

JUIL.
2017

TROPHÉ

TRANSFERTS ET RISQUES DES ORGANIQUES PERSISTANTS POUR L'HOMME ET LES ECOSYSTEMES

Livrable n°3 : Evaluation des expositions
et des risques sanitaires chez l'Homme

Rapport

ADEME



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

En partenariat avec :

INERIS
maîtriser le risque |
pour un développement durable

REMERCIEMENTS

Comité de pilotage :

Cécile GRAND (ADEME)

Franck MAROT (ADEME)

Marina GUEDARD et Jean Jacques BESSOULE (LEB Aquitaine Transfert- Université de Bordeaux)

Olivier FAURE (Ecole des Mines de Saint-Etienne (EMSE))

Benjamin PAUGET et Annette DEVAUFLEURY (Laboratoire Chrono Environnement - Université de Franche Comté)

Blandine CLOZEL (BRGM Rhône-Alpes)

Muriel ISMERT (EDF R&D)

Jean François NAU (EODD – bureau d'études)

Antoine RICHARD (INRA)

Matthieu GROSSEMY (TOTAL – PERL)

Matthieu DELANNOY (UR-AFPA – Université de Lorraine)

Contrôle Qualité INERIS :

Emmanuelle Boulvert, Rédaction

Nathalie Velly, Vérification

Karen Perronnet, Vérification

Martine Ramel, Approbation

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, INERIS. 2017. TROPHÉ : Evaluation des expositions et des risques sanitaires chez l'Homme - Rapport. 74 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque et www.ineris.fr

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1372C0062

Référence INERIS : DRC-17-138302-01630B

Étude réalisée par l'INERIS pour ce projet cofinancé par l'ADEME et l'INERIS

Projet de recherche coordonné par : Karen Perronnet - INERIS

Appel à projet de recherche : GESIPOL 2013

Coordination technique - ADEME : Marot Franck

Direction Villes et Territoires Durables

Services Friches Urbaines et Sites Pollués – ADEME (Angers)



Sommaire

1. Rappel sur les Polluants Organiques Persistants étudiés	14
2. Apports des travaux précédents pour l'évaluation des expositions et des risques chez l'Homme (livrables TROPHé n°1 et 2).....	15
2.1 Concentrations en PCB et PCDD/F dans les sols	15
2.2 Influence de la granulométrie sur les concentrations en POP dans les sols	17
2.3 Facteurs de transfert pour les végétaux	18
2.4 Facteurs de Biodisponibilité dans les sols	21
I METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DES EXPOSITIONS ET DES RISQUES SANITAIRES CHEZ L'HOMME .	23
1. Présentation générale de la démarche	23
2. Les étapes clés de la démarche	23
2.1 Identification du danger	23
2.2 Identification des relations dose-réponse	23
2.3 Evaluation des expositions	24
2.4 Caractérisation des risques	25
3. Paramètres et hypothèses d'étude.....	26
3.1 Populations exposées.....	26
3.2 Sols	27
3.3 Végétaux potagers consommés	27
3.4 Matrice d'exposition	30
4. Descriptif des études déclinées	32
II EVALUATION DE L'EXPOSITION ET DES RISQUES POUR DIFFERENTS NIVEAUX DE POLLUTIONS DE SOL AUX POPS	33
1. Objectifs	33
2. Paramètres testés	33
3. Résultats	33
3.1 Exposition journalière	33
3.1.1 Selon les voies d'ingestion.....	33
3.1.2 Focus sur l'exposition par ingestion de végétaux	39
3.2 Risques Sanitaires.....	45
3.2.1 Quotient de Danger.....	45
3.2.2 Excès de Risque Individuel.....	47
3.2.3 Conséquences de l'application des facteurs d'équivalence toxique (TEF).....	48
4. Synthèse tabulaire des résultats	50
III ETUDE DE SENSIBILITE 1 : INFLUENCE DE LA QUANTITE DE SOL INGEREE	53
1. Objectifs	53
2. Paramètres testés	53
3. Résultats	53



3.1	Exposition	53
3.2	Risques Sanitaires.....	55
3.2.1	Quotient de Danger.....	55
3.2.2	Excès de Risque Unitaire	56
IV ETUDE DE SENSIBILITE 2 : INFLUENCE DE LA PRISE EN COMPTE DES LIMITES DE QUANTIFICATION DANS L'ESTIMATION DES BCF – BCF ESTIMES.....		58
1.	Objectifs	58
2.	Paramètres testés	58
3.	Résultats	58
4.	Considération des BCFé.....	62
V ETUDE DE SENSIBILITE 3 : PRISE EN COMPTE DES CONCENTRATIONS DES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES DU SOL		63
1.	Objectifs	63
2.	Paramètres testés	63
3.	Résultats	63
3.1	Quotient de danger.....	63
3.2	Excès de risque individuel	64
VI ETUDE DE SENSIBILITE 4 : INFLUENCE DE LA BIODISPONIBILITE RELATIVE DANS LE SOL.....		66
1.	Objectifs	66
2.	Paramètres testés	66
3.	Résultats	66
VII SYNTHESE GENERALE		68
VIII CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		71
IX ANNEXES		72



Table des Figures

Figure 1 : structure chimique des POPs étudiés	14
Figure 2 : Concentrations dans le sol par congénères pour les mailles P1 et P4 - échelle logarithmique	16
Figure 3 : Répartition massique des fractions granulométriques pour les mailles P1 et P4 (en %)	17
Figure 4 : Facteur de bioconcentration BCF1 par congénères PCB et PCDD/F et pour les différents végétaux testés expérimentalement sur la maille P1 - échelle logarithmique – Tri selon le nombre croissant d’atomes de chlore.....	19
Figure 5 : Facteur de bioconcentration BCF4 par congénères PCB et PCDD/F et pour les différents végétaux testés expérimentalement sur la maille P4 - échelle logarithmique – Tri selon le nombre croissant d’atomes de chlore.....	20
Figure 6 : Bol alimentaire pour un adulte issu d’un foyer possédant un potager (autoproduction et dons) – Part des catégories végétales (espèce végétale représentante) dans l’ingestion journalière de végétaux potagers – Source MODUL’ERS et INCA2	29
Figure 7 : Bol alimentaire pour un enfant de 1 à 3 ans issu d’un foyer possédant un potager (autoproduction et dons) – Part des catégories végétales (espèce végétale représentante) dans l’ingestion journalière de végétaux potagers – Source MODUL’ERS et INCA2	29
Figure 8 : Matrice construite pour la modélisation des transferts et l’estimation des expositions et risques sous MODUL’ERS	30
Figure 9 : Evolution des DJE selon les classes d’âge, pour chaque famille de substances, pour P1 et P4	35
Figure 10 : Doses Journalières d’Exposition (DJE) par congénère et famille, selon les différentes voies d’exposition par ingestion, pour la maille de sol P4 – échelle logarithmique	37
Figure 11 : Répartition de l’ingestion de sol et de l’ingestion de végétaux dans les DJE par congénères (classement des congénères selon le nombre croissant d’atomes de chlore par famille).....	38
Figure 12 : DJE par congénère liées à l’ingestion de végétaux cultivés sur les mailles P1 et P4 – échelle logarithmique - (classement des congénères selon les DJE croissantes pour un sol P4).....	40
Figure 13 : Bol alimentaire pour un adulte issu d’un foyer possédant un potager (autoproduction et dons) – Part des catégories végétales (espèce végétale représentante) dans l’ingestion journalière de végétaux modélisée.....	44
Figure 14 : Quotient de Danger (QD) en fonction des espèces végétales ingérées, selon le nombre croissant d’atomes de chlore pour les PCB-ndl – Cas des adultes exposés à un sol P4.....	46
Figure 15 : Quotient de Danger (QD) en fonction des espèces végétales ingérées, selon le nombre croissant d’atomes de chlore pour les PCB-dl et les PCDD/F – Cas des adultes exposés à un sol P4	47
Figure 16 : DJE et QD liés à l’ingestion de végétaux potagers cultivés sur un sol P4, pour les adultes, et les enfants de 1 à 3 ans – échelle logarithmique – Tri selon l’ordre croissant des QD	49
Figure 17 : Evolution de la répartition de la contribution de l’ingestion de sol et de végétaux dans l’exposition des enfants de 1 à 3 ans à un sol de maille P4 – Tri selon les DJE globales (sol et végétaux) croissantes.....	54
Figure 18 : Risques à seuil pour une exposition aux PCB-ndl d’enfants de 1 à 3 ans par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)	59
Figure 19 : Exposition aux PCDD/F d’enfants de 1 à 3 ans par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)	60
Figure 20 : Risques à seuil pour une exposition aux PCDD/F d’enfants de 1 à 3 ans par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)	61



Table des Tableaux

Tableau 1 : Concentrations dans les mailles de sol, par familles de congénères - Données 2014.....	16
Tableau 2 : Concentrations en POPs pour les fractions de sol '0-1 cm' et '<250 µm'	17
Tableau 3 : Biodisponibilité relative déterminée chez le porcelet exposé aux sols étudiés	22
Tableau 4 : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) sélectionnées pour une exposition chronique via la voie ingestion, pour les familles PCB-ndl, PCDD/F et PCB-dl	24
Tableau 5 : Valeurs des paramètres définissant les populations exposées	26
Tableau 6 : Quantité journalière ingérée par catégorie de végétaux pour les différentes classes d'âge	28
Tableau 7 : Fraction de la quantité consommée et exposée à la contamination du site par catégorie de végétaux (autoproduction et dons de ménage disposant d'un potager)	28
Tableau 8 : Teneur en matière sèche des végétaux (source MODUL'ERS)	30
Tableau 9 : Dose Journalière d'Exposition aux PCB-ndl (en mg/kg pc*/j) selon les différentes voies d'ingestion, pour une exposition à des sols issus des mailles P1 et P4	34
Tableau 10 : Dose Journalière d'Exposition aux PCB-dl (en mg/kg pc*/j) selon les différentes voies d'ingestion, pour une exposition à des sols issus des mailles P1 et P4	34
Tableau 11 : Dose Journalière d'Exposition aux PCDD/F (en mg/kg pc*/j) selon les différentes voies d'ingestion, pour une exposition à des sols issus des mailles P1 et P4	34
Tableau 12 : Dose Journalière d'Exposition aux PCDD/F+PCB-dl (en mg TEQ OMS98/kg pc*/j) selon les différentes voies d'ingestion, pour une exposition à des sols issus des mailles P1 et P4	35
Tableau 13 : Part des différents végétaux dans les DJE adulte, liée à l'ingestion de végétaux cultivés sur un sol de maille P4 (en %) – Cas des PCB.....	42
Tableau 14 : Part des différents végétaux dans les DJE adulte, liée à l'ingestion de végétaux cultivés sur un sol de maille P4 (en %) – Cas des PCDD/F.....	43
Tableau 15 : Quotient de Danger (QD) pour les PCB-ndl liés à l'ingestion, pour une exposition aux sols issus des mailles P1 et P4	45
Tableau 16 : Quotient de Danger (QD) liés à l'ingestion, pour une exposition aux sols issus des mailles P1 et P4.....	46
Tableau 17 : ERI liés aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour différentes classes d'âge	48
Tableau 18 : Classes et codes couleur attribués aux résultats intermédiaires et finaux de la démarche d'évaluation des risques et des expositions (cas des enfants de 1 à 3 ans, exposés via l'ingestion de végétaux cultivés sur un sol de maille P4).	50
Tableau 19 : synthèse de la chaîne de transfert des POPs issus d'un sol de maille P4 pour une exposition des enfants de 1 à 3 ans via l'ingestion de végétaux potagers – tri selon les concentrations croissantes des POPs pour P4	51
Tableau 20 : synthèse de la chaîne de transfert des POPs issus d'un sol de maille P4 pour une exposition des enfants de 1 à 3 ans via l'ingestion de végétaux potagers – tri selon le nombre croissant d'atomes de chlore par famille de substances	52
Tableau 21 : Dose Journalière d'Exposition pour les enfants de 1 à 3 ans liées à l'ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à un sol P1	54
Tableau 22 : Dose Journalière d'Exposition pour les enfants de 1 à 3 ans liées à l'ingestion de sol et l'ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à un sol P4	55
Tableau 23 : QD pour les enfants de 1 à 3 ans par ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à un sol P1	55
Tableau 24 : QD pour les enfants de 1 à 3 ans par ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à un sol P4	56
Tableau 25 : ERI lié aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour des enfants de 1 à 3 ans, pour une exposition à un sol P1	57
Tableau 26 : ERI lié aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour des enfants de 1 à 3 ans, pour une exposition à un sol P4	57
Tableau 27 : QD pour les enfants de 1 à 3 ans par ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à P1	63
Tableau 28 : QD pour les enfants de 1 à 3 ans par ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à P4	64
Tableau 29 : ERI lié aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour des enfants de 1 à 3 ans, pour une exposition à un sol P1	64
Tableau 30 : ERI lié aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour des enfants de 1 à 3 ans, pour une exposition à un sol P4	65
Tableau 31 : DJE globale selon la biodisponibilité relative, pour une exposition à un sol P4	67



Annexes

Annexe 1 : Méthode de calcul et Facteur d'Equivalence Toxique (TEF) de l'OMS

Annexe 2 : Concentrations en pops dans les sols selon le nombre d'atomes de chlore- fraction 0-1cm (graphe et tableau)

Annexe 3 : Concentrations en pops dans les sols - fraction 0-250 μ m

Annexe 4 : Valeurs des BCF1 et BCF4

Annexe 5 : Valeurs des BCFé1 et BCFé4

Annexe 6 : le logiciel modul'ers

Annexe 7 : Méthodologie pour la recherche et la sélection des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR)

Annexe 8 : Etude 1 - DJE pour les PCDDF et PCB-dl selon TEF OM98 et 2005

Annexe 9 : Etude 1 - DJE par voies d'exposition et congénères pour les adultes et les enfants de 1 à 3 ans exposés à un sol P4

Annexe 10 : Etude 1 - DJE par végétaux pour des enfants de 1 à 3 ans exposés à un sol P1 et P4

Annexe 11 : Etude 3 – Représentations graphiques des QD selon les BCF et les BCFé



Abréviations

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFSSA	Agence française de sécurité sanitaire des aliments
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ATSDR	<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i> (Etats-Unis)
BCF	Facteur de Bioconcentration
BCFé	Facteur de Bioconcentration estimé sur la base des limites de quantification LQ/2 si concentration dans la matrice biologique ou le sol n'est pas quantifiée (cf. livrable TROPHé n°2)
DJE	Dose Journalière d'Exposition
éRé	évaluation des Risques pour les écosystèmes
EQRS	Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires
ERI	Excès de Risque Individuel
ERS	Evaluation des Risques Sanitaires
ERU	Excès de Risque Unitaire
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des risques
IPCS	<i>International Program on Chemical Safety</i>
LQ	Limite de Quantification
OEHHA	<i>Office of Environmental Health Hazard Assessment</i> (antenne californienne de l'US-EPA)
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PCBi	PolyChloroBiphényl indicateur
PCB-dl	PolyChloroBiphényl <i>dioxin-like</i>
PCB-ndl	PolyChloroBiphényl <i>non dioxin-like</i>
PCDD	PolyChlorodibenzoDioxines
PCDF	PolyChlorodibenzoFurannes
POP	Polluant Organique Persistant
QD	Quotient de Danger
RIVM	<i>Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu</i> (Institut national de la santé publique de l'environnement, Pays-Bas)
I-TEQ	Conversion de la concentration selon les facteurs toxiques équivalents (TEF)
TEF	Facteur de Toxicité Equivalente
TEQ	Quantité Equivalente Toxique. Permet d'exprimer la quantité de l'ensemble des congénères PCCD/F et PCB-dl par rapport à leur toxicité
UR-AFPA	Unité de Recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux
US-EPA	<i>United States - Environmental Protection Agency</i> (Etats-Unis)
VTR	Valeur Toxicologique de Référence



Synthèse du projet

Le projet TROPHÉ, **T**ransferts et **R**isques des **O**rganiques **P**ersistants pour l'**H**omme et les **é**cosystèmes, repose sur trois principaux objectifs :

- améliorer les connaissances sur les transferts, la bioaccumulation et la biodisponibilité des polychlorobiphényles (PCB) et des polychlorodibenzo-dioxines/-furannes (PCDD/F) au sein de la chaîne alimentaire et des réseaux trophiques, dans le but d'avoir une meilleure prise en compte de ces mécanismes dans les évaluations des risques sanitaires (ERS) et les évaluations de risques pour les écosystèmes (éRé) dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués ;
- évaluer les expositions et les risques à l'aide des outils de modélisation MODUL'ERS dans le cadre des ERS et Terrasys dans le cadre des éRé ;
- identifier des étapes et des outils communs entre les études ERS et éRé afin d'améliorer les analyses environnementales qui nécessitent aujourd'hui d'être développées et structurées.

Dans un premier temps, des expérimentations en laboratoire ont permis de déterminer des facteurs de bioconcentration (BCF) pour les végétaux potagers couramment cultivés en France, ainsi que pour les invertébrés (réseau trophique). Les terres utilisées proviennent d'anciennes parcelles agricoles situées autour d'un ancien site industriel, ayant subi une pollution par dispersion de polluants organiques persistants (POPs) dans l'environnement suite à un incendie.

La culture de végétaux potagers et l'exposition de vers de compost à des terres plus ou moins contaminées aux PCB et aux PCDD/F permettent de mettre en évidence un transfert de ces substances dans le réseau trophique, et dans une moindre mesure, dans la chaîne alimentaire au travers de la consommation de légumes cultivés.

Les facteurs de bioconcentration (BCF) sont globalement plus élevés pour les PCB que pour les PCDD/F à la fois pour les végétaux et les invertébrés, avec des valeurs de BCFmoyen comprises entre 10^{-2} et 2 pour les vers de compost, et entre 10^{-4} et 1 pour les végétaux potagers (pomme de terre, carotte, salade, haricot, courgette) pour des concentrations de sol comprises entre 3,5 et 37,5 µg/kg de PCB, et entre 0,05 et 5,4 µg/kg de PCDD/F. Quelques valeurs de BCFmoyen sont comprises entre 1 et 15 pour les PCB les moins chlorés (moins de 5 atomes de chlore) au niveau des laitues cultivées, ainsi que pour la majorité des PCB au niveau des courgettes.

