

RAPPORT  
INERIS-DRC-17-163615-01452A

26/06/2017

**Coefficients de transfert des éléments  
traces métalliques vers les plantes,  
utilisés pour l'évaluation de l'exposition**

**Application dans le logiciel MODUL'ERS**



# **Coefficients de transfert des éléments traces métalliques vers les plantes, utilisés pour l'évaluation de l'exposition**

## **Application dans le logiciel MODUL'ERS**

Rapport rédigé pour le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Emmanuelle BOULVERT

## PRÉAMBULE




Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Roseline BONNARD	Nathalie VELLY	Martine RAMEL
Qualité	Ingénieur de l'unité Impact sanitaire et expositions	Responsable de l'unité Impact sanitaire et expositions	Responsable du pôle Risque et technologies durables
Visa			

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. PARAMETRES ET SUBSTANCES TRAITES.....</b>	<b>9</b>
<b>2. SOURCES D'INFORMATION UTILISEES .....</b>	<b>9</b>
<b>3. PRINCIPES GENERAUX DU TRAITEMENT DES DONNEES .....</b>	<b>10</b>
3.1 Critères de sélection.....	10
3.2 Calcul des facteurs de bioconcentration sol-plante et traitements statistiques .....	12
<b>4. VALEURS, INTERVALLES ET DISTRIBUTIONS RETENUES .....</b>	<b>14</b>
4.1 Arsenic .....	15
4.2 Cadmium.....	17
4.3 Chrome .....	20
4.4 Mercure .....	22
4.4.1 Coefficients de transfert sol-plante .....	22
4.4.2 Coefficients de transfert air-plante .....	25
4.5 Nickel .....	26
4.6 Plomb .....	28
4.7 Sélénium .....	31
4.8 Vanadium .....	33
<b>5. CONCLUSIONS.....</b>	<b>34</b>
<b>6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>35</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour l'arsenic dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ ) .....	16
Tableau 2 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le cadmium dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ ) .....	18
Tableau 3 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le chrome dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ ) .....	21
Tableau 4 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le mercure dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ ) .....	24
Tableau 5 : Intervalles de variation des coefficients de transfert air-plante calculés pour le mercure à partir de la publication de Mosbaek et al. ( $\text{m}^3 \text{ d'air} / \text{kg}^{-1} \text{ frais de végétal}$ ).....	26
Tableau 6 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le nickel dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ ).....	27
Tableau 7 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le plomb dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ ).....	29
Tableau 8 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le sélénium dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ ) .....	32
Tableau 9 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le vanadium dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ ) .....	33

## RESUME

L'INERIS met à disposition MODUL'ERS (informations et documentation à l'adresse [www.ineris.fr/dossiers-thematiques-ineris/165099](http://www.ineris.fr/dossiers-thematiques-ineris/165099)), un outil de modélisation et de simulation pour estimer les concentrations, les expositions et les risques sanitaires liés à un sol contaminé ou une installation classée pour l'environnement (ICPE).

Pour faciliter l'utilisation de cet outil, des valeurs et/ou intervalles de valeurs sont proposés dans le logiciel pour renseigner les données d'entrée. Des rapports sont fournis pour exposer la manière dont ces valeurs ont été définies (sources de données consultées, hypothèses et choix effectués)<sup>1</sup>.

Ce rapport concerne la définition des coefficients de transfert du sol vers les végétaux des substances métalliques suivantes : arsenic, cadmium, chrome, mercure, plomb, sélénium, vanadium et les coefficients de transfert du mercure de l'air vers les plantes.

Le document présente les sources bibliographiques utilisées, ainsi que la méthode de sélection et de traitement des données, ayant conduit à la définition de valeurs ponctuelles, intervalles de valeurs et/ou distributions statistiques pour les différentes catégories de végétaux prédéfinies dans MODUL'ERS.

Pour certains métaux (en particulier le vanadium et dans une moindre mesure, le sélénium) et certaines catégories de végétaux (céréales et fourrage), les données disponibles apparaissent très limitées.

Compte-tenu des nombreux facteurs relatifs au sol, aux plantes et au contexte environnemental, qui peuvent influencer le transfert sol-plante, les intervalles de variation et les distributions définies pour chaque catégorie de végétaux restent relativement larges, malgré l'application d'un certain nombre de critères visant à écarter les données inappropriées.

Des relations linéaires entre les facteurs de bioconcentration et les paramètres du sol ont été recherchées pour affiner le choix d'une valeur dans les distributions définies. L'intervalle de confiance sur les valeurs prédites à partir de ces relations ne peut toutefois pas être défini de manière statistique, car ces modèles ne respectent pas l'ensemble des conditions nécessaires.

---

<sup>1</sup> Précédents rapports publiés :

- Paramètres d'exposition des animaux terrestres, pour le module « Animaux terrestres » du modèle MODUL'ERS, INERIS-DRC-12-125927-09778A, 2012
- Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS, INERIS-DRC-14-141968-11173, 2015
- Paramètres physico-chimiques des substances chimiques prédéfinies dans le logiciel le modèle MODUL'ERS, INERIS-DRC-15-149181-04282A, 2015
- Paramètres de transfert des polychlorodibenzodioxines, polychlorodibenzofurannes et des polychlorobiphényles, utilisés dans le logiciel MODUL'ERS, INERIS-DRC-16-159776-09593A, 2016

La contribution de l'air à la contamination des végétaux par le mercure semble prépondérante pour certaines catégories de végétaux. Pourtant les parts respectives de l'air et du sol dans la contamination des végétaux semblent avoir été peu investiguées, ce qui a conduit dans ce travail à surestimer, les facteurs de bioconcentration sol-plante du mercure pour la plupart des catégories de végétaux, en attribuant au sol l'ensemble de la contamination mesurée dans les végétaux.



## **1. PARAMETRES ET SUBSTANCES TRAITES**

L'INERIS met à disposition l'outil de modélisation et de simulation MODUL'ERS (informations et documentation sur le logiciel, à l'adresse [www.ineris.fr/dossiers-thematiques-ineris/165099](http://www.ineris.fr/dossiers-thematiques-ineris/165099)) pour estimer les concentrations, les expositions et les risques sanitaires liés à un sol contaminé ou à une Installation Classée Pour l'Environnement (ICPE).

Des valeurs, des intervalles de valeurs ou/et distributions de valeurs ont été prédéfinis et sont fournis par défaut dans le logiciel pour renseigner les données d'entrée.

Les documents relatifs à ces données d'entrée<sup>2</sup>, disponibles dans le répertoire « Mes documents\MODULERS\Documents\Deliverables\Donnees\_entrees » et à l'adresse [www.ineris.fr/dossiers-thematiques-ineris/165099](http://www.ineris.fr/dossiers-thematiques-ineris/165099) ont deux objectifs :

- présenter la manière dont les valeurs proposées pour les renseigner ont été définies (sources de données consultées, hypothèses et choix effectués) ;
- permettre aux utilisateurs de savoir si ces valeurs sont adaptées à leur cas d'étude, et sinon les aider à compléter le travail de définition des données d'entrée, en repartant de la recherche et de l'analyse bibliographiques déjà effectuées.

Ce rapport concerne la définition des coefficients de transfert du sol vers les végétaux des substances métalliques suivantes : arsenic, cadmium, chrome, mercure, plomb, sélénium, vanadium et les coefficients de transfert du mercure de l'air vers les plantes.

Le document présente les sources bibliographiques utilisées, ainsi que la méthode de sélection et de traitement des données, ayant conduit à la définition de valeurs ponctuelles, intervalles de valeurs et/ou distributions statistiques pour les différentes catégories de végétaux prédéfinies dans MODUL'ERS.

