainissement	Eikmann & Kloke [9] BWIII (paramètre du sol)	Belgique (Flandre) [18] Standard d'assainissement du sol	Allemagne [10, 69] Seuil de mesures	Finlande [19] Valeur recommandée	Canada [17] Recommandations concernant la qualité du sol
	-	50 mg/kg	2,9 mg/kg	2 mg/kg	2 mg/kg	6,6 mg/kg
Définition		« Teneur dans le sol pour laquelle des atteintes aux biens à protéger, tels que plantes, animaux et personnes, ainsi qu'aux utilisations du sol et aux écosystèmes peuvent être perceptibles. La valeur de ce paramètre dépend de la toxicité pour les plantes, les animaux, les personnes et les écosystèmes. » (Eikmann & Kloke, p. 8 [trad.])	Les standards d'assainissement du sol doivent correspondre au niveau de pollution du sol qui génère un risque considérable d'effets nuisibles sur les personnes et sur l'environnement, compte tenu des caractéristiques et des fonctions du sol. (Art.9, §1, OVAM)	« Valeurs quantifiant les atteintes ou les pollutions, dont le dépassement indique généralement, en tenant compte de l'utilisation du sol, une altération nuisible du sol ou la présence d'un site contaminé et requiert la mise en œuvre de mesures. » (§8, al. 1, BBodSchG [trad.])		Limite numérique ou énoncé descriptif recommandé pour assurer la protection et les possibilités d'utilisations spécifiques de l'eau, du sol et des sédiments. (CCME, p. 4)
Concentration < limite	« Les sols qui ne nécessitent pas un assainissement au sens de l'al. 1, même s'ils constituent un sol pollué ou une partie de sol pollué, et les atteintes portées aux sols par les sites pollués sont évalués selon l'ordonnance du 1 ^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols. » (Art. 12, al. 2, OSites)	« Possibilités d'utilisation du sol restreintes, mais tenant compte du site et du bien à protéger. » (Eikmann & Kloke, p. 2 [trad.])		« Les résultats de l'investigation de détail doivent être appréciés en vertu de cette ordonnance, en tenant compte des particularités du cas considéré et en appliquant notamment des seuils de mesures, pour établir si des mesures au sens du §2, al. 7-8, BBodSchG, doivent être mises en œuvre. » (§4, al. 4, BodSchV [trad.])		
Concentration > limite	« Un sol qui constitue un site pollué ou une partie de site pollué nécessite un assainissement lorsqu'une substance qu'il contient dépasse la valeur de concentration correspondante fixée à l'annexe 3 (valeurs de concentration pour l'évaluation du besoin d'assainissement des sols). Cela s'applique aussi aux sols faisant déjà l'objet d'une restriction d'utilisation. » (Art. 12, al. 1, OSites) « Si un site pollué nécessite un assainissement (sites contaminé), l'autorité demande: a) qu'une investigation de détail soit effectuée dans un délai approprié; b) que le site soit surveillé jusqu'à la fin de l'assainissement ». (Art. 13, al. 2, OSites)	« Domaine de toxicité excluant toute possibilité d'utiliser le sol pour cultiver des plantes. » (Eikmann & Kloke, p. 2 [trad.]) « ...seuil au-delà duquel des biens à protéger peuvent subir des atteintes... Pour les animaux et les personnes: on ne peut pas exclure toute atteinte à la santé ou dégradation des capacités. » (Eikmann & Kloke, pp. 6-7 [trad.])	S'il existe des indices clairs qu'un site pollué dépasse les standards d'assainissement du sol ou va bientôt les dépasser, il y a lieu d'effectuer une investigation descriptive du sol. (Art. 9, §2 et art. 19, §1, OVAM) Si elle montre que les standards d'assainissement du sol ont été dépassés, l'assainissement doit être initié immédiatement en cas de nouvelle pollution. (Art. 9, §3, OVAM) Dans le cas d'une pollution historique, l'assainissement doit être effectué si cette pollution est grave. (Art. 19, §2, OVAM)		Les valeurs recommandées doivent être utilisées comme des outils pour évaluer la pollution du sol et la nécessité de l'assainir. Un sol est pollué si: 1) la concentration d'une ou plusieurs substances présentes dans le sol dépasse la valeur supérieure recommandée lorsque le site est un périmètre industriel ou un dépôt ou s'il est affecté aux transports; 2) la concentration d'une ou plusieurs substances présentes dans le sol dépasse la valeur inférieure recommandée lorsque le site n'est pas utilisé comme décrit sous 1). (§4 EnvFIN)	Les recommandations peuvent servir de critères pour prescrire des investigations supplémentaires ou d'éventuelles mesures d'assainissement, selon l'utilisation du sol. Plus les valeurs recommandées sont dépassées, plus il est urgent d'agir. Lorsqu'un assainissement est impossible pour des raisons techniques ou autres, les recommandations peuvent aussi servir de critères pour prescrire des restrictions d'utilisation du sol ou d'autres mesures de gestion des risques afin de protéger les personnes et l'environnement. Mais les recommandations sont surtout utilisées comme base pour définir des objectifs d'assainissement particuliers au site. (CCME, pp. 9-10)