Les valeurs de BCF peuvent varier, pour les végétaux, jusqu'à deux ordres de grandeur selon le niveau de contamination des sols, alors que cette variation est inférieure à un ordre de grandeur pour les vers de compost. Pour les végétaux et les vers de compost, les PCB coplanaires non-ortho substitués (PCB 77, PCB 81, PCB 126 et PCB 169) présentent des valeurs de BCF inférieures à celles concernant les PCB de même degré de chloration.

Dans un second temps, une ERS a été menée sur la base des BCF obtenus expérimentalement pour modéliser les transferts des dioxines/furannes et des PCB dans la chaîne alimentaire et étudier la sensibilité de certains paramètres tels que la concentration des POPs spécifique à la fraction adhérente aux mains susceptible d'être ingérée par contact main-bouche *versus* la concentration pour l'échantillon de terre non tamisé, la prise en compte de facteurs de bioconcentration estimés tenant compte des valeurs inférieures aux limites de quantification, et la considération de la biodisponibilité relative des POPs dans le sol. En parallèle, une éRé a été conduite sur la base des facteurs de bioconcentration obtenus sur les vers de compost exposés aux terres impactées, et de réseaux trophiques plus ou moins complexes.

Conclusions de l'Évaluation des expositions et des risques sanitaires chez l'Homme :

Concernant le niveau d'exposition lors de l'ingestion non intentionnelle de sol, l'étude de sensibilité des paramètres montre l'influence notable de la quantité ingérée retenue et de la concentration des polluants organiques sur la fraction adhérente aux mains (fraction granulométrique inférieure à 250 µm), et dans une moindre mesure, celle de la biodisponibilité relative en raison des pourcentages élevés obtenus pour les PCB indicateurs (> 80%).

Quant à la consommation de végétaux, l'exposition diffère selon les classes d'âge, en raison du bol alimentaire spécifique à chaque classe d'âge et d'une contribution de chaque congénère variable en fonction du végétal considéré, avec une proportion plus élevée de PCB apportés par l'alimentation. Il en résulte que l'ingestion de POPs via les sols et les végétaux cultivés sur des sols contaminés constitue une voie prépondérante pour l'exposition des populations, notamment des enfants. L'exposition par ingestion non intentionnelle de sol pour les PCDD/F est, pour les enfants, sensiblement équivalente à celle par ingestion de végétaux cultivés.



La considération de valeurs de BCF estimés pour les polluants disposant de concentrations inférieures aux limites de quantification (LQ) du laboratoire constitue une approche conservatoire qui apparaît ici peu sensible pour les risques sanitaires calculés. Sur la base des scénarios retenus et des LQ fournies par le laboratoire d'analyse, cette considération induit une surestimation du risque sanitaire jusqu'à 30% au maximum.

Concernant le risque, ce sont majoritairement les PCDD/F et le PCB126 qui tirent le risque sanitaire en cas de consommation de végétaux cultivés sur des sols pollués, notamment pour les enfants, en raison des valeurs toxicologiques élevées alors que ces polluants sont peu transférés dans les végétaux par rapport aux autres PCB.

Conclusions de l'Évaluation des risques pour les écosystèmes :

Le retour d'expérience de l'application du logiciel TerraSys pour évaluer les risques pour les écosystèmes met en évidence la sensibilité de certains paramètres. En l'absence de PNEC¹ (concentration sans effet prévu) pour les PCB et les PCDD/F, l'évaluation du risque pour les écosystèmes n'a pas pu être menée jusqu'à son terme, seule l'exposition a pu être évaluée. Les BCF peuvent être considérés comme les paramètres essentiels de l'évaluation des transferts de substances. Seules les valeurs de BCF avec un indice de confiance élevé (par exemple ne pas retenir des valeurs estimées à partir de concentrations mesurées inférieures à la limite de quantification) devraient être retenues. De plus, la valeur maximale du BCF, et non sa valeur moyenne, permet de ne pas sous-estimer le transfert de la substance aux maillons les plus élevés du réseau trophique.

En ce qui concerne la description du réseau trophique, il semble suffisamment protecteur de constituer un modèle conceptuel simplifié à la condition d'y intégrer des organismes situés à plusieurs niveaux de relations trophiques. Un premier prédateur suivi d'un prédateur supérieur semble constituer un minimum pour ne pas sous-estimer le transfert de ces contaminants dans l'écosystème.

Les suites du projet TROPHé portent à la fois sur l'acquisition de nouvelles valeurs de transfert dans d'autres contextes que ceux rencontrés ici (multi-pollution en PCB et PCDD/F, sol sableux, 5 espèces végétales et 1 invertébré terrestre), et sur la compréhension des phénomènes influant sur les transferts sol-plante / sol-invertébré et, par conséquent sur les risques pour l'Homme et pour les écosystèmes. A ce jour, les risques pour l'Homme sont davantage évalués que ceux pour les écosystèmes en raison des outils existants, de la connaissance des scénarii d'exposition et des valeurs toxicologiques de référence disponibles dans la littérature. Les approches d'évaluation du risque sanitaire pour l'Homme et du risque pour les écosystèmes restent complémentaires pour appréhender l'impact des PCB et des PCDD/F sur l'Environnement. Les études de sensibilité des paramètres restent essentielles pour appréhender leur influence sur l'évaluation des risques, notamment pour les écosystèmes en raison de l'absence d'outils méthodologiques.

Le projet TROPHé a fait l'objet de 6 livrables :

- **Livrables 1 et 2** : Synthèse des travaux expérimentaux menés sur le transfert des POPs dans les végétaux et les vers de compost
- **Livrable 3** : Evaluation des expositions et des risques sanitaires chez l'Homme
- **Livrable 4** : Evaluation des risques pour les écosystèmes – REX sur l'application des outils et méthodes sur un site pollué avec des POPs
- **Livrable 5** : Fiche technique sur l'approche graduée exemplifiée sur l'évaluation de l'empoisonnement secondaire
- **Livrable 6** : Analyse croisée des démarches ERS et éRé dans le cadre des Sites et Sols Pollués

¹ PNEC : *Predicted No Effect Concentration*



Résumé du livrable 3

- Le livrable 3 porte sur l'évaluation des expositions et des risques sanitaires chez l'Homme (démarche ERS, guide INERIS 2013), via l'outil de modélisation multimédia MODUL'ERS (outil développé et mis à disposition par l'INERIS permettant d'estimer les concentrations, les expositions et les risques sanitaires liés à un sol contaminé ou une installation classée pour l'environnement), sur la base des données expérimentales acquises au cours de l'étude et présentées dans les livrables 1 et 2 : concentrations en POPs dans les sols avec la granulométrie, BCF sols-végétaux potagers, BCF estimés (sur la base des limites de quantification) et facteurs de biodisponibilité relative dans les sols.
- Il convient de souligner que l'objectif de ces travaux n'est pas de réaliser une nouvelle évaluation des risques du site de St-Cyprien mais d'apprécier la sensibilité de paramètres intervenant lors d'une évaluation des risques chez l'Homme et ce pour répondre à des questions de recherche. L'évaluation a été menée pour une population fictive type, composée d'adultes et d'enfants, exposée aux POPs via l'ingestion non intentionnelle de sol et de végétaux potagers auto-produits et ce, pour les mailles de sol étudiées les plus faiblement et fortement contaminées (respectivement la maille P1 avec des concentrations de 3,5 µg/kg en PCB et de 0,05 µg/kg en PCDD/F, et la maille P4 avec des concentrations de 37,5 µg/kg en PCB et de 5,4 µg/kg en PCDD/F). Le scénario étudié ne correspond pas à un scénario réel puisqu'aucune des parcelles étudiées dans le cadre de ce projet ne fait l'objet d'un usage résidentiel ou de jardinage.

Comme attendu, l'exposition globale (ingestion de sol et de végétaux) à un sol issu de la maille la plus contaminée est plus élevée que l'exposition globale à un sol issu de la maille la plus faiblement contaminée, pour les différentes familles de composés organiques, en notant une exposition par ingestion de végétaux plus grande pour les PCB-ndl que pour les PCB-dl et PCDD/F, pour les adultes et les enfants. L'exposition liée à l'ingestion non intentionnelle de sol est particulièrement sensible chez les enfants, notamment chez les moins de 1 an qui sont les plus exposés. Cette exposition diminue avec l'augmentation du poids de l'enfant associé à l'âge, et la diminution de la quantité de sol ingérée dès 6 ans, dans le cas de notre étude.

Les enfants de 1 à 3 ans sont ceux qui sont les plus exposés à un risque sanitaire global (sol et végétaux) par leur grande consommation de végétaux et leur poids encore relativement faible. L'exposition aux PCB se fait majoritairement via l'ingestion de végétaux alors que l'exposition aux PCDD/F se partage entre l'ingestion de sol et de végétaux auto-produits.

Pour une même population consommant un bol alimentaire fixe, l'exposition aux différents congénères, par ingestion de végétaux, varie différemment pour la famille des PCB et pour la famille des PCDD/F, selon le nombre de chlore des congénères et selon les espèces végétales consommées. La répartition des contributions des espèces végétales aux doses journalières d'exposition (DJE) par congénère ne correspond pas à la répartition des catégories de végétaux dans le bol alimentaire.

Pour les PCB les moins chlorés (inférieurs à 4-5 atomes de chlore), il est observé une forte contribution des salades à la (DJE). Cette contribution chute fortement pour les PCB les plus chlorés. Les contributions de la courgette et de la pomme de terre sont les plus élevées pour les PCB les plus chlorés. Pour la carotte, la contribution reste stable indépendamment du nombre d'atomes de chlore. Il est à noter que ces observations ne s'appliquent pas aux PCB coplanaires non ortho-substitués (PCB77/81/126/169).

Pour les PCDD/F, le constat est différent. Quel que soit le nombre d'atomes de chlore, la contribution des végétaux à l'exposition semble identique, exceptée pour la courgette. La contribution de la pomme de terre est majoritaire (69 à 88% des DJE pour les différents congénères) suivie des contributions de la courgette et de la carotte. Les végétaux souterrains (pomme de terre et carotte) représentent 78 à 100% des contributions. Quant à la laitue et aux haricots, leurs contributions sont faibles (moins de 5%).

Les indices de risque (QD et ERI) sont directement proportionnels aux DJE pour les PCB-ndl. Le risque sanitaire lié aux PCB est tiré par les congénères présents majoritairement dans les sols P1 et P4, à savoir les PCB153/138/180. Dans le cas des PCDD/F et PCB-dl, l'utilisation du système de facteur d'équivalent toxique (TEF) crée une pondération entre l'exposition et les risques sanitaires. Il est ainsi constaté que les familles tirant l'exposition (à savoir les PCB) diffèrent de ceux tirant le risque sanitaire (les PCDD/F et le PCB126 à l'exception).



Les congénères également présents majoritairement dans les sols sont le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, l'OCDF et l'OCDD alors que les risques sont tirés par la 2,3,4,7,8-PeCDF, la 2,3,7,8-TeCDF et le PCB126, de par leur valeur TEF des plus élevées.

En complément, la sensibilité de divers paramètres de modélisation a été testée sur les doses journalières d'exposition (DJE) par ingestion et sur les risques sanitaires afférents :

- La quantité de sol ingérée : Diminuer ce paramètre a des conséquences relativement faibles pour l'exposition globale aux PCB. L'exposition aux PCDD/F y est plus sensible en raison de la plus forte contribution de l'ingestion de sol dans l'exposition globale à cette famille de substances. Pour les risques sanitaires des PCDD/F + PCB-dl, l'utilisation des TEF pondère cette variabilité. Pour les risques sanitaires sans seuil, l'impact est ici très minime ;
- La prise en compte des limites de quantification (LQ) dans l'estimation des valeurs BCF : elle peut induire une très grande variabilité dans les résultats de calculs d'exposition et de risques sanitaires. Son utilisation est donc à faire avec prudence ;
- La granulométrie : pour les populations infantiles, et pour certains congénères, l'ingestion non intentionnelle de sol est une voie majeure d'exposition. Les concentrations pour la fraction '0-250 µm', fraction susceptible d'adhérer à la peau lors de contacts main-bouche chez les enfants par exemple (InVS/INERIS, 2012), sont 2 à 3 fois supérieures à celles pour la fraction '0-1 cm' considérée en première approche dans les calculs de risques sanitaires. La prise en compte des concentrations de la fraction '0-1 cm' conduit ici à sous-estimer l'exposition et les risques sanitaires.
- La biodisponibilité relative des PCB-ndl dans les sols : la prise en compte de ce paramètre, mesuré expérimentalement, au lieu de la démarche conservatoire considérant la totalité de la masse de polluant comme biodisponible, peut permettre d'avoir une appréciation plus réaliste de l'exposition. Cependant, l'ajustement de la DJE par la biodisponibilité n'apparaît pertinent que si l'ingestion de sol est une voie d'exposition majeure et si sa prise en compte entraîne une diminution sensible des risques sanitaires. Ce qui n'a pas été le cas dans notre étude pour les PCB-ndl avec une biodisponibilité de 80% a minima.



I. Introduction

Le projet **TROPHÉ** est issu de l'appel à projets de recherche GESIPOL lancé en 2013 (Recherche pour la gestion intégrée des sites pollués) et a démarré le 20 décembre 2013 (date de la signature de la convention).

Il est financé par l'ADEME et co-financé par l'INERIS, porteur intégral du projet, dans le cadre de ses programmes d'appui au ministère chargé de l'environnement.

Ce projet porte sur les **T**ransferts et **R**isques des **O**rganiques **P**ersistants chez l'**H**omme et les **é**cosystèmes, à savoir les dioxines/furannes (PCDD/F) et les polychlorobiphényles (PCB : PCB_i et PCB-dl).

Les terres utilisées pour cette étude proviennent de parcelles situées autour d'un ancien site industriel **localisé à Saint Cyprien (42)**, et ayant subi une pollution par dispersion de POPs dans l'environnement suite à un incendie.

Ce projet a trois objectifs principaux :

- améliorer les connaissances sur les transferts, la bioaccumulation et la biodisponibilité des PCB et des PCDD/F au sein de la chaîne alimentaire et des réseaux trophiques, dans le but d'avoir une meilleure prise en compte de ces mécanismes dans les évaluations des risques sanitaires (ERS) et les évaluations de risques pour les écosystèmes (éRé) dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués ;
- évaluer les expositions et les risques à l'aide des outils de modélisation MODUL'ERS (outil multi-compartiment créé et développé par l'INERIS pour l'évaluation des risques sanitaires chez l'Homme) lors des ERS et Terrasys (développé par SANEXEN) utilisé lors des éRé ;
- identifier des étapes et des outils communs entre les études ERS et éRé afin d'améliorer les analyses environnementales qui nécessitent aujourd'hui d'être développées et structurées.

Le présent document correspond au Livrable n°3 et synthétise les travaux en lien avec le deuxième objectif du projet autour de l'évaluation des expositions et des risques sanitaires pour l'Homme. Ceux-ci s'appuient sur les résultats issus des travaux expérimentaux menés successivement en 2014 et en 2015, relatifs aux transferts des POP dans les végétaux potagers et sur la bioaccessibilité et la biodisponibilité des POPs dans les sols (livrable TROPHÉ n°2 : rapport final DRC-16-138302-01541B, mars 2017).

Ces données expérimentales ont été utilisées comme données d'entrée pour les modélisations de transfert dans la chaîne alimentaire (concentrations en PCDD/F et PCB dans différentes mailles de sol, granulométrie des sols, facteurs de bioconcentration sol-végétaux et facteurs de biodisponibilité relative).

Il convient de souligner que l'objectif de ces travaux n'est pas de réaliser une nouvelle évaluation des risques du site mais d'apprécier la sensibilité de paramètres intervenant lors d'une évaluation des risques chez l'Homme et ce pour répondre à des questions de recherche. Le scénario étudié ne correspond d'ailleurs pas à un scénario réel puisqu'aucune des parcelles étudiées dans le cadre de ce projet ne fait l'objet d'un usage résidentiel ou de culture.



1. Rappel sur les Polluants Organiques Persistants étudiés

Ce paragraphe est un rappel du chapitre II du livrable TROPHé n°2 traitant les structures chimiques des Polluants Organiques Persistants (POPs).

Les polluants suivis dans ce projet de recherche portent sur deux familles principales : les polychlorodibenzo-dioxines/-furannes (PCDD/F) et les PolyChloroBiphényles ou PCB. En raison de leurs caractéristiques, les PCB et les PCDD/F sont classés parmi la famille des Polluants Organiques Persistants (POPs). Les polychlorodibenzo-dioxines ou -furannes (PCDD/F) sont des hydrocarbures aromatiques polycycliques chlorés poly-substitués regroupant une série de congénères (210 congénères dont 75 PCDD et 135 PCDF). Chacun de ces congénères est défini par la position et le nombre d'atomes de chlore qui sont associés à leur cycle aromatique. Le plus connu est le congénère 2,3,7,8-Tétra-Chloro-Dibenzo *para* dioxine (TCDD), « dioxine Seveso », connu comme étant le congénère le plus toxique des PCDD/F. Les furannes (PCDF) ont une structure chimique proche des PCDD. Classiquement, 17 congénères sont analysés dans l'environnement : 7 PCDD et 10 PCDF dont le nombre d'atome de chlore varie de 4 à 8. De par leur structure chimique, ces molécules sont particulièrement stables et assez peu métabolisées dans les organismes. La majeure partie de la dégradation se fait par photochimie. Ces molécules, fortement rémanentes, s'accumulent notamment dans les tissus graisseux d'origine animale. Les PCB sont au nombre de 209 congénères selon le nombre d'atomes de chlore et leur position sur les cycles benzéniques. On distingue trois types de PCB en fonction de leur structure chimique et de leur toxicité² :

- les **PCB coplanaires non-ortho substitués** dont la structure est proche de la 2,3,7,8-TCDD³ car ils possèdent des groupements chlore seulement en position *para* et *mé*ta. Ils sont dits « coplanaires » car leurs cycles sont dans le même plan. Ce sont les PCB 77, PCB 81, PCB 126 et PCB 169 ;
- les **PCB coplanaires mono-ortho substitués** ne possèdent qu'un chlore en position *ortho* qui empêche les deux cycles d'être dans le même plan et leur toxicité est plus faible que celle des PCB coplanaires non-ortho mais plus forte que celle des PCB non coplanaires ;
- les **PCB non-coplanaires** qui possèdent plus d'un chlore en position *ortho*.

Les douze PCB *dioxin-like* (PCB-dl) sont des PCB coplanaires possédant plus de quatre atomes de chlore : PCB 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169 et 189. Leur structure proche de celle des dioxines en font des substances carcinogènes pour l'Homme et en particulier pour le foie.