## **2. SOURCES D'INFORMATION UTILISEES**

Les principales sources d'information utilisées pour renseigner les coefficients de transfert vers les plantes sont :

- la base de données BAPPET<sup>3</sup> (construite dans le cadre d'un projet co-piloté par l'ADEME et l'INERIS). La version datée d'avril 2012 a été utilisée pour ce travail. Cette base regroupe des données issues d'articles scientifiques, de rapports expérimentaux, de diagnostics environnementaux liés notamment à des sites industriels ;

---

<sup>2</sup> Liste des rapports précédents :

- Paramètres d'exposition des animaux terrestres, pour le module « Animaux terrestres » du modèle MODUL'ERS, INERIS-DRC-12-125927-09778A, 2012
- Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS, INERIS-DRC-14-141968-11173, 2015
- Paramètres physico-chimiques des substances chimiques prédéfinies dans le logiciel le modèle MODUL'ERS, INERIS-DRC-15-149181-04282A, 2015
- Paramètres de transfert des polychlorodibenzodioxines, polychlorodibenzofurannes et des polychlorobiphényles, utilisés dans le logiciel MODUL'ERS, INERIS-DRC-16-159776-09593A, 2016

<sup>3</sup>BAPPET : Base de données des teneurs en éléments traces métalliques de plantes potagères

- l'ouvrage intitulé : Contamination des sols – transfert des sols vers les plantes (Tremel-Schaub et al., 2005). Ce document comporte 19 fiches décrivant et exploitant chacune les données de mesure d'une publication scientifique.

Dans ces documents, les concentrations en éléments traces métalliques sont fournies dans le sol de culture et dans le végétal. Pour chaque donnée, un ensemble d'informations sur les conditions de culture et de mesure sont indiquées. Ces informations sont importantes pour éviter la prise en compte de données inadaptées (végétaux contaminés par des sources de contamination autres que le sol, mode d'extraction chimique non représentatif...).

Lorsque les données relatives aux polluants et aux types de végétaux étudiés étaient en nombre insuffisant dans ces deux documents, des sources de données supplémentaires, parfois moins adaptées, ont dû être consultées et utilisées. Il s'agit :

- d'articles scientifiques (pour l'arsenic, le mercure, le sélénium et le vanadium) ;
- du rapport de 1997 sur le mercure de l'US EPA pour le Congrès américain. Dans ce rapport, des coefficients de transfert du sol et de l'air vers différentes catégories de végétaux ont été sélectionnés dans le cadre de travaux d'évaluations des risques pour la population ;
- pour le vanadium, de différentes synthèses bibliographiques utilisées dans les domaines de l'évaluation du risque chimique et du risque radioécologique.

Pour information, le document de l'US EPA « Technical support document for land application of sewage sludge » de 1992 a également été consulté. Ce rapport compile des données relatives aux concentrations mesurées dans différentes espèces de végétaux au regard des quantités de polluants appliquées par hectare cultivé. Cependant, ces données n'ont pas été utilisées, car elles ont été obtenues, soit à partir de cultures en pot, soit à partir de cultures amendées par des boues. Dans ce cas, la concentration initialement présente dans le sol n'était pas toujours prise en compte.

### **3. PRINCIPES GENERAUX DU TRAITEMENT DES DONNEES**

#### **3.1 CRITERES DE SELECTION**

La concentration d'un élément trace métallique dans une plante dépend de nombreux paramètres. La valeur mesurée est fonction de l'élément considéré, de paramètres liés à la plante, au contexte environnemental, aux milieux sources de contamination.

A partir de la base de données BAPPET et de l'ouvrage de l'ADEME, une sélection de données a été réalisée pour six groupes de végétaux, correspondant à des catégories prédéfinies dans MODUL'ERS :

1. légumes-feuilles, légumes-tiges, légumes-fleurs,

2. légumes-fruits, fruits et légumes-secs (haricots et petits pois)<sup>4</sup>. Les données spécifiques aux fruits dans les sources de données consultées étant rares, voire inexistantes, les données relatives aux fruits et aux légumes-fruits ont été regroupées et les valeurs retenues utilisées dans les deux modules correspondant du logiciel MODUL'ERS ;
3. légumes-racines, légumes-bulbes,
4. tubercules,
5. céréales,
6. fourrage.

Dans un premier temps, la sélection des données a été menée en tenant compte :

- du type d'expérimentation : seules les données issues de culture en pleine terre ont été utilisées. Les valeurs obtenues à partir de culture en pot n'ont pas été relevées, les données obtenues dans ces conditions s'avérant généralement sensiblement supérieures à celles obtenues à l'extérieur en plein terre (US EPA, 1992) ;
- du contexte environnemental d'acquisition de la donnée : les données mesurées en milieu urbain ou industriel n'ont pas été retenues, car la contamination des végétaux peut alors être fortement dépendante de l'apport de polluants par dépôt atmosphérique ;
- de l'origine de la contamination : les données correspondant à une contamination de sol par apport de boues, à une contamination artificielle ou à une contamination de type urbain ont été éliminées, car la disponibilité des polluants dans ces conditions est souvent différente d'une contamination de type industriel ;
- de la méthode d'extraction du polluant à partir du sol : les données correspondant à une extraction partielle ont été écartées, pour retenir celles correspondant à une extraction totale ou semi-totale, telle que pratiquée pour les études de sols contaminés. Ce critère n'a cependant pas été appliqué dans le cas de l'arsenic<sup>5</sup> ;
- de l'organe de la plante analysé : les données sélectionnées correspondent à la partie consommée ;
- de l'obtention de données supérieures au seuil de quantification. Toutes les valeurs inférieures au seuil de mesure ont été éliminées, afin que les facteurs de transfert calculés ne soient pas artificiellement surévalués ;
- de la préparation des végétaux. Les données correspondant à des végétaux non lavés ont été éliminées pour que la part de contamination dans la plante liée au dépôt de particules à partir de l'atmosphère et au dépôt indirect de particules remises en suspension à partir du sol soit réduite et pour éviter de surestimer de manière artificielle la contamination due au prélèvement direct à partir du sol.

---

<sup>4</sup> Les tests statistiques réalisés ne montrent pas que les échantillons de valeurs relatives aux légumes-secs d'une part et aux légumes-fruits et fruits d'autre part appartiennent à des populations différentes.

<sup>5</sup> Pour l'arsenic, les résultats obtenus par extraction partielle sont jugés comparables à ceux obtenus avec une extraction plus poussée (communication personnelle).

Concrètement, pour l'ouvrage de Tremel-Schaub et al., ce sont les données des fiches 6, 9 et 10 qui, en fonction de ces critères, ont été exploitées.

Cependant, lorsque le nombre de données restant après application de ces différents critères s'avérait trop faible (inférieur ou égal à dix valeurs) pour une catégorie de végétaux, les critères de sélection relatifs au contexte environnemental et à l'origine de la contamination ont pu être supprimés. Des données issues des sources bibliographiques complémentaires listées dans la section 2 et relatives à des contaminations par apport de boues ou de compost ont également pu être ajoutées.

### **3.2 CALCUL DES FACTEURS DE BIOCONCENTRATION SOL-PLANTE ET TRAITEMENTS STATISTIQUES**

Les facteurs de bioconcentration sol-plante ont été calculés à partir des concentrations moyennes ou médianes fournies dans le sol et la plante. Les concentrations exprimées par rapport au poids de matière fraîche des végétaux ont été divisées par le pourcentage de matière sèche de l'espèce végétale concernée, en utilisant les informations sur la teneur en eau des végétaux, fournies par APRIFEL (Agence pour la recherche et l'Information en Fruits et Légumes, <http://www.aprifel.com/index.php>). En revanche, les données pour lesquelles la concentration dans le sol n'est pas connue (valeurs de BCF fournies directement) et les données pour lesquelles il n'y a pas de correspondance directe entre les concentrations fournies dans le sol et dans la plante (exemple : fourniture des concentrations minimales et maximales dans le sol d'une part et dans la plante d'autre part, sans indication des concentrations correspondantes pour chaque plant), n'ont pas été retenues.

Par ailleurs, pour chaque jeu de facteurs de bioconcentration ainsi obtenu, les valeurs très élevées (supérieures d'au moins un ordre de grandeur aux autres valeurs) correspondant à des concentrations dans les sols très faibles<sup>6</sup> ont été éliminées. Des tests statistiques ont également été pratiqués (test de Grubbs mené sur le logarithme népérien des facteurs de bioconcentration). Les valeurs extrêmes identifiées par ces tests et correspondant, soit à des concentrations dans les sols faibles, soit à des valeurs ne respectant pas les critères de sélection initiaux ont parfois été éliminées, si cela permettait d'améliorer la normalité de la distribution des données transformées par le logarithme népérien.