	Suisse [7] Valeur d'assainissement	Eikmann & Kloke [9] BWIII (paramètre du sol)	Belgique (Flandre) [18] Standard d'assainissement du sol	Allemagne [10, 69] Seuil de mesures	Finlande [19, 70] Valeur recommandée	Canada [17] Recommandations concernant la qualité du sol
	-	50 mg/kg	2,9 mg/kg	2 mg/kg	2 mg/kg	6,6 mg/kg
Mesures	<p>« Le but de l'assainissement doit être atteint par des mesures qui permettent:</p> <p>a) d'éliminer les substances dangereuses pour l'environnement (décontamination); ou</p> <p>b) d'empêcher et de surveiller durablement la dissémination des substances dangereuses dans l'environnement (confinement). »</p> <p>(Art. 16, al. 1, OSites)</p>	<p>« Sa fonction consiste à:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mettre en évidence le caractère protecteur du paramètre BWII du site considéré en fonction de l'écart avec ce paramètre BWII; - inciter à étudier que faire pour que le site / le sol puisse être utilisé sans danger; - imposer un assainissement le cas échéant. » <p>(Eikmann & Kloke, p. 7 [trad.])</p> 	<p>Traitement d'une pollution du sol: éliminer, neutraliser, immobiliser, isoler ou confiner le polluant dans le sol.</p> <p>(Art. 2, al. 2 20, OVAM)</p> <p>En cas de nouvelle pollution du sol, l'assainissement doit avoir pour but d'atteindre la valeur cible. Si cela n'est pas possible, à cause des caractéristiques de la pollution ou du site, en appliquant les meilleurs procédés disponibles sans consentir un coût disproportionné, l'assainissement doit au moins permettre d'obtenir une qualité du sol supérieure au standard d'assainissement.</p> <p>Si cela n'est pas possible en appliquant les meilleurs procédés disponibles sans consentir un coût disproportionné, des restrictions d'utilisation du sol peuvent aussi être prononcées.</p> <p>(Art. 10, §1- 4, OVAM)</p> <p>Dans le cas d'une pollution historique, l'assainissement doit avoir pour but d'obtenir, en appliquant les meilleurs procédés disponibles sans consentir un coût disproportionné, une qualité du sol telle qu'il n'exerce aucun effet négatif potentiel ou effectif sur les personnes ou sur l'environnement</p> <p>Si cela n'est pas possible, des restrictions d'utilisation du sol ou d'aménagement urbain peuvent être prononcées si nécessaire.</p> <p>(Art. 21, § 1- 2, OVAM)</p>	<p>« Sont considérées comme un assainissement au sens de la présente loi les mesures qui</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) éliminent ou atténuent la pollution (mesures de décontamination); 2) empêchent ou atténuent la dissémination des polluants sur le long terme, sans les éliminer (mesures de confinement); 3) éliminent ou atténuent les altérations nuisibles des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques du sol. <p>Les mesures de protection et de limitation au sens de cette loi sont des mesures d'un autre type, notamment des restrictions d'utilisation, qui servent à prévenir ou à éviter les dangers, les inconvénients notables ou les nuisances notables dans l'intérêt des particuliers ou de la collectivité. »</p> <p>(§2, al. 7-8, BBodSchG [trad.])</p>	<p>Chaque protagoniste dont les activités ont causé une pollution du sol ou des eaux souterraines doit remettre ce sol ou ces eaux souterraines dans un état tel qu'ils ne portent aucune atteinte aux personnes et à l'environnement et ne présentent aucun danger pour eux.</p> <p>(Chapitre 12, section 75, Environmental Protection Act)</p>	<p>L'assainissement vise à prévenir, limiter ou atténuer les atteintes à la santé des personnes et à l'environnement. Il peut revêtir la forme d'actions physiques telles que traitement, élimination ou destruction des polluants ou d'autres mesures de gestion des risques in situ telles que recouvrement ou confinement des polluants.</p> <p>(CCME, 1996, p. 5)</p> <p>Lorsque l'assainissement n'est pas possible pour des raisons techniques ou autres, les recommandations peuvent aussi servir de critères pour prescrire des restrictions d'utilisation du sol ou d'autres mesures de gestion des risques afin de protéger les personnes et l'environnement.</p> <p>(CCME, 1996, p. 10)</p>