Les **PCB non dioxin-like** (PCB-ndl) étudiés regroupent les PCB 28, 52, 101, 138, 153 et 180. Le terme **PCB indicateurs** (PCBi) regroupe les six PCB-ndl précédents et le PCB 118.

La Figure 1 représente la structure chimique des PCB et des PCDD/F.

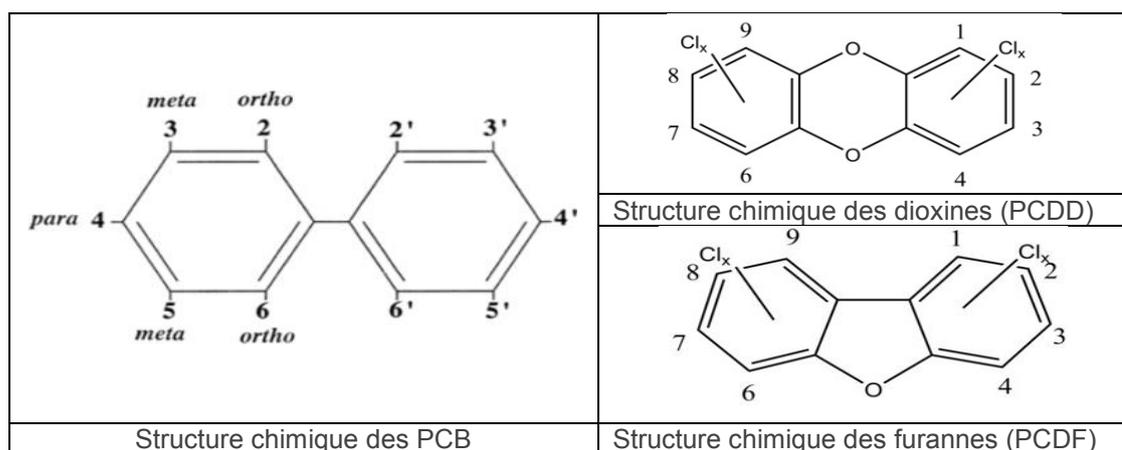


Figure 1 : structure chimique des POPs étudiés

De par leur mécanisme d'action similaire de toxicité, les concentrations pour la somme des PCDD/F et PCB-dl peuvent être exprimées en fonction d'un système de facteurs d'équivalent toxique (TEF) par

² Safe, S. (1992). Toxicology, Structure-Function Relationship, and Human and Environmental Health Impacts of Polychlorinated Biphenyls: Progress and Problems. Environmental Health Perspectives, 100: 259-68

³ 2,3,7,8-Tétra-Chloro-Dibenzo *para* dioxine



rapport à la toxicité de la 2,3,7,8-TCDD. Dans la suite de ce document, l'ensemble des résultats pour la somme des PCDD/F et PCB-dl sera exprimé selon le système « I-TEQ OMS 2005 » (cf. Annexe 1).

2. Apports des travaux précédents pour l'évaluation des expositions et des risques chez l'Homme (*livrables TROPHé n°1 et 2*)

Les rapports précédents, à savoir les livrables TROPHé n°1 et n°2, synthétisent les travaux expérimentaux *in-situ* et *ex-situ* menés en 2014 et 2015. Ici sont rappelés les points et les données d'entrée issus de ces travaux, qui ont permis de paramétrer l'évaluation des expositions et les risques sanitaires chez l'Homme.

Les expérimentations ont consisté, entre autres, en la culture de végétaux potagers, en conditions contrôlées dans une enceinte contrôlée (phytotron), sur des sols contaminés par des POPs prélevés sur un site atelier (niveau de contamination croissant en PCDD/F + PCB-dl) et en l'analyse des concentrations résultantes dans les parties végétales consommées par l'Homme. Les travaux sur la biodisponibilité et la bioaccessibilité menés par l'UR-AFPA⁴ de l'Université de Lorraine ont consisté en l'étude de l'influence de la matière organique sur les porcelets des PCB_i présents dans les sols.

Ces travaux ont débouché sur une meilleure connaissance des niveaux de concentrations en PCB et PCDD/F dans des mailles de sol autour du site de Saint-Cyprien (cf. paragraphes 2.1 et 2.2), des transferts sol-végétaux (cf. paragraphe 2.3), ainsi que de la biodisponibilité relative (cf. paragraphe 2.4).

Les paragraphes suivants font le focus sur ces données expérimentales, dans le cadre de l'évaluation des expositions et des risques sanitaires chez l'Homme,

2.1 Concentrations en PCB et PCDD/F dans les sols

Dans le cadre de ce projet, 4 mailles de sol (P1 à P4) ont été sélectionnées sur le site de St-Cyprien, de manière à disposer de niveaux croissants en PCB et PCDD/F dans les sols (cf. chapitre III du livrable TROPHé n°2). Suite à des analyses sur ces sols, il s'est avéré que les niveaux de concentrations sont croissants en PCDD/F de P1 à P4 (2 ordres de grandeur entre les concentrations minimales et maximales), ce qui n'est pas systématiquement le cas pour les PCB.

Dans le cadre de l'évaluation des expositions et des risques chez l'Homme, les travaux de modélisation sont menés sur des analyses de sols issus des mailles P1 (sol considéré comme non contaminé avec des concentrations de l'ordre du « bruit de fond ») et P4 (maille la plus contaminée parmi les quatre investiguées). Les concentrations pour P1 et P4, par famille de congénères, sont rappelées au Tableau 1 ci-dessous.

⁴ Unité de Recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux



Tableau 1 : Concentrations dans les mailles de sol, par familles de congénères - Données 2014

Concentration par famille dans les sols	Nombre de congénères	Unité	Maille P1	Maille P4
PCBi	7	ng/kg sec	3 482 (±307)	30 606 (±4 405)
PCB-ndl	6 (PCBi sans le PCB118)	ng/kg sec	3 350 (±305)	28 747 (±4 103)
PCB-dl	12	ng/kg sec	373 (±29)	5 062 (±801)
		ng I-TEQ/kg sec	1,1 (±0,2)	22,8 (±7)
PCB	19	ng/kg sec	3 724 (±304)	33 809 (±4 873)
PCDD/F	17	ng/kg sec	46 (±4)	5 410 (±1 226)
		ng I-TEQ/kg sec	1,4 (±0,1)	218,5 (±)
PCDD/F + PCB-dl	29	ng/kg sec	419 (±30)	10 472 (±1 880,5)
		ng I-TEQ/kg sec	2,5 (±0,3)	241,3 (±53,2)

(± xx) : écart-type des concentrations

La Figure 2 présente les concentrations dans les sols par congénères, pour P1 et P4, selon les concentrations croissantes en congénères par famille pour P1 (échelle logarithmique).

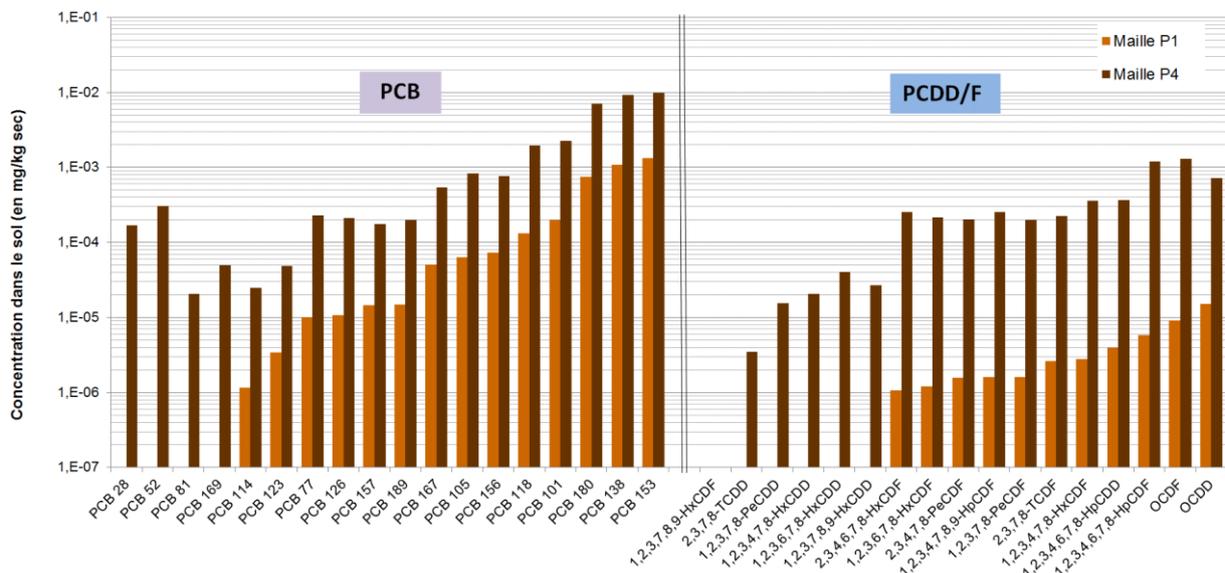


Figure 2 : Concentrations dans le sol par congénères pour les mailles P1 et P4 - échelle logarithmique

Les niveaux de concentrations en PCB et PCDD/F pour P4 sont plus élevés que pour P1. L'absence de 10 congénères (4 PCB et 6 PCDD/F) parmi les plus légers (faiblement chlorés) est à noter pour P1. Pour chaque maille de sol, la concentration totale en PCB est supérieure à celle en PCDD/F. Les furannes (PCDF) sont prédominants par rapport aux dioxines (PCDD) à 60-70% des PCDD/F pour P1 et à 80% pour P4.

Les congénères dont les concentrations sont les plus élevés, sont :

- Pour les PCB : respectivement le PCB 153, le PCB 138, le PCB 180, le PCB 101 et le PCB 118 pour P1 et P4 ;



- Pour les PCDD/F : l'OCDD, l'OCDF et le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, soit des congénères avec 7 ou 8 atomes de chlore, dans un ordre variable entre P1 et P4.
Pour rappel, le 1,2,3,7,8,9-HxCDF n'a été quantifié dans aucun des deux sols.

Les concentrations par congénère, pour P1 et P4, en fonction du nombre de chlores portés par les congénères sont présentées au graphe et au tableau de l'Annexe 2.

2.2 Influence de la granulométrie sur les concentrations en POP dans les sols

La répartition des PCB et des PCDD/F au sein des fractions granulométriques des sols a été évaluée, notamment pour la fraction inférieure à 250 µm (cf. chapitre III dans le livrable TROPHÉ n°2). Cette fraction est particulièrement intéressante car elle correspond à la fraction susceptible d'adhérer à la peau lors de contact main-bouche chez les enfants⁵.

Les concentrations dans les sols ont quant à elles été mesurées sur la fraction '0-1 cm'.

La fraction '0-250 µm' représente moins de 10% de la masse pour P1 et 12% de la masse pour P4 comme illustré à la Figure 3.

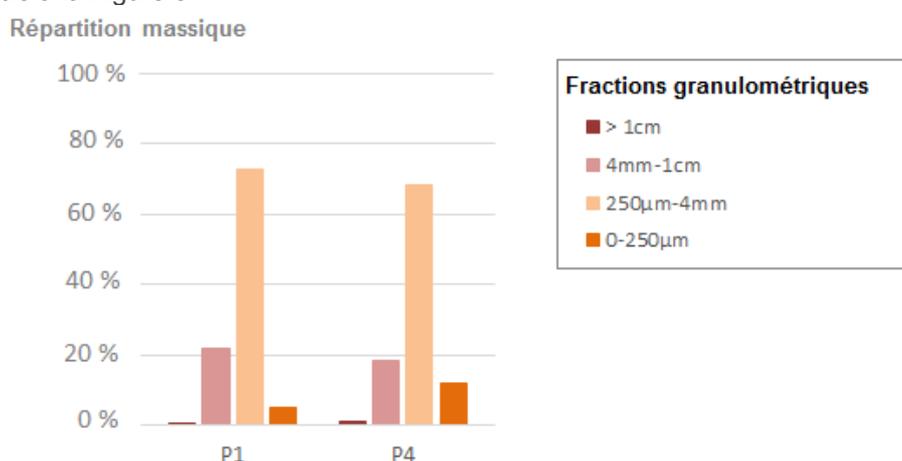


Figure 3 : Répartition massique des fractions granulométriques pour les mailles P1 et P4 (en %) – Extrait des livrables n°1 et n°2 –

Le Tableau 2 présente les concentrations obtenues sur les fractions '0-1 cm' et '0-250 µm'. Les niveaux de concentrations en PCB et PCDD/F sont les plus élevées pour la fraction la plus fine des sols (< 250 µm).

Tableau 2 : Concentrations⁶ en POPs pour les fractions de sol '0-1 cm' et '<250 µm'

Fractions	Concentration (en ng/kg)					
	Maille P1			Maille P4		
	0-1 cm	0-250 µm	R	0-1 cm	0-250 µm	R
Σ PCB_i (7 congénères)	2 613	7 468	3	32 401	71 147	2
Σ PCB-dl (12 congénères)	310	867	3	5 848	12 273	2
Σ PCDD/F (17 congénères)	45	112	2	6 763	12 845	2

R : ratio Fraction '< 250 µm' / Fraction '0-1cm'

La concentration mesurée pour la fraction '0-250 µm' est 2 à 3 fois plus grande que la concentration correspondant à la fraction '0-1 cm', et ce, quels que soient les POP considérés (PCB, PCDD/F), pour les deux sols.

⁵ Quantités de terre et poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants : état des connaissances et propositions, guide pratique InVS – INERIS.

⁶ Les concentrations pour la fraction '0-1cm' peuvent être sensiblement différentes de celles présentées au Tableau 1 au paragraphe I.2.1



La fraction '0-250 μm ', adhérente aux mains, est donc en faible quantité massique (< 10%) mais représente la fraction granulométrique la plus contaminée.

Les concentrations par congénère, pour P1 et P4, pour la fraction '0-250 μm ' sont en Annexe 3.

2.3 Facteurs de transfert pour les végétaux

L'étude expérimentale des transferts des PCDD/F et des PCB du sol vers les végétaux en conditions contrôlées a permis de déterminer des Facteurs de Bioconcentration (BCF) dans les parties aériennes et souterraines des organes consommés par l'Homme. Ces BCF sont des **facteurs de transfert globaux**, considérant à la fois l'accumulation par transfert racinaire mais aussi par échange gazeux. Ils ont été obtenus dans le cadre d'expérimentation sur des sols réels ayant été contaminés suite à un incendie industriel et présentant une pollution multiple, à la fois par des PCB et des PCDD/F. Il est à noter que des phénomènes de compétition entre les substances ne peuvent être exclus.

Le protocole expérimental et l'analyse des résultats sont présentés au chapitre IV du livrable TROPHÉ n°2.

Les BCF calculés pour les végétaux cultivés sur les sols P1 (BCF1⁷) et P4 (BCF4⁸) vont être utilisés comme données d'entrée pour modéliser les transferts depuis ces sols vers les végétaux consommés par l'Homme afin d'évaluer les expositions et les risques sanitaires dans ces deux configurations. En effet, les valeurs de BCF1 ont été influencées par des concentrations faibles, voire inférieures à la LQ, dans les végétaux et dans les sols. La Figure 4 et la Figure 5 présentent les BCF obtenus pour les différents végétaux cultivés à l'issue des expérimentations, par congénères et selon le nombre croissant de chlores les constituant.

Les valeurs des BCF1 et des BCF4 sont disponibles en Annexe 4.

⁷ Le « BCF1 » correspond à la moyenne des BCF mesurés (3 réplicats) sur la maille P1.

⁸ Le « BCF4 » correspond à la moyenne des BCF mesurés (3 réplicats) sur la maille P4.



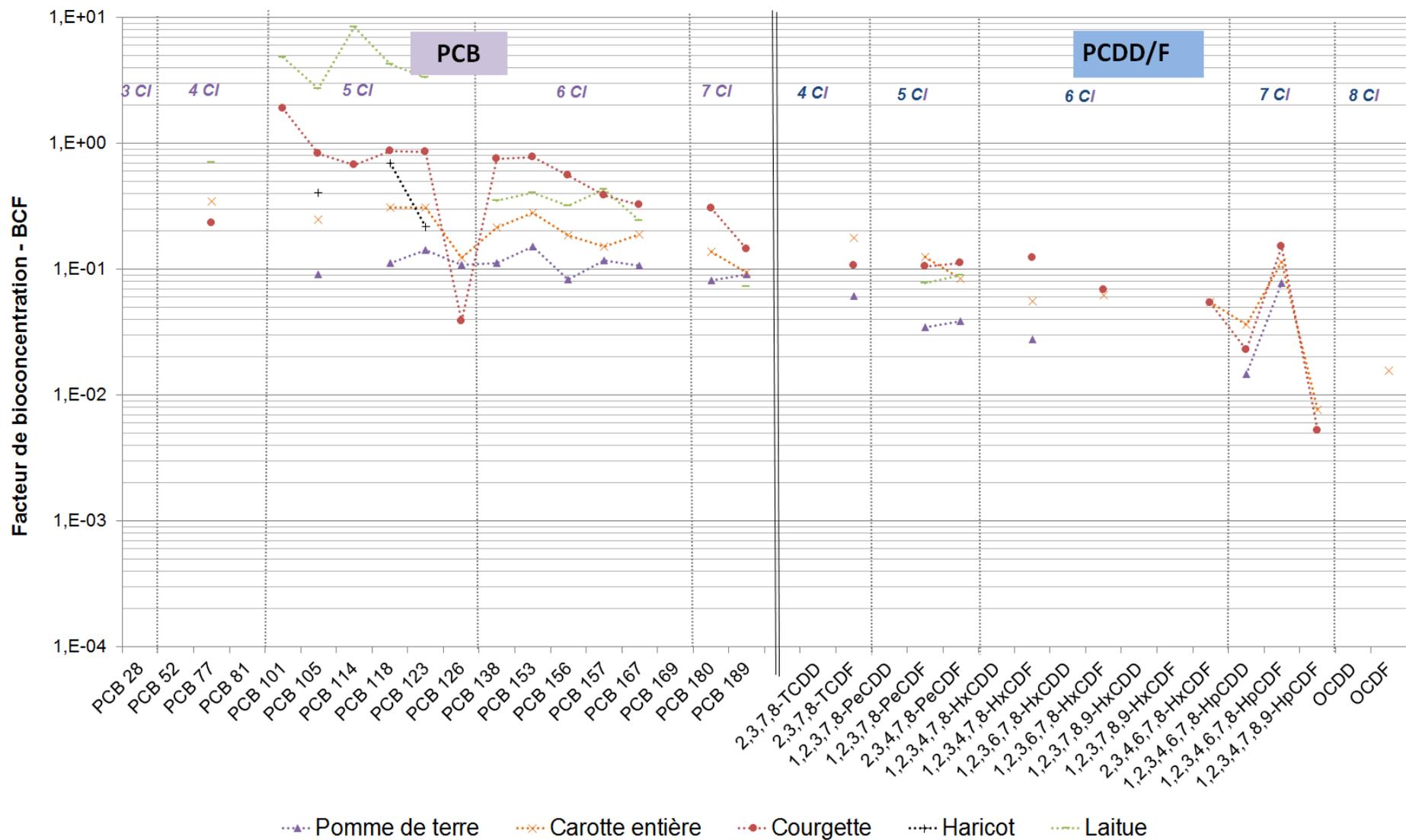


Figure 4 : Facteur de bioconcentration BCF1 par congénères PCB et PCDD/F et pour les différents végétaux testés expérimentalement sur la maille P1 - échelle logarithmique – Tri selon le nombre croissant d'atomes de chlore