A partir des jeux de données épurés et pour un nombre minimal de neuf valeurs, l'ajustement à une distribution statistique a été recherché. L'ajustement à une distribution lognormale a été analysé par observation du graphe de répartition théorique par rapport à la répartition observée des valeurs collectées, et par réalisation du test de Anderson-Darling sur la distribution des valeurs transformées par le logarithme népérien. Lorsque le risque de rejeter l'hypothèse d'une distribution normale était inférieur à 5 % pour les valeurs transformées, l'ajustement à une autre forme de distribution a été recherché.

Quand le nombre de données disponibles est inférieur à neuf, un intervalle de données, caractérisé par une borne minimale et une borne maximale est fourni.

L'étendue des valeurs de BCF d'un métal pour une catégorie de plante reste souvent importante. Pour faciliter le choix d'une valeur ponctuelle au sein de la

---

<sup>6</sup> Valeurs inférieures à un facteur 5 par rapport à la borne inférieure du bruit de fond donnée en France dans le rapport de l'association RECORD (1994).

distribution définie, des corrélations entre la concentration dans la plante, la concentration dans le sol (Cs), le pH et la teneur en matière organique du sol (MO) (les deux paramètres du sol les plus fréquemment renseignés dans les sources de données consultées) ont été recherchées. Une régression linéaire entre le logarithme népérien des BCF et les variables présentant une corrélation significative (par test de Pearson au seuil de 10 %) a été recherchée par la méthode des moindres carrés. Des variables supplémentaires ont été ajoutées au modèle lorsque le coefficient de corrélation ajusté était plus élevé et que le nombre d'observations pour établir le modèle était équivalent (les valeurs du pH et de la matière organique du sol n'étant pas disponibles pour tous les BCF calculés). Les rapports entre les valeurs de BCF observées (O) et les valeurs prédites (P) ont été calculés et comparés au rapport des percentiles 97,5 et 2,5 de la distribution définie, ainsi qu'au rapport des valeurs maximale et minimale relevées pour les BCF. Quand le rapport de la valeur maximale sur la valeur minimale du ratio O/P était plus petit, cette relation de régression a été fournie dans les tableaux de la section suivante, en complément de la distribution statistique. Elle permet alors d'affiner la sélection d'une valeur de BCF adaptée au contexte du sol étudié.

Cependant, ces relations ne sont données qu'à titre indicatif. Bien qu'établies selon la méthode des moindres carrés, ces relations peuvent être biaisées et doivent être considérées avec prudence, car les résidus obtenus ne satisfont pas nécessairement toutes les hypothèses nécessaires à la définition des intervalles de confiance sur les prédictions. En outre, ces relations ont souvent une représentativité moindre que la distribution statistique fournie, car elles sont établies sur un sous-ensemble des données disponibles (domaine de validité limité à l'intervalle des valeurs prises par les variables du modèle et indiqué dans les tableaux de la section suivante).

Dans ce travail, l'ensemble des traitements statistiques (test des valeurs extrêmes, comparaison des échantillons, ajustement de distributions, recherche de corrélations, analyse des régressions linéaires multiples) a été réalisé à l'aide du logiciel XLSTAT 2015, à l'exception des tests visant à rechercher un ajustement à des distributions autres que lognormales. Ces derniers tests ont été effectués à l'aide du logiciel Bestfit (Palisade, 1995).

Pour information, le lecteur peut aussi se référer au rapport du RIVM (2001) où des relations sont données entre la concentration dans la plante et des paramètres du sol pour différentes espèces de légumes. Ces relations sont de la forme suivante :

$$\text{Log } C_p = A + B \times \text{log } C_s + C \times \text{pH} + D \times \text{log } (\%OC) + E \times \text{log } (\%Arg)$$

avec A,B,C,D,E : coefficient de la régression linéaire,

C<sub>p</sub> : concentration dans la plante,

C<sub>s</sub> : concentration dans le sol,

%OC : pourcentage de carbone organique dans le sol,

%Arg : pourcentage d'argile dans le sol.

Des relations pour les BCF pourront être dérivées à partir de ces dernières, en enlevant une unité au coefficient B :

$$\text{Log BCF} = A + (B-1) \times \text{log } C_s + C \times \text{pH} + D \times \text{log } (\%OC) + E \times \text{log } (\%Arg)$$

Toutefois, il convient de souligner que :

- les données ayant servi à établir les relations établies par le RIVM semblent avoir été sélectionnées de manière moins stricte que dans le travail présenté ici (pas d'information sur le contexte environnemental, le type de contamination, la réalisation d'un lavage avant analyse...),
- les tests de Fisher réalisés ne sont pas toujours significatifs (aucun coefficient de la relation significativement différent de 0),
- aucune information ne semble avoir été donnée sur les propriétés des résidus. La validité des tests sur la significativité des coefficients de ces relations et celle des intervalles de confiance qui pourraient être définis autour des prédictions n'est donc pas connue.

#### **4. VALEURS, INTERVALLES ET DISTRIBUTIONS RETENUES**

Les sections ci-dessous présentent pour chaque substance métallique étudiée, les éléments de définition retenus pour les coefficients de transfert sol-plante des différentes catégories de végétaux prédéfinis dans la bibliothèque de données de MODUL'ERS.

Cependant, en l'absence de données relatives à l'ensilage dans les sources consultées, aucune donnée spécifique n'a pu être définie pour cette catégorie de végétaux. En conséquence, les facteurs de transfert sol-plante des métaux dans le module *Ensilage* ont été renseignés avec les distributions retenues pour le fourrage. Ces distributions sont adaptées dans le cas d'un ensilage produit à base d'herbes fourragères. Mais dans le cas d'un ensilage de maïs, dont la masse est représentée pour moitié environ de grains, ces valeurs peuvent être majorantes car le transfert du sol vers le grain est généralement inférieur à celui du sol vers la partie foliaire de la plante. Dans ce cas, il est possible d'utiliser des valeurs ponctuelles correspondant à la moyenne de celles calculées pour le fourrage d'une part et les céréales d'autre part.

Les tableaux relatifs au transfert sol-plante indiquent :

- le nombre de données retenues ayant servi à définir la distribution statistique ;
- les critères de sélection des données, qui ont éventuellement été élargis par rapport à ceux présentés en section 3.1., pour augmenter le pool de données ;
- la distribution statistique retenue ou/et l'intervalle de valeurs défini à partir des valeurs minimales et maximales retenues. Les distributions statistiques sont définies par quatre valeurs. Les deux premiers sont les paramètres spécifiques à la distribution ajustée. Les deux derniers correspondent au percentile 2,5 et au percentile 97,5. Ces deux percentiles sont utilisés comme borne minimale et maximale des distributions (à l'exception des distributions uniformes). Le percentile 50 de la distribution est également fourni ;
- les valeurs minimale, maximale et la médiane des BCF retenus,
- le modèle de régression retenu, le nombre de données sur lequel il est établi, son coefficient de détermination ( $r^2$ ), le résultat du test de Fisher, le domaine de variation des données d'entrée à partir desquelles le modèle a été établi, ainsi que l'intervalle de variation du rapport des BCF observés (O) sur les valeurs de BCF prédites (P). Les bornes de cet intervalle appliquées aux valeurs de BCF calculées par la relation de régression permettent de définir

des intervalles de variation des BCF, en fonction des caractéristiques du sol prises en compte dans la relation. Pour rappel, la relation de régression n'est donnée que si ces derniers sont plus petits que l'intervalle de variation entre les percentiles 97,5 et 2,5 de la distribution définie ou l'intervalle de variation des valeurs de BCF relevées.

Compte-tenu du nombre limité de données et de modalités différentes pour chaque paramètre testé, il n'a pas toujours été possible d'établir des corrélations significatives ou des relations linéaires statistiquement significatives entre le logarithme népérien du BCF et les paramètres du sol (concentration dans le sol, pH, teneur en matières organiques). Cependant d'après la littérature scientifique (Tremel-Schaub et al., 2005), il apparaît d'une manière générale que le transfert du sol vers la plante des métaux présents sous forme de cations dans le sol tend à diminuer avec le pH et la capacité d'échange cationique du sol (caractéristique dépendant notamment de la teneur en argile et en matières organiques).

Dans le cas du mercure, des facteurs visant à caractériser le transfert air-plante ont également été définis.

#### **4.1 ARSENIC**

Les données utilisées sont issues uniquement de BAPPET.

Comme indiqué précédemment, les BCF calculés à partir de concentrations dans les sols obtenues par extraction partielle ont été prises en compte, dans le cas de l'arsenic.

Pour les tubercules, le manque de données a conduit à élargir les critères, en prenant en compte des données correspondant à une pollution et à un contexte urbain. Les données de la publication de Vangronsveld et al. (1994) obtenues dans des jardins potagers situés près d'une ancienne usine traitant de l'arsenic ont également été utilisées.

D'après la littérature scientifique, les arséniate (formes V) sont plus facilement prélevés par les plantes que les arsénites (formes III). Les pH de sol inférieurs à 5 et supérieurs à 8 favorisent le prélèvement de l'arsenic par les plantes. Par ailleurs, les ions phosphates et sulfates, dont le comportement chimique est similaire à celui de l'arséniate, sont des compétiteurs efficaces, susceptibles de réduire l'absorption et le transfert de ce dernier dans la plante.

Tableau 1 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour l'arsenic dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ )

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus	Modèle de régression
Légumes-feuilles	27	Oui Prise en compte des données obtenues par extraction partielle	Lognormale ( $9,4.10^{-2}$ ; $3,7.10^{-1}$ ; $8,5.10^{-4}$ ; $6,2.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $2,3.10^{-2}$ min = $4,8.10^{-4}$ ; max = $3,4.10^{-1}$ ; médiane = $2,5.10^{-2}$	$\ln \text{BCF} = -0,62 - 0,78 \times \ln \text{Cs}$ n=27, $r^2=0,45$ ; Fisher significatif Cs $\in [3,0 - 420]$ $0,07 < O/P < 9$
Légumes-fruits et fruits	39	Oui Prise en compte des données obtenues par extraction partielle	Lognormale ( $3,0.10^{-1}$ ; 6,6 ; $1,1.10^{-4}$ ; 1,8) Percentile 50 : $1,4.10^{-2}$ min = $1,2.10^{-4}$ ; max = $8,2.10^{-1}$ médiane = $1,8.10^{-2}$	$\ln \text{BCF} = -11,9 - 0,67 \times \ln \text{Cs} + 1,2 \times \text{pH} + 4,1.10^{-2} \times \text{Mo}$ n=27, $r^2=0,83$ ; Fisher significatif Cs $\in [0,8 - 420]$ , pH $\in [6,0 - 7,7]$ , MO $\in [1,2 - 26]$ $0,07 < O/P < 3$
Légumes-racines	11	Oui Prise en compte des données obtenues par extraction partielle	Lognormale ( $1,2.10^{-2}$ ; $2,3.10^{-2}$ ; $4,6.10^{-4}$ ; $6,3.10^{-2}$ ) Percentile 50 : $5,4.10^{-3}$ min = $8,0.10^{-4}$ ; max = $4,8.10^{-2}$ ; médiane = $5,5.10^{-3}$	$\ln \text{BCF} = -3,4 - 0,43 \times \ln \text{Cs}$ n=11, $r^2=0,18$ ; Fisher non significatif Cs $\in [10 - 420]$ $0,2 < O/P < 11$
Tubercule	11	Oui Prise en compte des données : obtenues par extraction partielle <ul style="list-style-type: none"> <li>• Correspondant à un contexte urbain</li> <li>• Correspondant à une pollution d'origine urbaine</li> </ul>	Lognormale ( $1,5.10^{-3}$ ; $8,5.10^{-4}$ ; $4,8.10^{-4}$ ; $3,7.10^{-3}$ ) Percentile 50 : $1,3.10^{-3}$ min = $8,6.10^{-4}$ ; max = $5,5.10^{-3}$ ; médiane = $1,1.10^{-3}$	
Céréales	En l'absence de données pour cette catégorie (grains des céréales), utilisation des valeurs définies pour les légumes-fruits et les fruits			
Fourrage	En l'absence de données pour cette catégorie, utilisation des valeurs définies pour les légumes-feuilles			



## 4.2 CADMIUM

Les données utilisées sont issues de BAPPET et de l'ouvrage de Tremel-Schaub et al. (2005).

Le cadmium se caractérise par une phytodisponibilité élevée et cette phytodisponibilité diminue avec le pH (comme le confirment les valeurs négatives obtenues pour le coefficient de la variable pH dans les relations linéaires définies entre le BCF et les paramètres du sol).

Pour les céréales et le fourrage, aucune relation linéaire n'a été recherchée entre les paramètres du sol et le BCF, car le jeu de données disponibles ne comporte qu'une ou deux modalités différentes pour ces paramètres.

Tableau 2 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le cadmium dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ )

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus	Modèle de régression
Légumes-feuilles	86	Non	Lognormale (2,4 ; 2,7; $2,6 \cdot 10^{-1}$ ; 9,3) Percentile 50 : 1,6 min = $1,3 \cdot 10^{-1}$ ; max = 21 ; médiane = 1,6	$\ln \text{BCF} = 5,1 - 0,11 \cdot \ln \text{Cs} - 0,63 \cdot \text{pH} - 0,18 \cdot \text{Mo}$ n=47 ; $r^2=0,47$ ; F significatif Cs $\in$ [0,09 – 38], pH $\in$ [4,8 – 8,9] MO $\in$ [0,2 – 10] $0,1 < \text{O/P} < 6$
Légumes-fruits et fruits	50	Non	Lognormale ( $5,2 \cdot 10^{-1}$ ; 1,2 ; $1,5 \cdot 10^{-2}$ ; 2,9) Percentile 50 : 0,21 min = $1,3 \cdot 10^{-2}$ ; max = 2,0 ; médiane = $2,3 \cdot 10^{-1}$	$\ln \text{BCF} = -0,87 - 0,24 \cdot \text{Mo} + 0,2 \cdot \ln \text{Cs}$ n=38 ; $r^2=0,3$ ; F significatif Cs $\in$ [0,2 – 38], MO $\in$ [0,2 – 11] $0,1 < \text{O/P} < 13$
Légumes-racines	36	Non	Lognormale ( $9,0 \cdot 10^{-1}$ ; $9,0 \cdot 10^{-1}$ ; $1,2 \cdot 10^{-1}$ ; 3,3) Percentile 50 : $6,4 \cdot 10^{-1}$ min = $1,7 \cdot 10^{-1}$ ; max = 4,6 ; médiane = $7,4 \cdot 10^{-1}$	$\ln \text{BCF} = 8,0 + 0,18 \cdot \ln \text{Cs} - 1,2 \cdot \text{pH} - 0,19 \cdot \text{Mo}$ n=11 ; $r^2=0,78$ ; F significatif Cs $\in$ [0,19 – 4,1], pH $\in$ [4,9 – 7,3] MO $\in$ [0,2 – 10] $0,4 < \text{O/P} < 2$
Tubercule	11	Non	Lognormale ( $4,1 \cdot 10^{-1}$ ; $3,3 \cdot 10^{-1}$ ; $8,2 \cdot 10^{-2}$ ; 1,3) Percentile 50 : $3,2 \cdot 10^{-1}$ min = $1,2 \cdot 10^{-1}$ ; max = 1,3 ; médiane = $3,0 \cdot 10^{-1}$	$\ln \text{BCF} = 0,92 - 0,46 \cdot \ln \text{Cs} - 0,43 \cdot \text{pH} + 0,13 \cdot \text{Mo}$ n=8 ; $r^2=0,88$ ; F significatif Cs $\in$ [0,19 – 1,3] , pH $\in$ [4,9 – 7,3] MO $\in$ [1,6 – 5,7] $0,8 < \text{O/P} < 1,3$

*Tableau 2 (suite) : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le cadmium dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ )*

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus	Modèle de régression
Céréales	15	Non	Lognormale ( $1,6 \cdot 10^{-1}$ ; $1,3 \cdot 10^{-1}$ ; $3,1 \cdot 10^{-2}$ ; $5,1 \cdot 10^{-1}$ ) Percentile 50 : $1,2 \cdot 10^{-1}$ min = $4,0 \cdot 10^{-2}$ ; max = $4,0 \cdot 10^{-1}$ ; médiane = $1,2 \cdot 10^{-1}$	Nombre de modalités des paramètres insuffisantes
Fourrage	29	Non	Extreme value ( $2,5 \cdot 10^{-1}$ ; $2,3 \cdot 10^{-1}$ ; 0 ; 1,1) Percentile 50 : $3,4 \cdot 10^{-1}$ min = $1,6 \cdot 10^{-2}$ ; max = 1,2 ; médiane = $4,0 \cdot 10^{-1}$	Nombre de modalités des paramètres insuffisantes

### 4.3 CHROME

Les données utilisées sont issues uniquement de BAPPET.