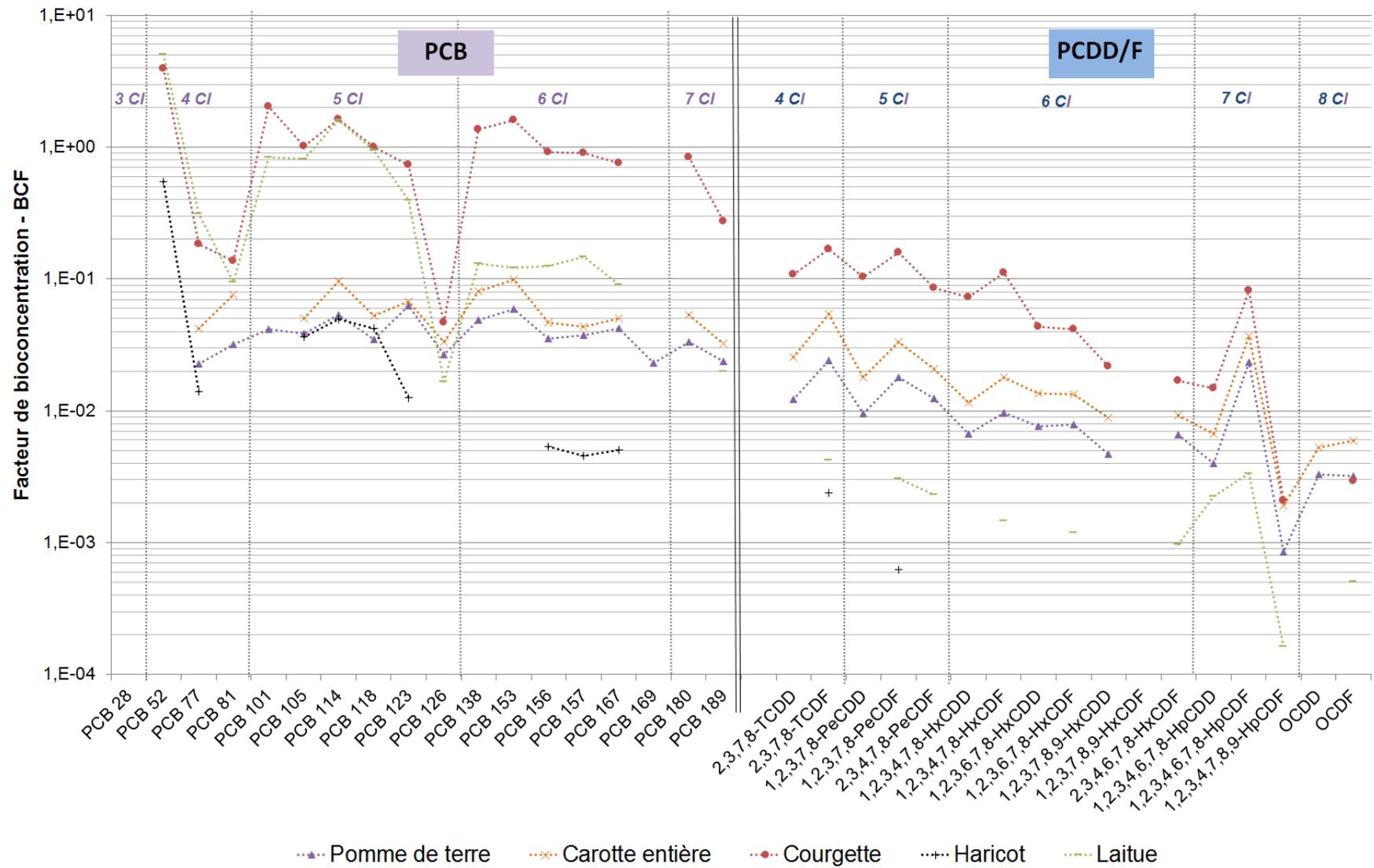


Figure 5 : Facteur de bioconcentration BCF4 par congénères PCB et PCDD/F et pour les différents végétaux testés expérimentalement sur la maille P4 - échelle logarithmique – Tri selon le nombre croissant d’atomes de chlore



A l'issue des essais expérimentaux, les paramètres influant sur le transfert des PCB et des PCDD/F dans les végétaux identifiés sont :

- l'espèce végétale avec des transferts accrus de PCB mais aussi de PCDD/F dans les courgettes entières. Les tubercules et racines, en contact direct avec les sols, accumulent le plus grand nombre de PCB et PCDD/F mais à des concentrations moindres que les courgettes ou les légumes-feuilles/graminées ;
- le niveau de pollution des sols et leurs caractéristiques agronomiques : les BCF les plus élevés sont ceux obtenus sur les mailles P1, les moins impactées en POPs suggérant des phénomènes de détoxification au sein des plantes et/ou des plateaux de tolérance ;
- la présence de POPs dans l'air ambiant, notamment pour les espèces telles que les salades disposant d'une surface foliaire conséquente au travers de laquelle les échanges gazeux mènent à une accumulation des PCB les plus faiblement chlorés tels que les PCB 28 et PCB 52, et dans une moindre mesure le PCB 101 ;
- le degré de chloration des substances aussi bien pour les PCB que pour les PCDD/F. Les substances les plus faiblement chlorées présentent des facteurs de transfert plus élevés que les substances plus fortement chlorées. Notons que les PCB coplanaires non-ortho substitués tels que les PCB 77, PCB 81 et PCB 126 présentent généralement les BCF les plus faibles de leur classe (classe 4 Cl pour les deux premiers et classe 6 Cl pour le dernier). Cette tendance n'a pas été observée pour le PCB 169 en raison du nombre faible de valeurs BCF obtenues (3 valeurs pour les 8 espèces testées).

La comparaison des BCF1 et BCF4 (Figure 4 et Figure 5) entre les matrices végétales testées met en évidence :

- que des BCF n'ont pas pu être calculés pour tous les congénères, végétaux ou maille de sol ;
- que les BCF obtenus sur P1 sont globalement plus élevés que ceux obtenus sur P4 (jusqu'à 3 ordres de grandeur pour une même espèce végétale), exceptés pour la courgette ;
- que les BCF, pour les deux mailles, sont plus élevés pour la famille des PCB que pour les familles de PCDD/F (jusqu'à 2 ordres de grandeur, selon les congénères).

Dans le cas où des substances étaient non quantifiées dans le végétal ou dans le sol, des valeurs de BCF ont été estimées selon une seconde approche sur la base des limites de quantification (cf. chapitre IV du livrable TROPHé n°2). Les règles de calcul de ces BCF estimés (appelés BCFé) sont :

- calcul du BCFé si la concentration dans la matrice végétale **OU** sol est inférieure à la limite de quantification, sur la base de la valeur de limite de quantification divisée par 2 ;
- absence de calcul du BCFé si les concentrations dans la matrice végétale **ET** sol sont inférieures à la limite de quantification (incertitudes trop élevées quant à un transfert potentiel).

Les valeurs de BCFé utilisés dans cette étude sont la moyenne de 3 réplicats, comme pour les BCF.

Les valeurs des BCFé1 et des BCFé4 sont disponibles en Annexe 5.

2.4 Facteurs de Biodisponibilité dans les sols

Les travaux sur la biodisponibilité des PCB_i ont été menés par l'UR-AFPA de l'Université de Lorraine dans le cadre d'une thèse soutenue en 2014 intitulée « Évaluation du risque sanitaire lié à l'ingestion involontaire de sol - Étude des propriétés du sol sur la biodisponibilité relative des PCB »⁹. Il s'agissait notamment d'évaluer l'influence de la matière organique sur la biodisponibilité chez le porcelet des PCB_i présents dans des sols (cf. chapitre V du livrable TROPHé n°2).

⁹ Matthieu Delannoy, Thèse soutenue le 3 décembre 2014, Université de Lorraine, ENSAIA – UR AFPA



Deux notions sont à distinguer :

- La **biodisponibilité absolue**, soit « *la fraction de la dose de polluants organiques persistants issue d'une matrice d'étude ingérée qui à partir du tractus gastro-intestinal, de la peau ou de poumons, atteint la circulation systémique* » (NEPI, 2000¹⁰) ;
- La **biodisponibilité relative**, soit « *la comparaison de la biodisponibilité des polluants présents dans une matrice d'étude par rapport à une matrice de référence ayant les mêmes concentrations de polluants organiques persistants que la matrice étudiée* » (NEPI, 2000).

La biodisponibilité relative se traduit ici par un facteur permettant de quantifier la différence de biodisponibilité d'une substance entre la matrice « sol » et la matrice de référence (fondant la VTR) utilisée pour le calcul des risques (cf. paragraphe II.2.2.3), tel que :

$$BD_{rel} = \frac{B_{sol}}{B_{VTR}}$$

Avec :

- BD_{rel} : Biodisponibilité relative de la substance ingérée à partir du sol (sans unité)
- B_{sol} : Biodisponibilité absolue de la substance avec la matrice Sol (sans unité)
- B_{VTR} : Biodisponibilité absolue de la substance avec la matrice de référence (sans unité)

La biodisponibilité relative a été déterminée lors des travaux expérimentaux sur la base des concentrations mesurées dans le tissu adipeux et le foie des porcelets, après ingestion de boulettes contaminées. Les taux de biodisponibilité relative se révèlent assez élevés avec des valeurs comprises entre 83 et 94% selon le congénère considéré (cf. Tableau 3). L'étude n'a pas permis de déterminer des taux pour les PCB les plus légers.

Tableau 3 : Biodisponibilité relative déterminée chez le porcelet exposé aux sols étudiés

	Sol A1
PCB 101	83 %
PCB 138	92 %
PCB 153	94 %
PCB 180	83 %

¹⁰ NEPI, 2000. Assessing the Bioavailability of Metals in Soil for Use in Human Health Risk Assessments.



I Méthodologie pour l'évaluation des expositions et des risques sanitaires chez l'Homme

1. Présentation générale de la démarche

La démarche suivie est constituée de quatre étapes clés de l'ERS (« Evaluation des Risques Sanitaires ») telles que définies dans la méthodologie des guides de références de l'Institut de Veille Sanitaire (InVS, 2000) et du guide INERIS (INERIS, 2013), à savoir :

- **L'identification du danger.** Elle consiste à identifier le potentiel dangereux des substances, soit les effets indésirables qu'une substance est intrinsèquement capable de provoquer chez l'homme ;
- **L'identification des relations dose-réponse.** Il s'agit de définir, pour chacune des substances, la relation quantitative entre la dose ingérée et l'incidence de l'effet délétère.
- **L'évaluation des expositions.** Elle consiste à quantifier, selon un scénario défini pour une population (voie d'apport, fréquence d'exposition, etc.), la dose à laquelle est exposée cette population ;
- **La caractérisation des risques.** Elle permet une appréciation des risques sanitaires via le calcul, quand cela est possible, de Quotients de Dangers (QD) pour les effets à seuil et des Excès de Risque Individuel (ERI) pour les effets sans seuil.

Sur la base des apports des étapes précédentes du projet TROPHé, les expositions et les risques sanitaires chez l'Homme sont évalués pour une population exposée de manière chronique aux sols des mailles P1 et P4, pour une ingestion non intentionnelle de sol et une ingestion de végétaux potagers cultivés sur ces derniers. Cette évaluation est réalisée via l'outil de modélisation MODUL'ERS¹¹, un outil multi-compartiment créé et développé par l'INERIS spécifiquement pour l'évaluation des risques sanitaires chez l'Homme (cf. Annexe 6).

2. Les étapes clés de la démarche

Les quatre étapes de la démarche d'évaluation des expositions et des risques sont reprises en détail ci-dessous selon les spécificités de l'étude pour TROPHé.

2.1 Identification du danger

Concernant les différents effets indésirables des PCDD/F et des PCB, le lecteur se reportera aux fiches INERIS de données toxicologiques et environnementales des substances, disponibles sur le site du portail substances chimiques de l'INERIS¹².

2.2 Identification des relations dose-réponse

Les relations doses-réponses sont traduites par des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) qui permettent de définir la relation quantitative entre un niveau d'exposition et la possibilité ou la probabilité d'apparition de l'effet critique. Selon les mécanismes toxiques mis en jeu, deux types de VTR sont considérés :

- Les VTR « à seuil de dose » sont construites dans le cas de substances provoquant au-delà d'une certaine dose, des dommages dont la gravité augmente avec la dose absorbée ;
- Les VTR « sans seuil de dose » sont construites dans le cas de substances pour lesquelles l'effet apparaît quelle que soit la dose reçue et pour lesquelles la probabilité de survenue augmente avec la dose.

¹¹ MODUL'ERS v2.0.1, bibliothèque de modules v1.2.25

¹² <http://www.ineris.fr/substances/fr/>



Pour une exposition chronique *via* la voie ingestion, l'INERIS a retenu les VTR présentées au Tableau 4 en tenant compte des modalités de choix des VTR définie par la note d'information N°DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014¹³ (cf. Annexe 7).

Tableau 4 : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) sélectionnées pour une exposition chronique *via* la voie ingestion, pour les familles PCB-ndl, PCDD/F et PCB-dl

	Risque AS / SS	Valeur VTR	Unité	Organisme (année)
PCB-ndl	SS	2,0E+00	(mg/kg/j) ⁻¹	US EPA (1997)
	AS	1,0E-05	mg/kg/j	AFSSA (2010)
PCDD/F et PCB-dl	AS	7,0E-10	mg TEQ/kg/j	US EPA (2012)

AS : A Seuil ; SS : Sans Seuil

2.3 Evaluation des expositions

L'évaluation de l'exposition¹⁴ consiste à identifier les personnes exposées (âge, sexe, caractéristiques physiologiques, budgets espace-temps, etc.) et les voies d'exposition des substances (inhalation, ingestion, contact cutané) mais aussi à quantifier cette exposition (fréquence, durée, intensité).

Dans le cadre de notre étude, la population fictive considérée est de type résidentiel (ménages composés d'adultes et d'enfants) possédant un jardin potager. Leur exposition aux PCDD/F et PCB des sols est chronique, via l'ingestion non intentionnelle de sol et l'ingestion des différents végétaux potagers cultivés sur ces sols.

Dans cette première approche, la voie d'exposition aux PCB par inhalation n'a pas été retenue¹⁵ car l'activité de jardinage des ménages est réalisée en extérieur.

L'exposition aux mailles de sol P1 et P4, la maille la moins contaminée et la plus contaminée de l'étude, est évaluée. Les valeurs des paramètres de modélisation définies pour les scénarios d'étude sont présentées au paragraphe 3.1. Les scénarios décrits ci-dessus ne correspondent pas à des scénarios réels puisqu'aucune des parcelles étudiées dans le cadre de ce projet ne fait l'objet d'un usage résidentiel ou de jardinage.

Pour l'ingestion, l'exposition à chacune des substances est quantifiée par le calcul de la Dose moyenne Journalière d'Exposition¹⁶, (DJE, en mg/kg pc/j) tel que :

$$DJE = DJE_{vgt} + DJE_s$$

Avec :

¹³ Note d'Information N°DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués.

¹⁴ Exposition : contact entre un organisme vivant et une substance chimique, présente dans un ou des milieux potentiellement contaminés. Elle dépend de sa concentration dans les milieux, de son comportement physico-chimique et des voies et des niveaux d'exposition des populations avec les milieux concernés.

¹⁵ Dans les livrables TROPHé n°1 et n°2 sur la synthèse des travaux expérimentaux sur le transfert des POPS dans les végétaux (DRC-16-138302-01541C), des analyses de la qualité de l'air dans l'enceinte du phytotron ont mis en évidence la quantification de PCB 28 et de PCB 52 dans l'air de l'enceinte.

¹⁶ La dose d'exposition est la quantité de cette substance présentée à la barrière biologique de l'individu exposé (dose externe) ou l'ayant traversé (dose interne), par unité de poids corporel et par unité de temps, par exemple dans le cas de la voie d'exposition par ingestion.



$$DJE_{vgt} = \frac{\sum_i C_{vgt,i} \times Q_{vgt,i} \times F_{vgt,i}}{P} \quad \text{Où} \quad C_{vgt,i} = C_s \times BCF_i$$

et

$$DJE_s = \frac{C_s \times Q_s \times BD_{rel}}{P}$$

Où :

- DJE_{vgt} : Dose Journalière d'Exposition par ingestion de végétaux, en mg/kg pc/j moyennée sur l'année (365 j) ;
- C_{vgt,i} : Concentration de la substance ingérée dans le végétal i, exprimée en mg/kg ;
- Q_{vgt,i} : Quantité de végétal i ingéré par jour, exprimée en kg/j (moyenne annuelle, données MODUL'ERS et INCA2) ;
- F_{vgt,i} : part de la quantité de végétal i consommé et exposé à la contamination étudiée (assimilable à la part de consommation de produits locaux, ici pour un ménage possédant un jardin, données MODUL'ERS) ;
- DJE_s : Dose Journalière d'Exposition par ingestion de sol, en mg/kg pc/j, moyennée sur l'année (365 j) ;
- C_s : Concentration de la substance ingérée dans le sol, exprimée en mg/kg ;
- BCF_i : Facteur de bioconcentration de la substance ingérée vers le végétal i ;
- Q_s : Quantité de sol ingéré par jour, exprimée en kg/j (moyenne annuelle, données Stanek¹⁷) ;
- BD_{rel} : Facteur de biodisponibilité relative de la substance ingérée à partir du sol (données MODUL'ERS) ;
- P : Masse corporelle de la personne (kg pc, données MODUL'ERS).