Le nombre de données correspondant aux différents critères initialement définis étant trop faible, les critères relatifs au contexte et à l'origine de la pollution ont dû être supprimés pour les légumes-racines et les tubercules. Pour les tubercules, la suppression du critère « lavage avant analyse » a permis de doubler le nombre d'observations disponibles. Cependant, d'après le test de Mann-Whitney, les échantillons (obtenus en tenant compte ou non de ce critère) ne semblent pas correspondre à des populations significativement différentes.

Dans le sol, le chrome est principalement sous forme de Cr III. Mais la stabilité du chrome VI est plus grande dans des sols à faible teneur en carbone organique (sol sableux notamment) et à pH élevé

D'après Merian (citée dans Tremel-Schaub et al., 2005), la phytodisponibilité du chrome est faible comparée aux autres éléments. Sous une forme adsorbée sur des hydroxydes métalliques, le chrome est peu disponible pour les végétaux. La concentration en chrome des végétaux est principalement contrôlée par la concentration en solution dans le sol. Or, une solution de chrome III ajoutée au sol est rapidement immobilisée. Dans un sol neutre ou basique, le chrome est davantage disponible vis-à-vis des plantes que dans un sol acide.

Les essais de culture de plantes à partir d'une solution nutritive contenant du chrome montrent par ailleurs une concentration plus élevée dans les racines des plantes (95 % du chrome absorbé par la plante restent au niveau de la racine) que dans les feuilles et une concentration encore plus faible dans les grains. Les essais montrent une meilleure translocation du chrome vers la tige à partir d'une solution de chrome VI qu'avec une solution de chrome III.

Tableau 3 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le chrome dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $mg.kg^{-1} sec/mg.kg^{-1} sec$ )

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus	Modèle de régression
Légumes-feuilles	11	Non	Lognormale (2,3 ; 190 ; $8,0.10^{-5}$ ; 9,3) Percentile 50 : $2,7.10^{-2}$ min = $2,2.10^{-4}$ ; max = 2,7 ; médiane = $3,3.10^{-2}$	$\ln BCF = -5,3 + 0,25 * Mo$ n=10 ; $r^2=0,33$ ; F non significatif MO $\in [1,1 - 25]$ $0,03 < O/P < 53$
Légumes-fruits et fruits	14	Non	Lognormale ( $9,3.10^{-1}$ ; 16 ; $4,9.10^{-4}$ ; 5,8) Percentile 50 : $5,4.10^{-2}$ min = $1,2.10^{-3}$ ; max = 1,0 ; médiane = $1,1.10^{-1}$	
Légumes-racines	24	Prise en compte des données correspondant à toutes les modalités pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>le contexte</li> <li>l'origine de la pollution</li> </ul>	Inverse Gaussien ( $1,8.10^{-1}$ ; $7,8.10^{-3}$ ; $1,5.10^{-3}$ ; 1,5) Percentile 50 : $1,6.10^{-2}$ min = $9,1.10^{-4}$ ; max = 1,3 ; médiane = $1,4.10^{-2}$	$\ln BCF = -13,5 + 1,5 * pH$ n=10 ; $r^2=0,49$ ; F significatif pH $\in [5,4 - 8,6]$ $0,06 < O/P < 10$
Tubercule	21	Prise en compte des données correspondant : <ul style="list-style-type: none"> <li>à toutes les modalités pour le contexte</li> <li>à toutes les modalités pour l'origine de la pollution</li> <li>à des végétaux lavés ou non avant analyse</li> </ul>	Lognormale ( $2,0.10^{-2}$ ; $4,1.10^{-2}$ ; $7,2.10^{-4}$ ; $1,1.10^{-1}$ ) Percentile 50 = $8,8.10^{-3}$ min = $5,8.10^{-4}$ ; max = $4,6.10^{-2}$ ; médiane = $6,6.10^{-3}$	$\ln BCF = -4,1 - 1,5 * \ln Cs + 0,58 * pH$ n=12 ; $r^2=0,87$ ; F significatif Cs $\in [10 - 50]$ , pH $\in [6,5 - 8,4]$ $0,4 < O/P < 1,4$
Céréales	En l'absence de données pour cette catégorie (grains des céréales), utilisation des valeurs définies pour les légumes-fruits et les fruits			
Fourrage	En l'absence de données pour cette catégorie, utilisation des valeurs définies pour les légumes-feuilles			

## **4.4 MERCURE**

La contamination des plantes par le mercure peut se faire par prélèvement à partir du sol ou bien à partir de l'air. La contamination par voie foliaire pour les végétaux de type feuille apparaît prépondérante (Mosbaek et al., 1988).

### **4.4.1 COEFFICIENTS DE TRANSFERT SOL-PLANTE**

Dans le sol, le mercure est principalement sous forme inorganique. Le mercure organique est surtout présent sous forme de méthylmercure. La part de méthylmercure dans les sols dépend de la teneur en matière organique, mais est généralement inférieure à 5 %.

Seules les publications de Cappon (1981, 1987), qui présentent des résultats de mesure obtenus sur des sols amendés par des boues ou par du compost, différencient les formes organiques et inorganiques du mercure dans les sols et les plantes. Les facteurs de bioconcentration calculés à partir de ces données sont plus élevés pour le méthylmercure que pour le mercure inorganique. Cependant une partie du mercure organique dans la plante peut être produit par celle-ci, par méthylation du mercure inorganique après prélèvement. Ces valeurs, différenciant méthylmercure et mercure inorganique, ont été obtenues sur des sols présentant une fraction de mercure sous forme de méthylmercure relativement élevée (entre 4 et 6 %). Ces coefficients de transfert par forme chimique, dont les valeurs sont fortement dépendantes de cette fraction (en particulier pour le méthylmercure), ne sont pas nécessairement extrapolables à d'autres sols.

Dans la mesure où les autres publications ne permettent pas de tenir compte de cette spéciation et qu'aucune donnée n'est disponible pour définir des coefficients de transfert à partir de l'air selon la forme chimique du mercure, le choix a été fait de définir des coefficients de transfert pour le mercure total. Pour estimer les concentrations de méthylmercure et de mercure inorganique dans le végétal, le lecteur peut multiplier la concentration de mercure total par les pourcentages de chacune de ces formes dans la plante. D'après les données de Cappon, le pourcentage de méthylmercure dans la plante est compris entre 0 et 30 %, avec une valeur moyenne de 4 % pour les plantes cultivées sur le sol ayant servi de témoin, de 13 % sur les sols amendés en compost et de 15 % sur les sols avec un apport de boues.

Les données utilisées pour définir les BCF sol-plante du mercure présentés ci-dessous sont principalement issues de Cappon. Elles correspondent aux valeurs mesurées sur les sols servant de témoins (publication de 1981), les sols amendés par des boues (publication de 1981), et les sols ayant subi un apport de compost (publication de 1987). Les BCF issus des sols témoins sont un peu plus faibles que ceux obtenus sur les sols amendés par les boues.

Quelques données provenant de BAPPET ont également été utilisées pour les légumes-feuilles, les légumes-fruits et les légumes-racines. Cependant, les BCF très élevés, calculés à partir des données de cette base et correspondant à des champs irrigués par une eau contaminée ont été éliminés du pool de données.

Faute de données dans les autres sources bibliographiques consultées, pour les tubercules et les céréales, les données présentées dans le tableau suivant sont

reprises du travail de collecte réalisé pour le rapport « Mercury Study Report to Congress » de l'US EPA (1997).

Il convient de rappeler que les BCF présentés pour toutes ces catégories de végétaux ont été calculés comme si tout le mercure présent dans la plante venait du sol. La part liée à la concentration de mercure dans l'atmosphère n'a pas été déduite. Ces facteurs surestiment donc le transfert à partir du sol (transfert par les racines, plus transfert par volatilisation et absorption par les parties foliaires). Cette surestimation est plus particulièrement importante pour les légumes-feuilles.

Pour le fourrage, les seules données disponibles sont celles de Mosbaek et al. (1988), qui ont étudié les contributions de l'air et du sol à la contamination de différentes espèces végétales lors de deux campagnes.

Ils ont en effet mélangé du mercure radioactif à des sols, qui ont ensuite été utilisés pour réaliser des cultures en pots, d'herbes, de radis et de salade. Les pots ont été placés à l'extérieur et l'activité spécifique du mercure dans les plantes, analysées après récolte, a permis de définir la part de contamination liée au mercure présent dans le sol (tout mécanisme de transfert confondu) et au mercure présent de manière ubiquitaire dans l'air. Les conditions expérimentales tendent cependant à surévaluer les facteurs de transfert à partir du sol. La conduite de culture en pots et le fait que l'équilibre isotopique n'était pas atteint dans le sol lors des cultures induisent vraisemblablement l'obtention de données majorantes pour le transfert racinaire. Quant à l'ajout de boues, il est possible qu'il se traduise par une proportion plus importante de méthylmercure dans le sol. Celui-ci, plus volatil que le mercure inorganique, peut être absorbé par les feuilles et accroître la contamination des végétaux par la source sol.

Les valeurs de BCF données dans le tableau pour le fourrage et issues de Mosbaek et al. correspondent à la contamination du fourrage par la source sol (sans prise en compte de la contamination liée à la concentration ubiquitaire de mercure dans l'air). Ces données sont donc de nature différente par rapport à celles retenues pour les autres catégories de végétaux.

Tableau 4 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le mercure dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ )

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus
Légumes-feuilles	24	Prise en compte des données correspondant à toutes les modalités pour <ul style="list-style-type: none"> <li>le contexte</li> <li>l'origine de la pollution</li> </ul>	Pearson V ( $1,8$ ; $7,2.10^{-2}$ ; $1,4.10^{-2}$ ; $3,7.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $5,3.10^{-2}$ min = $1,4.10^{-2}$ ; max = $3,2.10^{-1}$ ; médiane = $4,0.10^{-2}$
Légumes-fruits et fruits	22	Prise en compte des données correspondant à toutes les modalités pour <ul style="list-style-type: none"> <li>le contexte</li> <li>l'origine de la pollution</li> </ul>	Lognormale ( $2,3.10^{-2}$ ; $2,3.10^{-2}$ ; $3,1.10^{-3}$ ; $8,4.10^{-2}$ ) Percentile 50 : $1,6.10^{-2}$ min = $1,8.10^{-3}$ ; max = $6,2.10^{-2}$ ; médiane = $1,7.10^{-2}$
Légumes-racines	15	Prise en compte des données correspondant à toutes les modalités pour <ul style="list-style-type: none"> <li>le contexte</li> <li>l'origine de la pollution</li> </ul>	Uniforme ( $6,8.10^{-3}$ ; $6,4.10^{-2}$ ; $7,9.10^{-3}$ ; $6,3.10^{-2}$ ) Percentile 50 : $3,5.10^{-2}$ médiane = $4,4.10^{-2}$
Tubercule	Utilisation des intervalles de valeurs issues de la collecte de données effectuées par l'US EPA (1997), en l'absence d'autres sources		Min = 0,05 - Max = 0,2
Céréales	Utilisation des intervalles de valeurs issues de la collecte de données effectuées par l'US EPA (1997), en l'absence d'autres sources		Min = $4.10^{-4}$ - Max = $6.10^{-2}$
Fourrage	Intervalles de valeurs issues des expérimentations de Mosbaek et al. (1988), en l'absence d'autres sources		Min = $3.10^{-3}$ - Max = $5.10^{-2}$



#### 4.4.2 COEFFICIENTS DE TRANSFERT AIR-PLANTE

Parmi les sources d'information collectées, la seule étude permettant de définir des coefficients de transfert air-plante est celle de Mosbaek et al. (1988), où le mercure présent dans le sol a fait l'objet d'un marquage isotopique.

Dans les conditions expérimentales de l'étude (concentration de 5 ng/m<sup>3</sup> de mercure dans l'air, concentration dans le sol de l'ordre de 100 à 400 µg/kg de mercure), qui correspondent à celles d'une zone rurale, les mesures réalisées montrent une contamination des feuilles des végétaux principalement par la source air : de 70 % pour les feuilles de radis à plus de 95 % pour l'herbe, et de l'ordre de 50 % pour les légumes-racines (radis).

A partir de la concentration de mercure mesurée dans l'air, des facteurs de bioconcentration air-plante ont pu être calculés pour les légumes-feuilles, les légumes-racines et le fourrage. Ils sont présentés dans le Tableau 5.

Dans MODUL'ERS, les données définies pour les légumes-racines ont été utilisées pour les tubercules et les légumes-fruits. Pour ces derniers, le choix d'utiliser les données relatives aux légumes-racines plutôt qu'aux légumes-feuilles est lié au fait que la surface spécifique des fruits est plus faible que celle des feuilles et que la contamination de ces organes est due, au moins en partie, au transfert à partir des feuilles par le phloème, comme pour les légumes-racines. Pour les céréales, l'approche retenue par l'US EPA (1997) a été utilisée : un facteur de division de 20 a été appliqué sur les données définies pour les légumes-feuilles, pour tenir compte de la décroissance observée entre la contamination des feuilles et les parties internes de la plante. Les valeurs obtenues ont été arrondies à un chiffre significatif. L'intervalle de variation est donc le suivant : [70 ; 200].

Pour l'ensilage, la valeur minimale fixée est égale à la moyenne entre la borne inférieure définie pour le fourrage d'une part et celle définie pour les céréales d'autre part. La borne supérieure est celle définie pour le fourrage. Les valeurs sont arrondies à un chiffre significatif, d'où l'intervalle de variation suivant : [500 ; 4000].

Malgré l'importance de ce mode de transfert pour les plantes, il faut souligner la fragilité de l'ensemble de ces données, définies dans le meilleur des cas à partir d'une seule publication.

*Tableau 5 : Intervalles de variation des coefficients de transfert air-plante calculés pour le mercure à partir de la publication de Mosbaek et al. ( $m^3$  d'air /  $kg^{-1}$  frais de végétal)*

Catégories de végétaux	Nombre de données	Intervalles de valeurs ( $m^3$ d'air/kg frais de végétal)	Commentaires
Légumes-feuilles	6	Min = 1500 - Max = 3000	Données relatives à la salade et aux feuilles de radis
Légumes-racines	3	Min = 1000 - Max = 2300	
Fourrage	6	Min = 900 - Max = 4100	
Légumes-fruits et fruits	En l'absence de données pour cette catégorie, utilisation des valeurs définies pour les légumes-racines		
Tubercules	En l'absence de données pour cette catégorie, utilisation des valeurs définies pour les légumes-racines		
Céréales	-	Min = 70 - Max = 200	Cf. texte ci-dessus

#### **4.5 NICKEL**

Les données sont issues des fiches de l'ouvrage de Tremel-Schaub et al. (2005) et de la base de données BAPPET.

Pour les légumes-feuilles, trois valeurs issues de la même publication et bien supérieures aux autres valeurs collectées ont été supprimées du jeu de données, car elles s'écartaient significativement de la droite de Henry tracée à partir du logarithme népérien des BCF.

Pour les légumes-racines et les céréales, les critères relatifs au contexte environnemental et à l'origine de la pollution ont été modifiés. Dans le cas des légumes-racines, la valeur maximale a été supprimée du pool de données.

D'après Tremel-Schaub et al. (2005), le nickel est facilement prélevé par les plantes et les légumineuses ont plus facilement tendance à accumuler le nickel que les autres familles végétales comestibles. Le transfert sol-plante diminue avec le pH.