2.4 Caractérisation des risques

Pour chaque substance, pour l'ingestion, la quantification des risques s'exprime sous forme :

- de Quotient de Danger (QD) pour les risques à seuil, tel que

$$QD = \frac{DJE}{VTR_{AS}}$$

- d'Excès de Risque Individuel (ERI) pour les risques sans seuil, tel que

$$ERI = \frac{DJE * T_i}{T_m} \times VTR_{SS}$$

Avec :

- T_i : Durée de la période d'exposition i sur laquelle l'exposition est calculée (ici, 30 ans par convention) ;
- T_m : Durée sur laquelle l'exposition est rapportée (ici, sur la vie entière, soit 70 ans par convention).

¹⁷ InVS/INERIS, guide pratique 2012. Quantités de terre et poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants. (<http://www.ineris.fr/centredoc/guide-pratique-quantites-terre-poussieres-ingerees-bioaccessibilite-polluants-1--1348736162.pdf>)



Les résultats des calculs de risques sanitaires sont comparés aux critères d'acceptabilité conventionnellement admis pour la démarche de l'EQRS¹⁸ :

- Si $QD < 1$ et $ERI < 10^{-5}$, alors les risques sont jugés acceptables ;
- Si $QD > 1$ ou $ERI > 10^{-5}$, alors les risques sont jugés non acceptables.

La démarche est conduite pour chacune des substances et des voies d'exposition étudiées.

Il est rappelé que l'objectif de ce volet du projet de recherche TROPHé n'est pas de mener une évaluation des risques du site mais d'apprécier la sensibilité des paramètres intervenant lors d'une évaluation des risques chez l'Homme et sur les conclusions de cette dernière. Cela l'est d'autant que le scénario étudié ici ne correspond pas à une situation réelle, les parcelles considérées ne faisant l'objet ni d'usage résidentiel, ni de jardinage.

3. Paramètres et hypothèses d'étude

Les hypothèses de calcul et les valeurs de paramètres sélectionnées dans le cadre de cette évaluation sont présentées ci-dessous.

3.1 Populations exposées

Les populations fictives prises en compte pour l'étude sont des adultes et enfants, pour des foyers disposant de jardins potagers (cf. §2.3). Les valeurs retenues pour les paramètres relatifs à ces derniers sont présentées au Tableau 5.

Tableau 5 : Valeurs des paramètres définissant les populations exposées

	Classe d'âge (en années)	Masse corporelle de la cible (en kg)	Masse de particules de sol ingérées par jour (en mg/j)
Enfants	0 - 1	7,6	91
	1 - 3	12	91
	3 - 6	18	91
	6 - 11	29	50
	11 - 15	47	50
	15 - 18	60	50
Adultes	18 - 70	70	50

Les classes d'âge et les masses corporelles sont des valeurs proposées par défaut par le logiciel, suite à un travail de revue bibliographique¹⁹.

Pour les masses de sol ingérées, la valeur de 91 mg/j, préconisée par la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués²⁰ a été choisie pour les enfants de moins de 6 ans (95^{ème} percentile de la distribution de Stanek, guide pratique INERIS/InVS 2012²¹). L'approche est très conservatrice pour les enfants de moins de 6 mois dont le contact direct avec un sol extérieur est jugé nul voire négligeable.

La valeur de 50 mg/j²², définie initialement par défaut dans MODUL'ERS pour les enfants de 1 à 11 ans, a été attribuée aux enfants de plus de 6 ans mais aussi aux adultes (recommandation issue de la

¹⁸MEEM, avril 2017, « Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués », nouveau texte méthodologique accompagné d'un document introductif se substituant aux annexes de la note ministérielle du 8 février 2007 ayant pour objet les sites et sols pollués et relative aux modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués.

¹⁹ Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS. INERIS, 2015. DRC-14-141968-11173A

²⁰ MEEM. Avril 2017. Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués.

²¹ Quantités de terre et poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants, guide pratique 2012 (<http://www.ineris.fr/centredoc/guide-pratique-quantites-terre-poussieres-ingerees-bioaccessibilite-polluants-1--1348736162.pdf>)

²² US EPA, 2011. Exposure Factors Handbook.



méthodologie nationale de gestion des SSP, au lieu des 20 mg/j renseignées par défaut dans MODUL'ERS pour les personnes de plus de 15 ans).

Comme décrits dans la section précédente, les effets des substances sont de deux types : à seuil ou sans seuil. Ainsi, la dose d'exposition est calculée :

- Pour les effets à seuil, sur une année d'exposition à l'ingestion non intentionnelle de sol et à l'ingestion de végétaux potagers cultivés sur ces sols.
- Pour les effets sans seuil, selon la typologie de population considérée. Deux populations sont prises en compte :
 - des adultes exposés dès leur 18 ans, et ce jusqu'à 70 ans (soit 52 ans d'exposition) ;
 - des enfants, issus de la classe d'âge la plus exposée.

Ces expositions sont pondérées sur la vie entière, dont la durée est conventionnellement prise égale à 70 ans.

3.2 Sols

L'évaluation porte sur des expositions quotidiennes (365 jours/an) à des sols issus des mailles P1 et P4 (cf. concentrations et granulométrie aux paragraphes I.2.1 et I.2.2

Aucun phénomène d'apport de polluant (irrigation par exemple) ou de perte de polluant n'a été pris en compte (dégradation naturelle des composés, lessivage des sols par les pluies, etc.).

L'ensemble des substances présentes dans les deux sols étudiés est considéré en première approche comme 100% biodisponible.

3.3 Végétaux potagers consommés

Le scénario de consommation de végétaux par un foyer possédant un potager a été défini au regard des espèces cultivées lors des travaux expérimentaux, retenues comme étant représentatives des jardins en France (cf. livrables TROPHé n°1 et 2). Chacune des espèces peut être associée à la catégorie suivante :

- les laitues pour les légumes-feuilles ;
- les carottes pour les légumes-racines ;
- les pommes de terre pour les tubercules ;
- les haricots et les courgettes pour les légumes-fruits.

Les catégories « céréales » et « fruits » n'ont pas été prises en compte dans le scénario de consommation, en l'absence de végétaux cultivés représentatifs.

La courgette étant connue pour être particulièrement accumulatrice, il a été décidé de distinguer ce végétal des « autres légumes-fruits » associés aux haricots.

Les quantités de végétaux ingérées quotidiennement sont renseignées par défaut dans le logiciel MODUL'ERS. Ces données²³ sont issues d'un travail de compilation et de traitement de données bibliographiques (dont Ciblex, les études INCA de l'ANSES, etc.). Pour le cas spécifique des courgettes (cucurbitacées), les données moyennes de consommation journalières pour les enfants et les adultes ont été recherchées dans le jeu de données rendu publique de l'étude INCA2²⁴ et retranchées à la catégorie « légumes-fruits ». Le Tableau 6 présente les quantités ingérées journalières utilisées comme données d'entrée de modélisation pour cette étude.

²³ INERIS, 2015. Paramètres d'exposition de l'Homme au logiciel MODUL'ERS. DRC-14-141968-11173A

²⁴AFSSA, 2009. Étude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA 2) 2006-2007. Données disponibles sur le site : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-de-consommations-et-habitudes-alimentaires-de-letude-inca-2-3/>



Tableau 6 : Quantité journalière ingérée par catégorie de végétaux pour les différentes classes d'âge

Masse de produit d'origine végétale ingérée par jour par la cible humaine (en kg de végétal frais/j)						
Classe d'âge (en années)	Légumes- feuilles	Légumes- racines	Tubercules	Courgettes	Autres légumes-fruits	Total
0 - 1	7,1E-03	1,7E-02	2,1E-02	2,1E-03	9,4E-03	5,7E-02
1 - 3	2,1E-02	2,7E-02	5,2E-02	2,1E-03	3,7E-02	1,4E-01
3 - 6	6,9E-03	6,4E-03	4,6E-02	2,1E-03	5,8E-02	1,2E-01
6 - 11	9,1E-03	6,3E-03	4,6E-02	2,1E-03	5,6E-02	1,2E-01
11 - 15	1,0E-02	7,1E-03	5,8E-02	2,2E-03	6,3E-02	1,4E-01
15 - 18	1,1E-02	7,9E-03	6,0E-02	2,4E-03	6,2E-02	1,4E-01
18 - 70	2,2E-02	1,1E-02	5,8E-02	4,2E-03	1,0E-01	2,0E-01

Sur cette quantité de végétaux ingérée quotidiennement, seule une fraction est issue de l'autoproduction et de dons, c'est-à-dire exposée aux contaminants du sol local. Pour cette étude, nous avons choisi de prendre en compte les dons en plus de l'autoproduction. Le Tableau 7 présente les fractions des quantités de végétaux ingérées exposés à la contamination du sol (source MODUL'ERS d'après l'étude INSEE, 199425 sur la consommation nationale) pour des ménages possédant un potager.

Tableau 7 : Fraction de la quantité consommée et exposée à la contamination du site par catégorie de végétaux (autoproduction et dons de ménage disposant d'un potager)

Catégories de végétaux	Fraction moyenne de la quantité consommée et exposée à la contamination du site pour le végétal (cas d'un ménage disposant d'un potager)
Légumes-feuilles	0,5
Légumes-racines	0,45
Tubercules	0,45
Courgettes	0,55
Autres légumes-fruits	0,55

La fraction alimentaire exposée à la contamination retenue dans la présente étude (environ 50%) est conservatoire au regard d'autres données d'autoconsommation telle que CIBLEX (entre 10% et 30% d'autoproduction). Il est à noter que diminuer la fraction alimentaire exposée aura un effet de proportionnalité sur la diminution de l'exposition via l'ingestion de végétaux.

La répartition dans le bol alimentaire des différentes catégories de végétaux potagers autoproduits et issus des dons est illustrée à la Figure 6 pour les adultes et à la Figure 7 pour la population infantile la plus exposée (enfants de 1 à 3 ans).

²⁵ INSEE, 1994. Dubeaux D., Les Français ont la main verte, Division conditions de vie des ménages, INSEE Première, n°338, 1994. Consommation, autoproduction et dons de légumes et fruits frais pour des ménages avec et sans potager.



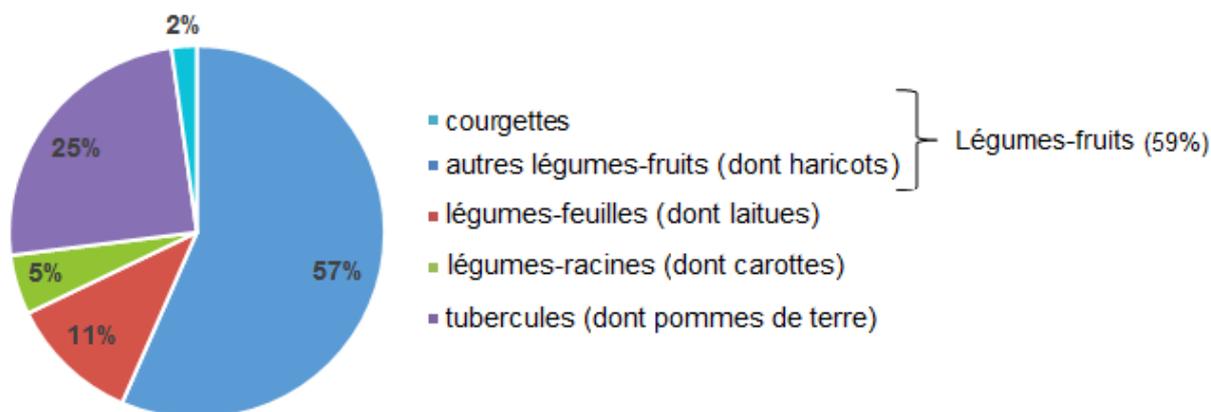


Figure 6 : Bol alimentaire pour un adulte issu d'un foyer possédant un potager (autoproduction et dons) – Part des catégories végétales (espèce végétale représentante) dans l'ingestion journalière de végétaux potagers – Source MODUL'ERS et INCA2

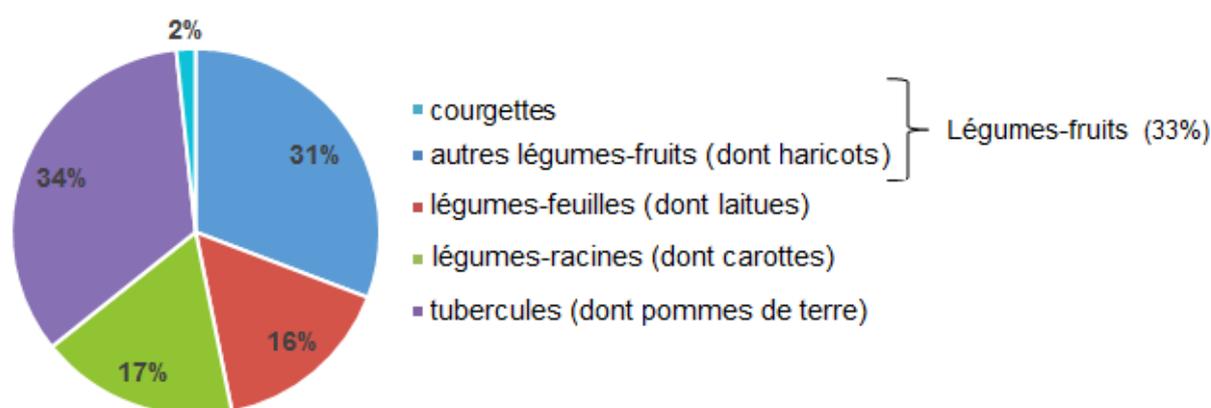


Figure 7 : Bol alimentaire pour un enfant de 1 à 3 ans issu d'un foyer possédant un potager (autoproduction et dons) – Part des catégories végétales (espèce végétale représentante) dans l'ingestion journalière de végétaux potagers – Source MODUL'ERS et INCA2

Les sources de contamination des végétaux prises en compte sont le transfert racinaire et les échanges gazeux. Ces transferts sont représentés par les BCF expérimentaux globaux calculés pour chaque espèce végétale (cf. valeurs BCF1 obtenues sur le sol P1 et BCF4 sur le sol P4 au paragraphe 2.1).

Pour le cas des légumes-racines associés à la carotte, le choix a été fait de considérer les BCF pour ce végétal non épluché (mais lavée). Cela est cohérent avec les seuls BCF disponibles pour les tubercules (pomme de terre non épluchée mais lavée) et constitue une approche conservatoire. En effet, les concentrations en POPs dans les carottes sont plus élevées quand elles ne sont pas épluchées (cf. paragraphe 4.3 au chapitre IV du livrable TROPHé n°2). L'absence d'épluchage est cohérente avec la hausse de la consommation de produits biologiques en France²⁶ qui s'accompagne d'un discours sur le non-gaspillage.

Le Tableau 8 présente les teneurs en matière sèche des végétaux prises en compte dans la modélisation des expositions et des risques (source MODUL'ERS).

²⁶ « Le marché de la bio en France : la consommation de produits biologiques progresse. » <http://www.agencebio.org/le-marche-de-la-bio-en-france>



Tableau 8 : Teneur en matière sèche des végétaux (source MODUL'ERS)

Catégories de végétaux	Teneur en matière sèche des végétaux
Légumes-feuilles	0,07
Légumes-racines	0,1
Tubercules	0,23
Courgettes	0,07
Autres légumes-fruits	0,07

3.4 Matrice d'exposition

Les voies de transfert et d'exposition chronique aux PCB et aux PCDD/F considérées pour l'Homme sont :

- Les transferts directs du sol vers les organes consommés : les légumes-feuilles, les légumes-fruits, les légumes-racines et tubercules ;
- L'exposition par ingestion non intentionnelle par l'Homme de sol superficiel ;
- L'exposition par ingestion par l'Homme de végétaux potagers cultivés sur ces mêmes sols.

La matrice d'exposition sous MODUL'ERS correspond à la Figure 8 ci-dessous.

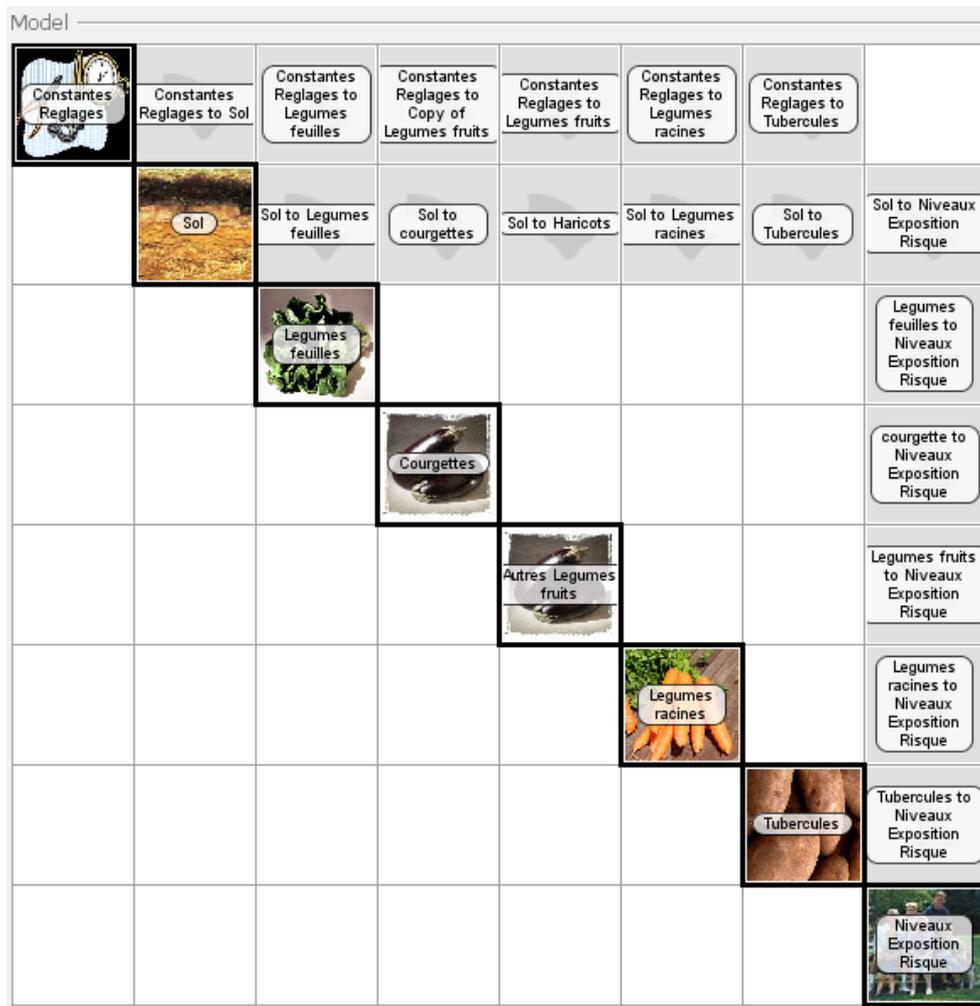


Figure 8 : Matrice construite pour la modélisation des transferts et l'estimation des expositions et risques sous MODUL'ERS



Evaluation de l'exposition et des risques pour différents niveaux de pollutions de sol aux POPs

Objectifs

- Evaluer les expositions et les risques sanitaires pour des niveaux en PCB et PCDD/F différents ;
- Evaluer la part liée à l'ingestion de sol et l'ingestion de végétaux potagers ;
- Comparer l'exposition à l'exposition moyenne de la population française (Etude de l'Alimentation Totale française - EAT2- 2011) ;
- Evaluer le risque pour les différentes classes d'âge (adulte et enfants) ;
- Identifier les substances qui tirent l'exposition et les risques ;
- Identifier les végétaux qui tirent l'exposition et les risques.