Tableau 6 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le nickel dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ )

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus	Modèle de régression
Légumes-feuilles	25	Non	Lognormale ( $4,6.10^{-2}$ ; $6,3.10^{-2}$ ; $3,6.10^{-3}$ ; 0,2) Percentile 50 : $2,7.10^{-2}$ min = $3,2.10^{-3}$ ; max = $4,1.10^{-1}$ ; médiane = $2,8.10^{-2}$	
Légumes-fruits et fruits	20	Non	Lognormale ( $3,2.10^{-1}$ ; $7,3.10^{-1}$ ; $9,2.10^{-3}$ ; 1,8) Percentile 50 : $1,3.10^{-1}$ min = $1,5.10^{-2}$ ; max = 1,0 ; médiane = $1,4.10^{-1}$	$\ln \text{BCF} = 5,9 - 1,3 \cdot \ln \text{pH}$ n=11; $r^2=0,31$ ; F non significatif pH $\in$ [6,0 – 7,1] $0,3 < O/P < 5$
Légumes-racines	32	Prise en compte des données correspondant à toutes les modalités pour <ul style="list-style-type: none"> <li>le contexte</li> <li>l'origine de la pollution</li> </ul>	Lognormale ( $1,8.10^{-1}$ ; $5,0.10^{-1}$ ; $3,3.10^{-3}$ ; 1,1) Percentile 50 : $6,0.10^{-2}$ min = $8,8.10^{-3}$ max = 1,3 ; médiane = $4,0.10^{-2}$	
Tubercule	11	Non	Lognormale ( $1,2.10^{-1}$ ; $3,4.10^{-1}$ ; $2,2.10^{-3}$ ; $7,3.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $4,0.10^{-2}$ min = $8,6.10^{-3}$ ; max = $7,3.10^{-1}$ ; médiane = $2,5.10^{-2}$	$\ln \text{BCF} = 7,8 - 3,6 \cdot \ln \text{Cs}$ n=11; $r^2=0,57$ ; F significatif Cs $\in$ [15 – 35] $0,2 < O/P < 5$
Céréales	24	Prise en compte des données correspondant à toutes les modalités pour <ul style="list-style-type: none"> <li>le contexte</li> <li>l'origine de la pollution</li> </ul>	Lognormale ( $5,2.10^{-3}$ ; $2,8.10^{-3}$ ; $1,7.10^{-3}$ ; $1,2.10^{-2}$ ) Percentile 50 : $4,6.10^{-3}$ min = $1,8.10^{-3}$ ; max = $1,4.10^{-2}$ ; médiane = $5,0.10^{-3}$	Nombre de modalités insuffisant
Fourrage	29	Non	Lognormale ( $4,3.10^{-2}$ ; $5,9.10^{-2}$ ; $3,4.10^{-3}$ ; $1,9.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $2,5.10^{-2}$ min = $5,6.10^{-3}$ ; max = $2,8.10^{-1}$ ; médiane = $3,4.10^{-2}$	Nombre de modalités insuffisant

#### **4.6 PLOMB**

Les données sont issues des fiches de l'ouvrage de Tremel-Schaub et al. (2005) et de la base de données BAPPET.

Pour les tubercules, la valeur de BCF la plus faible et la valeur la plus forte, identifiées comme des valeurs extrêmes par le test de Grubbs, ont été éliminées du pool de données. Elles correspondent respectivement à une concentration dans le sol très élevée (supérieure à 3 g/kg et à une concentration très faible : 2,6 mg/kg)

Le plomb est peu prélevé par les racines, où il est rapidement immobilisé. La translocation vers les parties aériennes est faible. Le transfert du sol vers les végétaux diminue avec le pH et la teneur en matière organique.

Tableau 7 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le plomb dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ )

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus	Modèle de régression
Légumes-feuilles	67	Non	Lognormale ( $1,1.10^{-1}$ ; $5,9.10^{-1}$ ; $6,1.10^{-4}$ ; $7,7.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $2,2.10^{-2}$ min = $3,5.10^{-4}$ max = 1,4 ; médiane = $1,7.10^{-2}$	$\ln \text{BCF} = -1,5 - 0,3 \ln \text{Cs} - 0,27 \text{MO}$ n=48; $r^2=0,24$ ; F significatif Cs $\in$ [20 – 2700] MO $\in$ [0,2 – 15] $0,03 < O/P < 90$
Légumes-fruits et fruits	47	Non	Lognormale ( $3,1.10^{-1}$ ; 3,6 ; $3,3.10^{-4}$ ; 2,0) Percentile 50 : $2,6.10^{-2}$ min = $4,7.10^{-4}$ max = 1,8 ; médiane = $1,3.10^{-2}$ KS manuel non	$\ln \text{BCF} = -25,0 - 0,65 \ln \text{Cs} + 3,9 \text{pH} - 0,27 \text{MO}$ n=17; $r^2=0,59$ ; F significatif Cs $\in$ [20 – 2700], pH $\in$ [5,6 – 7,0] MO $\in$ [0,2 – 10] $0,06 < O/P < 17$
Légumes-racines	32	Non	Lognormale ( $1,5.10^{-1}$ ; $6,3.10^{-1}$ ; $1,1.10^{-3}$ ; $9,8.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $3,4.10^{-2}$ min = $1,5.10^{-3}$ max = $4,0.10^{-1}$ médiane = $3,6.10^{-2}$	$\ln \text{BCF} = 0,33 - 0,40 \ln \text{Cs} - 0,83 \text{MO}$ n=16; $r^2=0,81$ ; F significatif Cs $\in$ [20 – 2700], MO $\in$ [0,2 – 6] $0,2 < O/P < 5$
Tubercule	21	Non	Lognormale ( $3,5.10^{-2}$ ; $1,1.10^{-1}$ ; $4,7.10^{-4}$ ; $2,2.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $10^{-2}$ min = $6,0.10^{-4}$ max = $2,1.10^{-1}$ ; médiane = $2,4.10^{-2}$	$\ln \text{BCF} = -11,6 + 0,76 \ln \text{Cs} + 0,96 \text{pH} - 2,2.10^{-2} \text{MO}$ n=16; $r^2=0,88$ ; F significatif Cs $\in$ [5 – 42], pH $\in$ [4,3 – 6,1] MO $\in$ [2,5 – 74] $0,5 < O/P < 2$

*Tableau 7 (suite) : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le plomb dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ )*

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus	Modèle de régression
Céréales	13	Prise en compte des données correspondant à toutes les modalités pour l'origine de la pollution	Lognormale ( $1,5.10^{-3}$ ; $1,1.10^{-3}$ ; $3,5.10^{-4}$ ; $4,4.10^{-3}$ ) Percentile 50 : $1,2.10^{-3}$ min = $3,3.10^{-4}$ ; max = $4,7.10^{-3}$ ; médiane = $1,0.10^{-3}$	Nombre de modalités insuffisant
Fourrage	19	Non	Logistique ( $9,0.10^{-3}$ ; $1,8.10^{-3}$ ; $2,6.10^{-3}$ ; $1,5.10^{-2}$ ) Percentile 50 : $9,0.10^{-3}$ min = $3,3.10^{-3}$ ; max = $1,7.10^{-2}$ ; médiane = $1,0.10^{-2}$	Nombre de modalités insuffisant

#### **4.7 SÉLÉNIUM**

Comme pour le mercure, les données proviennent des deux publications de Cappon (1981, 1988). Les BCF obtenus sur les sols témoins sont un peu plus élevés que ceux calculés pour les sols amendés par les boues.

Aucune donnée n'a été trouvée dans le document de Tremel-Schaub et al. (2005) Les quelques données relevées dans BAPPET ont été obtenues en contexte industriel et s'avèrent sensiblement plus élevées que celles de Cappon. Ces données pouvant refléter une contamination par dépôt atmosphérique n'ont pas été prises en compte.

Les plantes peuvent accumuler les formes solubles du sélénium présentes dans le sol. Le transfert du sélénium du sol vers les plantes augmente avec le pH. Les microorganismes du sol et les plantes peuvent méthyler le sélénium et produire des sélénures méthylés volatils. Les feuilles des plantes peuvent absorber ce composé.

D'après Tremel-Schaub et al., l'ail et le brocoli accumulent le sélénium de façon plus importante que les autres espèces végétales.

Tableau 8 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le sélénium dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $\text{mg.kg}^{-1} \text{ sec/mg.kg}^{-1} \text{ sec}$ )

Catégories de végétaux	Nombre de données retenues	Elargissement des critères de sélection	Distributions ajustées / Valeurs minimale, maximale et médiane des BCF retenus	Modèle de régression
Légumes-feuilles	19	Prise en compte de données correspondant à des sols amendés par : <ul style="list-style-type: none"> <li>des boues</li> <li>du compost</li> </ul> (non prise en compte des données obtenues en contexte industriel et pouvant refléter un apport par dépôt atmosphérique)	Lognormale ( $1,2.10^{-1}$ ; $6,3.10^{-2}$ ; $4,4.10^{-2}$ ; $2,8.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $1,1.10^{-1}$ min = $4,7.10^{-2}$ ; max= $2,7.10^{-1}$ ; médiane = $1,0.10^{-1}$	
Légumes-fruits et fruits	19	Prise en compte de données correspondant à des sols amendés par : <ul style="list-style-type: none"> <li>des boues</li> <li>du compost</li> </ul>	Lognormale ( $5,5.10^{-2}$ ; $5,1.10^{-2}$ ; $8,5.10^{-3}$ ; $1,9.10^{-1}$ ) Percentile 50 : $4,0.10^{-2}$ min = $6,7.10^{-3}$ max = $1,7.10^{-1}$ ; médiane = $3,4.10^{-2}$	
Légumes-racines	13	Prise en compte de données correspondant à des sols amendés par : <ul style="list-style-type: none"> <li>des boues</li> <li>du compost</li> </ul>	Lognormale ( $2,4.10^{-1}$ ; $4,3.10^{-1}$ ; $1,2.10^{-2}$ ; 1,2) Percentile 50 : $1,2.10^{-1}$ min = $2,0.10^{-2}$ max = $9,2.10^{-1}$ ; médiane = $1,6.10^{-1}$	$\text{Ln BCF} = -3,0 - 0,67 * \text{Ln Cs}$ n=13; $r^2=0,14$ ; F non significatif Cs $\in [0,04 - 0,39]$ $0,1 < O/P < 6$
Tubercules	En l'absence de données pour cette catégorie, utilisation des valeurs définies pour les légumes-racines			
Céréales	En l'absence de données pour cette catégorie (grains des céréales), utilisation des valeurs définies pour les légumes-fruits et les fruits			
Fourrage	En l'absence de données pour cette catégorie, utilisation des valeurs définies pour les légumes-feuilles			



## 4.8 VANADIUM

Pour le vanadium, aucune donnée n'a été trouvée dans la base de données BAPPET, le document de Tremel-Schaub et al. (2005) et le document de l'US EPA (1992).

Les valeurs de BCF présentées ci-dessous ont été définies à partir d'une publication scientifique, complétée des informations fournies dans deux documents élaborés pour estimer les risques chimiques et radioécologiques :

- la publication de Jolly et al. (2013) fournit les données nécessaires pour calculer les BCF de quelques végétaux cultivés dans des sols agricoles. Elle rapporte des mesures effectuées sur des cultures conduites au Bangladesh, pour lesquelles les échantillons de végétaux ont été soigneusement lavés avant analyse. La présence de vanadium a été trouvée dans les feuilles des végétaux analysés et dans les légumes-racines, mais pas dans les légumes-fruits (BCF inférieur à  $5.10^{-4}$  kg sec/kg sec d'après les seuils de quantification) ;
- le document de l'IPSN, produit dans le cadre des travaux sur l'évaluation des risques associés aux rejets chimiques des installations nucléaires du Nord-Cotentin (2001) fournit une valeur identique ( $2.10^{-3}$  kg sec/kg sec) pour tous les types de plantes dont l'origine n'a pas pu être retrouvée ;
- le rapport de Baes et al. de 1984 (intitulé « A review and analysis of parameters for assessing transport of environmentally released radionuclides through agriculture ») différencie le coefficient de transfert du sol vers les parties végétatives ( $5,5.10^{-3}$ ) et celui du sol vers les organes de stockage ou de reproduction des plantes ( $3.10^{-3}$ ). Les valeurs sont fournies pour des plantes à maturité (sauf dans le cas du fourrage) et correspondent à la moyenne géométrique des données relevées dans la littérature par les auteurs ou bien, en l'absence de données, à des valeurs estimées à partir de relations établies pour des éléments appartenant aux mêmes groupes ou à la même période de la classification de Mendeleïev.

Les formes cationiques du vanadium, présentes dans les sols acides, sont plus facilement prélevées par les systèmes racinaires que les formes anioniques, qui prédominent en conditions neutre et alcaline.

*Tableau 9 : Eléments de définition des coefficients de transfert sol-plante pour le vanadium dans les différentes catégories de végétaux (valeurs en  $mg.kg^{-1} sec/mg.kg^{-1} sec$ )*

Catégories de végétaux	Intervalles de valeurs	Valeur ponctuelle retenue
Légumes-feuilles	Min = $2.10^{-3}$ - Max = $6.10^{-3}$	$3.10^{-3}$
Légumes-fruits et fruits	Min = $10^{-4}$ - Max = $3.10^{-3}$	$10^{-4}$
Légumes-racines	Min = $10^{-3}$ - Max = $3.10^{-3}$	$10^{-3}$
Tubercules	Utilisation des données définies pour les légumes-racines	
Céréales	Utilisation des données définies pour les légumes-fruits et les fruits	
Fourrage	Utilisation des données définies pour les légumes-feuilles	

## **5. CONCLUSIONS**

Pour certains métaux (en particulier le vanadium et dans une moindre mesure, le sélénium) et certaines catégories de végétaux (céréales et fourrage), les données disponibles apparaissent très limitées.

Compte-tenu des nombreux facteurs relatifs au sol, aux plantes et au contexte environnemental, qui peuvent influencer le transfert sol-plante, les intervalles de variation et les distributions définies pour chaque catégorie de végétaux restent relativement larges.

Pour les métaux qui ont été les plus étudiés et où les données de transfert sont relativement nombreuses, il peut être pertinent dans certains cas d'affiner l'estimation de l'intervalle de variation autour du BCF, en sélectionnant des données en fonction du pH, de la concentration dans le sol ou de l'espèce végétale étudiée. Il convient toutefois de rappeler qu'il existe une variabilité inhérente à ce type de données et que des mesures faites dans des conditions identiques sur plusieurs réplicas donneront des résultats différents. Il ne faut donc pas réduire le pool de données à un sous-ensemble de données qui ne permettrait plus de représenter la variabilité biologique et les conditions environnementales à prendre en compte dans l'étude.

## **6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Association RECORD, Investigation sur les différentes approches de la définition et de la qualification des sites et sols pollués, INSA de Lyon, INRA, CRIDEAU/CNRS, Contrat n°93-503, 1994

Baes C., Sharp A., Sjoreen A., Shor R., A review and analysis of parameters for assessing transport of environmentally released radionuclides through agriculture, Oak Ridge National Laboratory, 1984

Cappon C., Mercury and Selenium Content and Chemical Form in Vegetable Crops Grown on Sludge-Amended Soil. Arch. Environm. Contam. Toxicol. 10: 673-689, 1981

Cappon, C., Uptake and Speciation of Mercury and Selenium in Vegetable Crops Grown on Compost-Treated Soil. Water, Air, Soil Poll. 34: 353-361, 1987

INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Vanadium

IPSN (Institut de Protection de et de Sûreté nucléaire, Adaptation du modèle de transfert GT3-GRNC dans un écosystème agricole aux polluants inorganiques non radioactifs, Paramètres de transfert, 2001

Jolly Y, Islam A., Akbar S., Transfer of metals from soil to vegetables and possible health risk assessment, SpringerPlus, 2:385, 2013

Mosbaek H., Tjell J.C., Sevel T., Plant uptake of mercury in background areas, Chemosphere, 17(6): 1227-1236, 1988

RIVM, Otte P., Lijzn J., Otte J., Swartjes F., Versluijs C., Evaluation and revision of the CSOIL parameter set. Proposed parameter set for human exposure modelling and deriving Intervention Values for the first series of compounds, report 711701021, 2001

Tremel-Schaub A., Feix I., Contamination des sols – Transferts des sols vers les plantes, ADEME, EDP Sciences, 2005

US EPA (US Environmental Protection Agency), Technical support document for land application of sewage sludge, PB93-110575, 1992

US EPA (US Environmental Protection Agency), Mercury study report to congress, Volume III: Fate and transport mercury in the environment, Office of Air Quality Planning & Standards and Office of Research and Development, EPA/452/R-97-005, 1997

US EPA (US Environmental Protection Agency), EPISUITE, Estimation Programs Interface Suite™ for Microsoft Windows, v. 4.1. Washington, DC, U.S.A., 2012

Vangronsveld J., Carleer R. and Clijsters H. - Transfer of metals and metalloids from soil to man through vegetables cultivated in polluted gardens: risk assessment and methods for immobilization of these elements in soils. Proceedings., 1994