Paramètres testés

Couples [Concentrations dans les sols / BCF expérimentaux] :

- BCF1 / P1
- BCF4 / P4

Etude de sensibilité 1 : Influence de la quantité de sol ingérée

Objectifs

- Evaluer l'influence de la quantité de sol ingérée sur l'exposition et les risques sanitaires pour la population infantile, en comparaison à l'ingestion de végétaux.

Paramètres testés

Quantité de sol ingérée par jour : Qsol

Etude de sensibilité 2 : Influence de la prise en compte des limites de quantification dans l'estimation des BCF – BCF estimés

Objectifs

- Evaluer l'influence de l'utilisation des BCF estimés (BCFé) par rapport aux BCF sur l'exposition et les risques sanitaires ;
- Justifier ou non leur utilisation.

Paramètres testés

Facteurs de Bioconcentrations sol-végétaux :

- BCF1 / P1 versus BCFé1 / P1
- BCF4 / P4 versus BCFé4 / P4

Etude de sensibilité 3 : Prise en compte des concentrations des différentes fractions granulométriques du sol

Objectifs

- Evaluer les expositions et les risques sanitaires liés à l'ingestion non intentionnelle de sol pour les concentrations de la fraction '0-250 µm' (fraction susceptible d'adhérer à la peau lors de contact main-bouche) au lieu des concentrations de la fraction '0 – 1 cm', pour la population infantile.

Paramètres testés

Concentrations en POPs dans les sols P1 et P4 pour l'ingestion de sol :

- Csol '0-1 cm'
- Csol '<250 µm'

Remarque : pour l'ingestion de végétaux, les Csol '0-1 cm' sont conservées

Etude de sensibilité 4 : Influence de la biodisponibilité relative dans le sol

Objectifs

- Evaluer l'influence de l'utilisation de facteurs de biodisponibilité relative, obtenus expérimentalement, sur l'exposition et les risques sanitaires.

Paramètres testés

Biodisponibilité relative dans le sol : BD_{rel}
(valeur conservatoire BD_{rel} = 1 par défaut pour tous les congénères)



4. Descriptif des études déclinées

Les expositions et les risques sanitaires chez l'Homme, liés à l'ingestion non intentionnelle de sol et de végétaux potagers cultivés sur ces sols, pour différents niveaux de pollutions de POPs ont été calculés. Suite à cette évaluation, quatre études de sensibilité, testant différents paramètres, ont également été menées, comme décrit ci-dessous.



II Evaluation de l'exposition et des risques pour différents niveaux de pollutions de sol aux POPs

1. Objectifs

L'exposition et les risques sanitaires chez l'Homme sont évalués par modélisation pour l'ingestion de sol et de végétaux cultivés sur deux mailles de sol différentes :

- P1, soit la maille avec les concentrations les plus faibles en PCB et en PCDD/F dans les sols sur les quatre mailles investiguées pour le projet TROPHé ;
- P4, soit la maille avec les concentrations les plus élevées en PCB et en PCDD/F sur les quatre mailles investiguées.

Les objectifs sont ici :

- D'évaluer les doses d'exposition et les niveaux de risques chez l'Homme :
 - Pour une exposition sur deux sols du site de St-Cyprien d'après les données générées par les travaux expérimentaux (cf. livrables n°1 et 2 TROPHé) ;
 - Liés à l'ingestion de sol et à l'ingestion des végétaux ;
 - Pour les différentes classes d'âge (adulte et enfants) ;
- De comparer l'exposition à l'exposition moyenne de la population française (EAT2, 2011) ;
- D'identifier les substances et les végétaux qui tirent les expositions et les risques.

2. Paramètres testés

Les paramètres testés sont les couples [concentrations dans les sols/BCF] obtenus lors des travaux expérimentaux (cf. livrables n°1 et 2 TROPHé) pour les mailles de sol P1 et P4 :

- Les concentrations dans le sol de la maille P1 avec les BCF1 ;
- Les concentrations dans le sol de la maille P4 avec les BCF4.

Les BCF1 et les BCF4 sont respectivement utilisés pour estimer l'exposition et les risques liés aux sols des mailles P1 et P4.

Les concentrations faibles, voire inférieures à la LQ, dans les végétaux mais aussi dans les sols, engendrent des valeurs de BCF1 pouvant être de 1 à 2 ordres de grandeur plus élevées que celles de BCF4 pour un même végétal. Tester deux couples de paramètres « Concentration dans le sol/ BCF associé » permet de prendre en compte les variations de transfert qui ont pu être observées lors de la phase expérimentale du projet TROPHé (cf. annexe 12 des livrables TROPHé n°1 et n°2 sur les BCF observés sur les 4 mailles de sol). Il n'a pas été conduit d'étude pour apprécier l'impact du choix d'un BCF qui ne corresponde pas à celui du sol étudié (par exemple, choix du BCF1 pour le sol P4 et inversement choix du BCF4 pour le sol P1).

3. Résultats

3.1 Exposition journalière

3.1.1 Selon les voies d'ingestion

3.1.1.1 Par familles de substances

Les

Tableau 9, Tableau 10, Tableau 11 et Tableau 12 ci-dessous synthétisent les Doses Journalières d'Exposition (DJE) modélisées pour une ingestion de sol et de végétaux cultivés sur des sols issus des mailles P1 et P4 et ce, pour les différentes classes d'âge. Les DJE sont sommées respectivement par familles de substances : les PCB-ndl, les PCB-dl, les PCDD/F et la somme des PCDD/F et PCB-dl (système TEF OMS 1998).



Tableau 9 : Dose Journalière d'Exposition aux PCB-ndl (en mg/kg pc*/j) selon les différentes voies d'ingestion, pour une exposition à des sols issus des mailles P1 et P4

PCB-ndl 6 congénères	Classes d'âge (en années)						
	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 11	11 - 15	15 - 18	18 - 70
DJE par ingestion de sol (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	4,0E-08	2,5E-08	1,7E-08	5,8E-09	3,5E-09	2,8E-09	2,4E-09
Maille P4	3,4E-07	2,1E-07	1,5E-07	5,0E-08	3,0E-08	2,4E-08	2,1E-08
DJE par ingestion de végétaux (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	2,6E-07	3,6E-07	1,5E-07	9,8E-08	7,2E-08	6,0E-08	6,5E-08
Maille P4	1,2E-06	1,4E-06	6,8E-07	4,4E-07	3,1E-07	2,6E-07	3,0E-07
DJE par ingestion de sol et de végétaux (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	3,0E-07	3,9E-07	1,7E-07	1,0E-07	7,6E-08	6,3E-08	6,7E-08
Maille P4	1,6E-06	1,6E-06	8,3E-07	4,9E-07	3,4E-07	2,8E-07	3,2E-07

*kg pc : kilogramme de poids corporel

Tableau 10 : Dose Journalière d'Exposition aux PCB-dl (en mg/kg pc*/j) selon les différentes voies d'ingestion, pour une exposition à des sols issus des mailles P1 et P4

PCB-dl 12 congénères	Classes d'âge (en années)						
	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 11	11 - 15	15 - 18	18 - 70
DJE par ingestion de sol (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	4,5E-09	2,7E-09	1,9E-09	6,5E-10	4,0E-10	3,1E-10	2,7E-10
Maille P4	6,1E-08	3,7E-08	2,6E-08	8,8E-09	5,4E-09	4,2E-09	3,6E-09
DJE par ingestion de végétaux (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	5,3E-08	8,8E-08	3,8E-08	2,5E-08	1,8E-08	1,5E-08	2,0E-08
Maille P4	2,2E-07	3,1E-07	1,3E-07	8,5E-08	6,0E-08	5,0E-08	6,6E-08
DJE par ingestion de sol et de végétaux (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	5,8E-08	9,1E-08	4,0E-08	2,6E-08	1,8E-08	1,5E-08	2,0E-08
Maille P4	2,8E-07	3,5E-07	1,5E-07	9,4E-08	6,5E-08	5,4E-08	7,0E-08

*kg pc : kilogramme de poids corporel

Tableau 11 : Dose Journalière d'Exposition aux PCDD/F (en mg/kg pc*/j) selon les différentes voies d'ingestion, pour une exposition à des sols issus des mailles P1 et P4

PCDD/F 17 congénères	Classes d'âge (en années)						
	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 11	11 - 15	15 - 18	18 - 70
DJE par ingestion de sol (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	5,6E-10	3,4E-10	2,4E-10	8,1E-11	4,9E-11	3,9E-11	3,3E-11
Maille P4	6,5E-08	4,0E-08	2,8E-08	9,4E-09	5,7E-09	4,5E-09	3,9E-09
DJE par ingestion de végétaux (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	4,7E-10	6,1E-10	2,8E-10	1,7E-10	1,3E-10	1,1E-10	9,8E-11
Maille P4	2,8E-08	3,6E-08	1,8E-08	1,1E-08	8,3E-09	6,8E-09	6,2E-09
DJE par ingestion de sol et de végétaux (mg/kg pc*/j)							
Maille P1	1,0E-09	9,5E-10	5,2E-10	2,5E-10	1,8E-10	1,5E-10	1,3E-10
Maille P4	9,3E-08	7,5E-08	4,5E-08	2,0E-08	1,4E-08	1,1E-08	1,0E-08

*kg pc : kilogramme de poids corporel



Tableau 12 : Dose Journalière d'Exposition aux PCDD/F+PCB-dl (en mg TEQ OMS98/kg pc*/j) selon les différentes voies d'ingestion, pour une exposition à des sols issus des mailles P1 et P4

PCDD/F et PCB-DL 29 congénères	Classes d'âge (en années)						
	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 11	11 - 15	15 - 18	18 - 70
DJE par ingestion de sol (mg TEQ OMS98/kg pc*/j)							
Maille P1	3,0E-11	1,8E-11	1,3E-11	4,3E-12	2,6E-12	2,1E-12	1,8E-12
Maille P4	3,4E-09	2,1E-09	1,5E-09	5,0E-10	3,0E-10	2,4E-10	2,0E-10
DJE par ingestion de végétaux (mg TEQ OMS98/kg pc*/j)							
Maille P1	9,0E-11	1,2E-10	5,9E-11	3,7E-11	2,8E-11	2,3E-11	2,1E-11
Maille P4	2,0E-09	2,5E-09	1,3E-09	7,9E-10	5,9E-10	4,8E-10	4,5E-10
DJE par ingestion de sol et de végétaux (mg TEQ OMS98/kg pc*/j)							
Maille P1	1,2E-10	1,4E-10	7,2E-11	4,1E-11	3,1E-11	2,5E-11	2,3E-11
Maille P4	5,4E-09	4,6E-09	2,7E-09	1,3E-09	8,9E-10	7,2E-10	6,6E-10

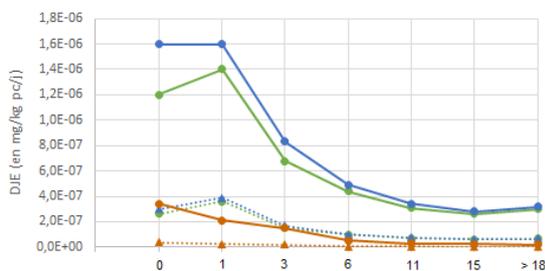
*kg pc : kilogramme de poids corporel

Remarque : afin de comparer les résultats avec les données de l'Etude de l'Alimentation Totale française²⁷ (EAT 2), les DJE pour la somme des PCDD-F et PCB-dl sont présentées selon le référentiel TEF de l'OMS 1998. Les DJE selon le référentiel actuel, soit celui de l'OMS en date de 2005 est disponible en annexe 8.

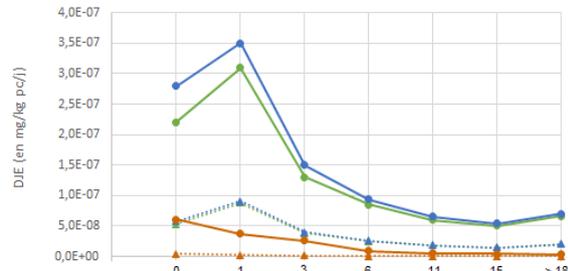
Comme attendu, en comparaison aux concentrations dans les deux sols pour les différentes familles de composés chimiques (cf. Tableau 1 au paragraphe I.2.1), l'exposition à la maille P4 est plus élevée que l'exposition à la maille P1 pour les différentes familles (1 ordre de grandeur d'écart pour les PCB-ndl et les PCB-dl, et deux ordres de grandeur d'écart pour les PCDD/F).

La Figure 9 illustre l'évolution des DJE selon les classes d'âge pour une exposition aux deux sols.

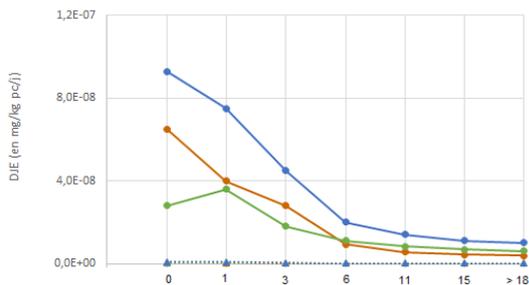
DJE PCB-ndl (mg/kg pc /j)



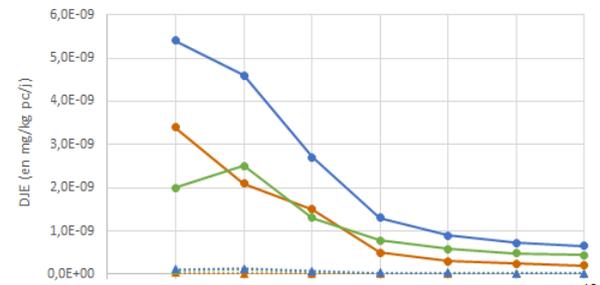
DJE PCB-dl (mg/kg pc /j)



DJE PCDD/F (mg/kg pc /j)



DJE PCDD/F +PCB-dl (mg OMS 98 /kg pc /j)



● P1 / DJE Sol ● P1 / DJE Végétaux ● P1 / DJE globale
● P4 / DJE Sol ● P4 / DJE Végétaux ● P4 / DJE globale

Figure 9 : Evolution des DJE selon les classes d'âge, pour chaque famille de substances, pour P1 et P4

²⁷ ANSES, Juin 2011. Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2). Tome 1. Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques, persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes.



Pour l'exposition *via* l'ingestion de sol, la classe d'âge la plus exposée est celle des enfants de 0 à 1 an pour les PCB-ndl, les PCB-dl et les PCDD/F, puis elle diminue avec l'âge associé à l'augmentation du poids de l'enfant, et la diminution de la quantité de sol ingérée dès 6 ans, dans le cas de notre étude.

Pour l'exposition *via* l'ingestion de végétaux potagers, la classe d'âge la plus exposée est celle des enfants de 1 à 3 ans dont la consommation de végétaux est élevée (cf. Tableau 6, source MODUL'ERS²⁸). L'exposition diminue ensuite avec l'augmentation du poids de l'enfant et la variation de la contribution des végétaux au cours du temps. L'impact sur l'exposition de cette classe d'âge est plus élevé pour les PCB que pour les PCDD/F compte-tenu du transfert et de la contamination plus grande des végétaux aux PCB.

Pour l'exposition globale (sol et végétaux potagers), les enfants de 1 à 3 ans sont les plus exposés aux PCB, alors que pour les PCDD/F ce sont les enfants de moins de 1 an dû à la contribution de l'ingestion de sol.

D'après l'Etude de l'Alimentation Totale française (EAT2 - ANSES, 2011²⁹), l'exposition moyenne de la population française *via* l'alimentation :

- aux **PCB-ndl**, s'élève à $1,9 \cdot 10^{-6}$ mg/kg pc/j chez les adultes (intervalle entre $1,4$ et $2,0 \cdot 10^{-6}$ mg/kg pc/j) et $2,8 \cdot 10^{-6}$ mg/kg pc/j chez les enfants (intervalle entre $2,4 \cdot 10^{-6}$ mg/kg pc/j et $3,4 \cdot 10^{-6}$ mg/kg pc/j) ;
- aux **PCDD/F + PCB-dl**, s'élève à $4,7 \cdot 10^{-10}$ mg TEQ OMS98/kg pc/j chez les adultes (intervalle entre $3,9$ et $4,1 \cdot 10^{-10}$) et $7,6 \cdot 10^{-10}$ mg TEQ OMS98/kg pc/j chez les enfants (intervalle entre $7,0$ et $8,5$).

L'étude met en avant les aliments contribuant majoritairement à l'exposition aux PCB et PCDD/F tels que le poisson, les produits laitiers et les produits carnés. La contribution des légumes (hors pommes de terre) à l'exposition totale *via* l'alimentation générale est estimée dans EAT2 à 0,2% pour les PCB-ndl, et à 0,1% pour les PCDD/F + PCB-dl.

D'après le

Tableau 9 et la Figure 9, pour les PCB-ndl, la DJE calculée pour l'ingestion de sol et de végétaux pour les adultes est inférieure de 1 à 2 ordres de grandeur, respectivement pour P4 et P1, par rapport à l'exposition moyenne de la population française. Pour les enfants de 1 à 3 ans, la DJE est 2 fois plus faible pour la maille P4 et inférieure d'un ordre de grandeur pour P1 par rapport à l'exposition moyenne des enfants français. Pour les PCDD/F et PCB-dl, il a fallu tenir compte du système TEF pour comparer les résultats. Les données de EAT2 sont exprimées selon le référentiel OMS 1998. Les résultats pour les PCDD/F et PCB-dl sont présentés en Annexe 8 selon les référentiels OMS 1998 et 2005. D'après le Tableau 12 et la Figure 9, pour les PCDD/F + PCBdl, la DJE calculée pour l'ingestion de sol et de végétaux pour les adultes est équivalente à celle de l'exposition moyenne de la population française pour P4 et inférieure d'un ordre de grandeur pour P1. Pour les enfants de moins d'un an et de 1 à 3 ans, la DJE est 7 fois plus faible pour la maille P1 mais supérieure d'un ordre de grandeur pour P4.

Par rapport à l'étude EAT2 de l'ANSES pour la population française où la contribution observée de l'ingestion de légumes (hors pommes de terre) est faible, la contribution de l'ingestion de sol et de végétaux à l'exposition de la population fictive étudiée dans TROPHé est non négligeable.

Ce constat n'est pas surprenant puisque les végétaux autoconsommés fictivement dans le projet TROPHé (autoproduction et dons) ont été cultivés sur des sols contaminés par les PCB et PCDD/F, alors que les données de concentrations dans les légumes, utilisées pour EAT2, sont le résultat de l'analyse d'un échantillonnage national sur le marché commercial destiné à l'alimentation.

3.1.1.2 Par congénères

Suite aux observations précédentes, il s'agit d'étudier la part des différents congénères dans la DJE par ingestion, pour les classes d'âge « adulte » et « enfants » de 1 à 3 ans et ce, pour les différentes familles de substances. Cet approfondissement se fait dans le cas d'une exposition à un sol issu de la maille P4 (DJE plus élevées que pour la maille P1).

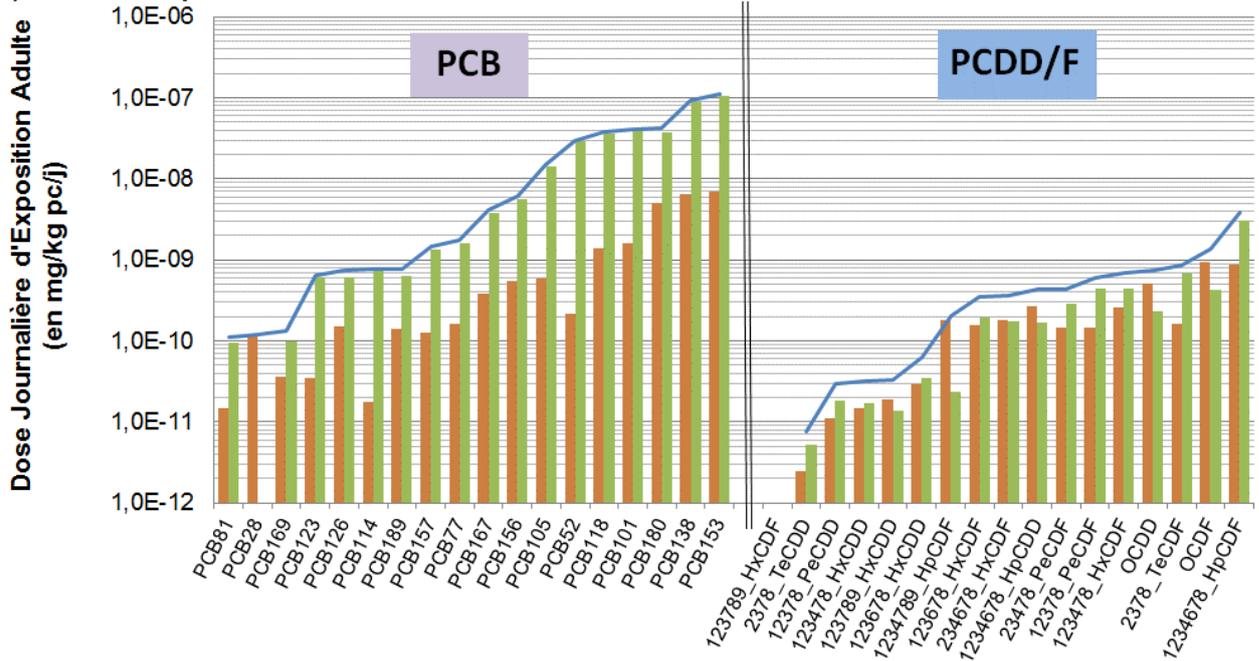
Les DJE par congénères pour les adultes et enfants (1 à 3 ans) sont représentées à la Figure 10 selon les DJE croissantes pour l'ingestion totale (sol et végétaux) pour chaque classe d'âge, selon les familles de substances.

²⁸ INERIS, 2015. Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS. DRC-14-141968-11173A

²⁹ ANSES, Juin 2011. Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2). Tome 1. Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques, persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes.



a) Adulte – Exposition à un sol de maille P4



b) Enfants (1 à 3 ans) – Exposition à un sol de maille P4

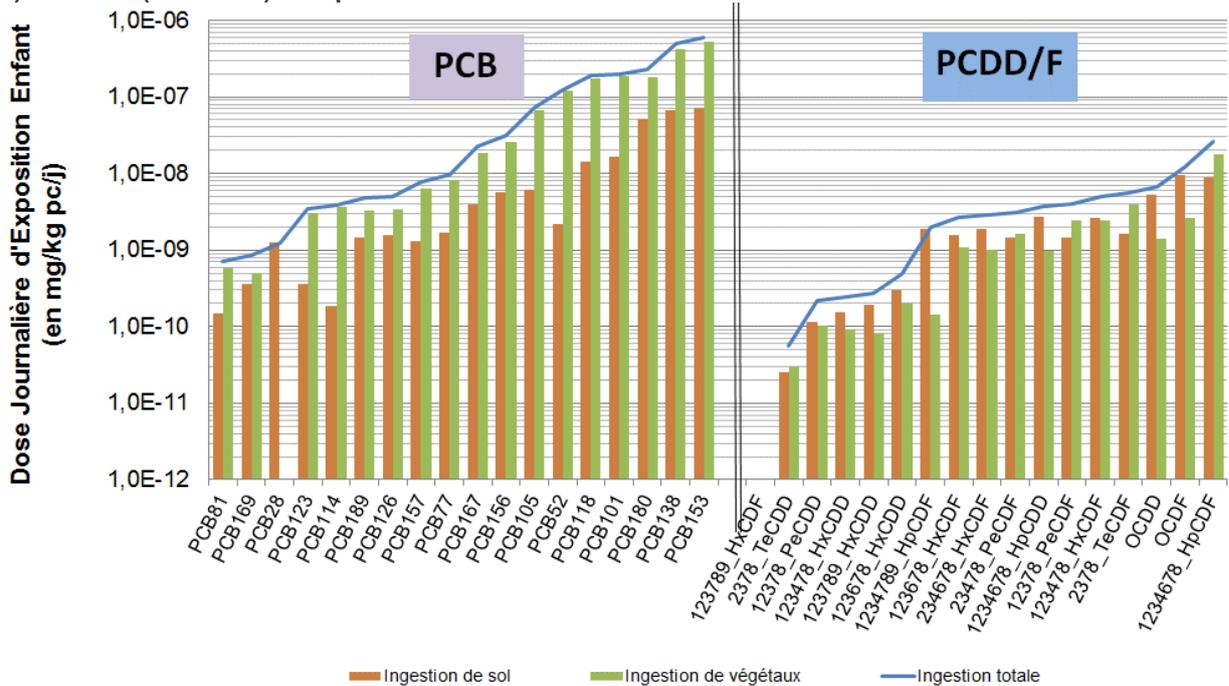


Figure 10 : Doses Journalières d'Exposition (DJE) par congénère et famille, selon les différentes voies d'exposition par ingestion, pour la maille de sol P4 – échelle logarithmique

Comme vu précédemment, l'exposition aux PCB est globalement plus élevée que l'exposition aux PCDD/F et ce, pour les adultes et les enfants.

Les congénères qui tirent l'exposition sont, pour les deux classes d'âge :

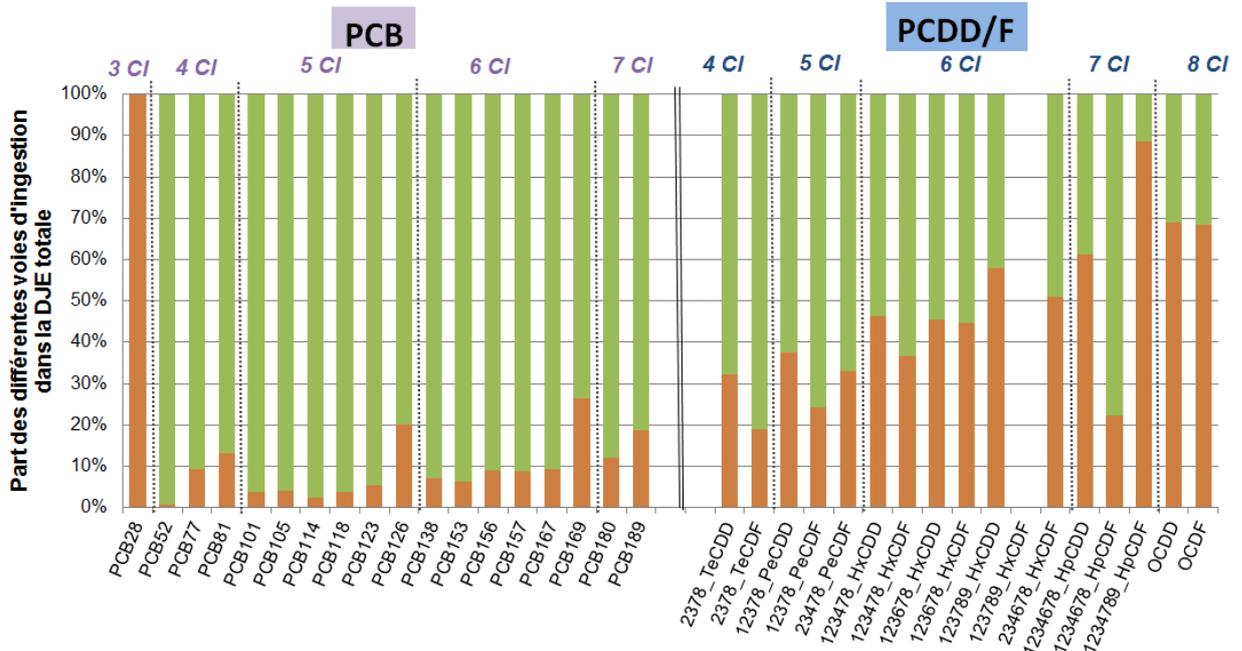
- les PCB : les PCB153, 138, 180 et 101 majoritairement observés dans les sols ;
- les PCDD/F : le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, l'OCDF, l'OCDD majoritairement observés dans les sols et le 2,3,7,8-TeCDF en raison des valeurs BCF4 parmi les plus élevés pour cette famille de composés.

Les valeurs des DJE par congénères sont renseignées en Annexe 9.

La part de l'exposition liée à l'ingestion de sol ou à l'ingestion de végétaux varie selon les congénères comme l'illustre la Figure 11 ci-dessous (classement selon l'ordre croissant du nombre de chlores par familles de substances).



a) Adulte – Exposition à un sol de maille P4



b) Enfants (1 à 3 ans) – Exposition à un sol de maille P4

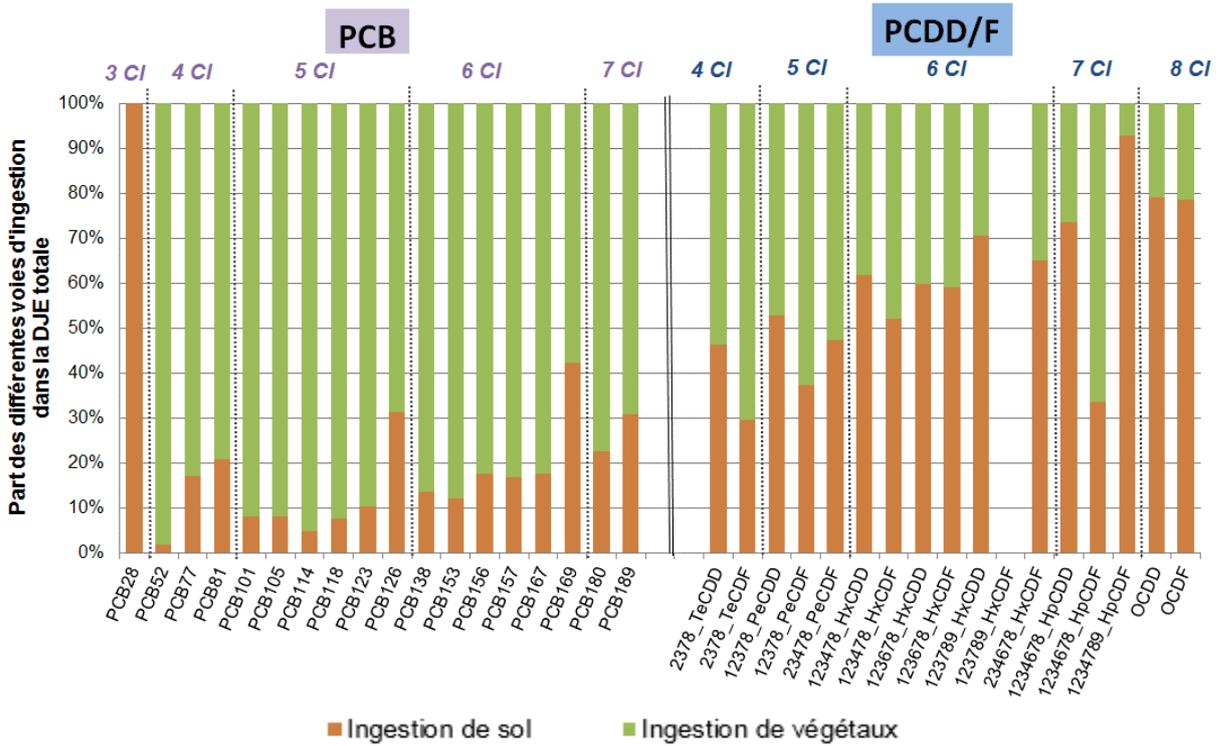


Figure 11 : Répartition de l'ingestion de sol et de l'ingestion de végétaux dans les DJE par congénères (classement des congénères selon le nombre croissant d'atomes de chlore par famille)



La part de la DJE liée à l'ingestion de végétaux dans la DJE totale est comprise :

- Pour les **PCB**,
 - pour les adultes, entre 73% (PCB 169) et 99% (PCB 52) sauf pour le PCB28 qui ne dispose pas de valeur expérimental BCF4 pour le transfert sol-végétaux ;
 - pour les enfants, entre 58% (PCB 169) et 98% (PCB 52) sauf pour le PCB28 ;
- Pour les **PCDD/F**,
 - pour les adultes, entre 12% (1,2,3,4,7,8,9-HpCDF) et 81% (2,3,7,8-TeCDF) ;
 - pour les enfants, entre 7% (1,2,3,4,7,8,9-HpCDF) et 70% (2,3,7,8-TeCDF).

L'apport en PCB est majoritairement lié à l'ingestion des végétaux, alors que pour les PCDD/F, l'apport par les végétaux est moindre face à l'apport par le sol, en raison de facteurs de transfert sol-plantes plus faibles (cf. 2.2.3).

La part attribuable à l'ingestion de sol dans la DJE totale est plus grande pour les enfants de 1 à 3 ans que pour les adultes, que ce soit pour les PCB ou les PCDD/F, en raison des quantités de sol ingérées définies pour ces classes d'âge (91 mg/j pour les enfants de moins de 6 ans, 50 mg/j pour les adultes).

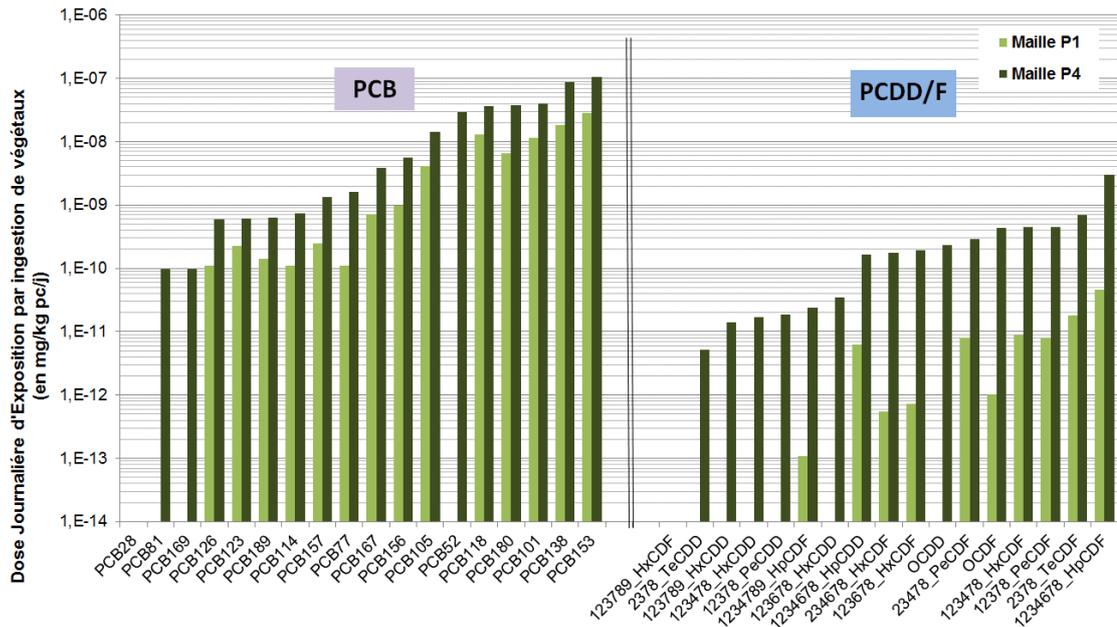
3.1.2 Focus sur l'exposition par ingestion de végétaux

3.1.2.1 Par congénères

La Figure 12 représente les DJE par congénères liées à l'ingestion de végétaux cultivés sur les mailles P1 et P4, et ce pour les adultes et les enfants de 1 à 3 ans.



a) Adulte



b) Enfants (1 à 3 ans)

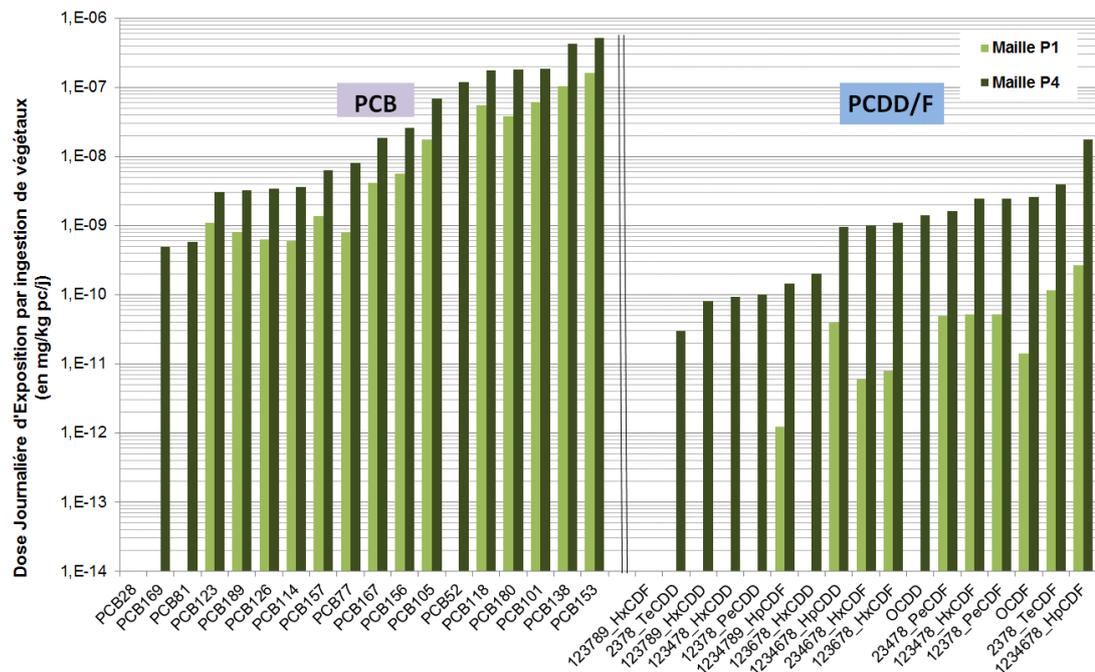


Figure 12 : DJE par congénère liées à l'ingestion de végétaux cultivés sur les mailles P1 et P4 – échelle logarithmique - (classement des congénères selon les DJE croissantes pour un sol P4)

Les DJE liées à l'ingestion de végétaux sont plus élevées pour une culture sur P4 que sur P1 comme vu précédemment, et ce pour l'ensemble des congénères, pour les adultes et les enfants.



Le classement entre les congénères dans la DJE liée à l'ingestion de végétaux change quelque peu :

- entre une exposition à une maille P1 ou une exposition à une maille P4, que ce soit pour les enfants ou les adultes ;
- entre les classes d'âge adulte et enfant de par la variabilité du « bol alimentaire » des végétaux ingérés par les adultes et les enfants.

Les congénères qui tirent le plus l'exposition par ingestion de végétaux, pour les adultes et les enfants, sont :

- les PCB : en raison de leurs fortes concentrations dans les deux sols, les PCB153, 138, 101, 180 (ou 118 pour P1 en raison de BCF4 plus élevés) ;
- les PCDD/F : le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, le 2,3,7,8-TeCDF puis le 1,2,3,7,8-PeCDF, l'OCDF et le 1,2,3,4,7,8-HxCDF (ordre qui varie entre adultes et enfants dû au bol alimentaire) en raison de leurs concentrations dans les sols mais aussi de la valeur des BCF qui modifie le classement (par rapport aux congénères tirant les concentrations dans les sols, cf. paragraphe I.2.1).

Pour les sols P1 et P4, les DJE pour le 1,2,3,7,8,9-HxCDF sont nulles car il n'a été quantifié dans aucun des deux sols.

Pour le sol P1, les valeurs de DJE sont nulles pour les PCB28, PCB52, PCB81, PCB169 et les congénères 2,3,7,8-TeCDD, 1,2,3,7,8-PeCDD, 1,2,3,4,7,8-HxCDD, 1,2,3,6,7,8-HxCDD, 1,2,3,7,8,9-HxCDD, en raison de leur non quantification dans ce sol.

Les DJE pour le PCB28 sont nulles pour P4 car aucun transfert sol-végétaux n'a été montré expérimentalement (concentrations dans les végétaux voire dans les sols inférieures à la LQ). Aucune valeur BCF n'est proposée en première approche.

La DJE pour l'OCDD est nulle pour une exposition à P1, car aucun transfert sol-végétaux n'a été montré expérimentalement (concentrations dans les végétaux inférieures à la LQ). Aucune valeur BCF n'est proposée en première approche.

Il également à noter que l'ordre des congénères sur l'axe des abscisses est modifié par rapport à l'ingestion totale à la Figure 11 de par l'influence de l'ingestion de sol.

Les valeurs des DJE par congénères pour une ingestion de végétaux cultivés sur des sols P1 et P4 sont renseignés en Annexe 10.

3.1.2.2 Par végétaux

Suite à ces observations, il s'agit ici de faire un focus sur la part de chaque végétal dans la DJE par ingestion de végétaux et ce, pour chacun des congénères. Les graphes au Tableau 13 et au Tableau 24 représentent les contributions spécifiques de chaque végétal, pour chaque congénère, dans la DJE liée à l'ingestion de végétaux et ce, pour des adultes consommant des végétaux cultivés sur un sol de maille P4 (concentrations les plus élevées en POPs).



Tableau 13 : Part des différents végétaux dans les DJE adulte, liée à l'ingestion de végétaux cultivés sur un sol de maille P4 (en %) – Cas des PCB

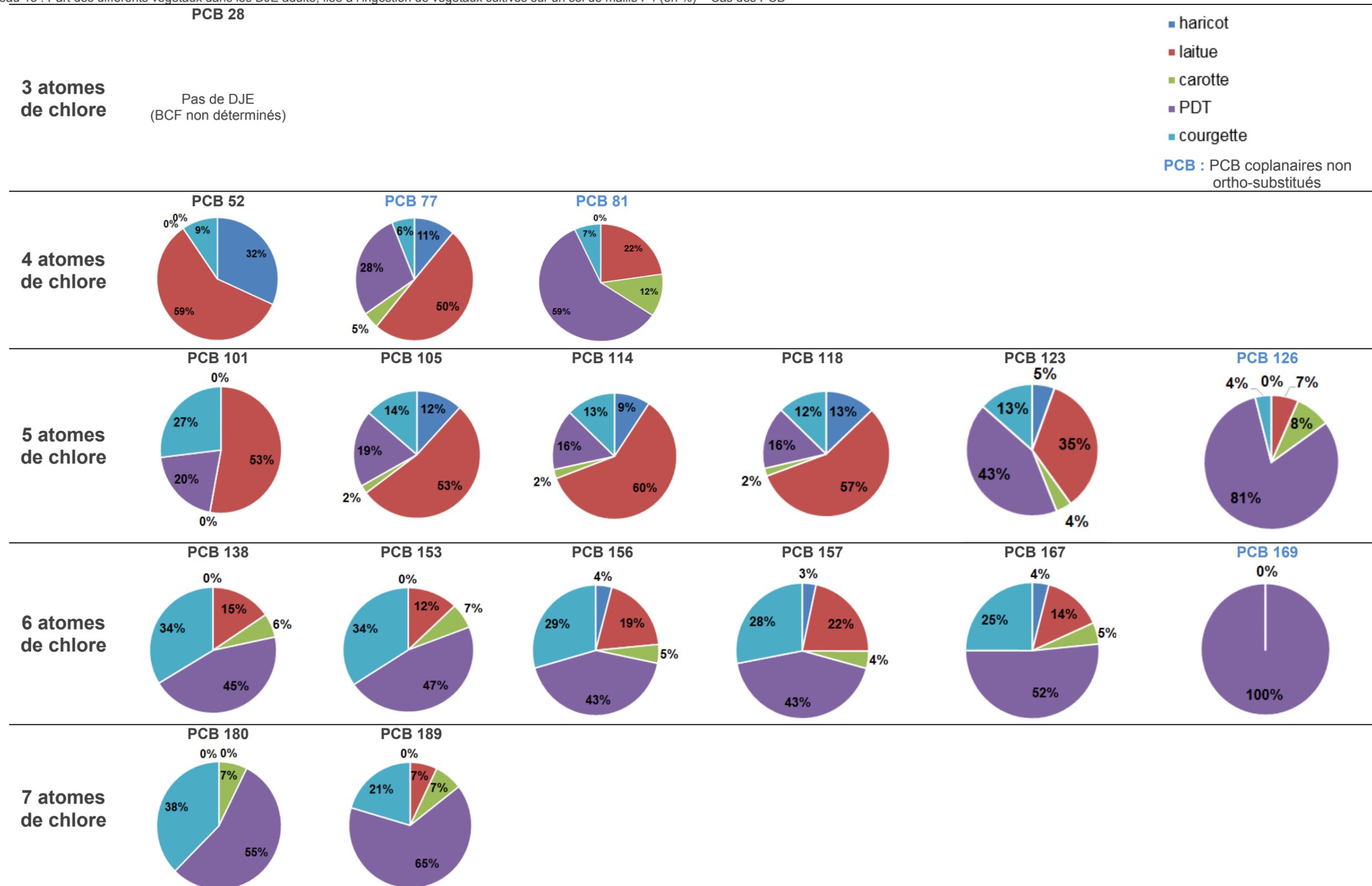
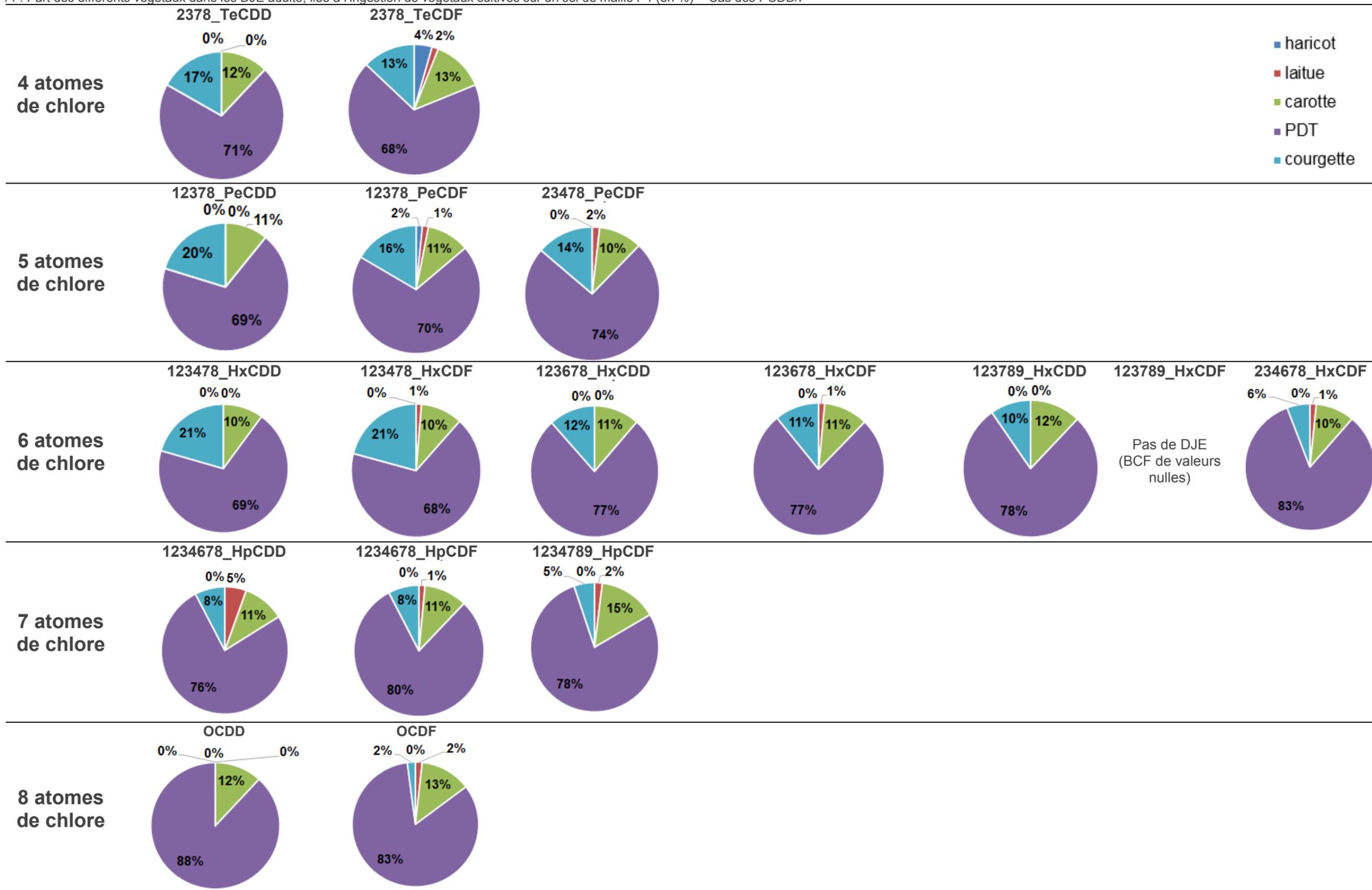


Tableau 14 : Part des différents végétaux dans les DJE adulte, liée à l'ingestion de végétaux cultivés sur un sol de maille P4 (en %) – Cas des PCDD/F



- haricot
- laitue
- carotte
- PDT
- courgette

Pour rappel, le bol alimentaire se rapportant à l'autoproduction et aux dons de végétaux pour un adulte dont le foyer possède un potager, se répartit entre les différentes catégories de végétaux tel qu'illustré à la Figure 13.

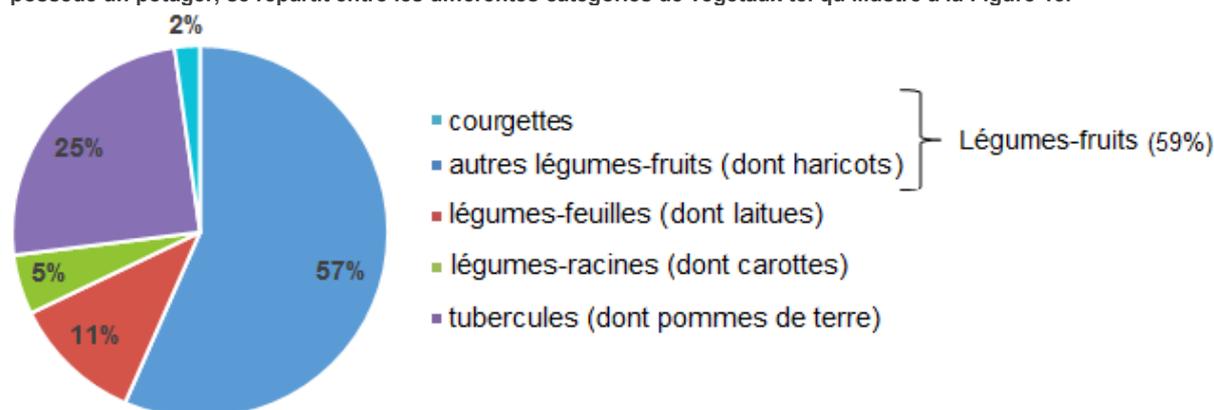


Figure 13 : Bol alimentaire pour un adulte issu d'un foyer possédant un potager (autoproduction et dons) – Part des catégories végétales (espèce végétale représentante) dans l'ingestion journalière de végétaux modélisée

La répartition des catégories de végétaux dans le bol alimentaire est différente des répartitions obtenues en termes de DJE pour les différents congénères.

Pour une même population (cas des adultes par exemple), la répartition des catégories de végétaux dans un bol alimentaire fixe est différente des répartitions obtenues entre espèces végétales pour les DJE par congénères, que ce soit pour les PCB et pour les PCDD/F.

Cas des PCB :

Avec le nombre croissant d'atomes de chlore pour les congénères :

- La contribution de la laitue (légumes-feuilles) dans l'exposition de l'adulte diminue, passant de 50-60% pour les PCB à 4-5 atomes de chlore, à 12-22% pour les PCB à 6 atomes de chlore, puis à un maximum de 7% pour les PCB à 7 atomes de chlore ;
- La contribution pour la courgette augmente, passant de 7-9% pour les PCB à 4 atomes de chlore, à 12-27% pour les PCB à 5 atomes de chlore, puis à 21-38% pour les PCB à 6-7 atomes de chlore ;
- La contribution pour la pomme de terre (tubercules) augmente, passant de 16-20% pour les PCB à 5 atomes de chlore (sauf pour le PCB123), à 43-52% pour les PCB à 6 atomes de chlore, puis à 55-65% pour les PCB à 7 atomes de chlore ;
- La contribution pour la carotte (légumes-racines) reste stable quel que soit le nombre d'atomes de chlore (de 2 à 8%) ;
- Les haricots contribuent plus rarement (absence de BCF pour plusieurs congénères). La contribution semble diminuer, passant de 32% pour les PCB à 3 atomes de chlore, à 5-12% pour les PCB à 4 atomes de chlore, puis à moins de 5 % pour les PCB à 6 atomes de chlore.

Ces constats ne s'appliquent pas aux PCB coplanaires non ortho-substitués (PCB77/81/126/169) pour lesquels les tubercules contribuent davantage à l'exposition.

La laitue présente la plus forte baisse dans la contribution aux différents congénères, avec le nombre croissant d'atomes de chlore (de 60 à 7%). Cela peut notamment s'expliquer par l'importance du transfert gazeux observé sur les PCB faiblement chlorés. En effet, la mise en culture en 2015 de laitues sur des solutions nutritives, supprimant la voie de transfert racinaire, a mis en évidence une accumulation des PCB dans les feuilles via les échanges gazeux dans l'enceinte de culture (cf. chapitre IV du livrable TROPHÉ n°2). Il a ainsi été mis en évidence que pour les PCB faiblement chlorés (\leq PCB 101), les échanges gazeux sont prédominants sur le transfert racinaire. Au-delà du PCB 101, le transfert de polluants s'exerce majoritairement par voie racinaire avec des concentrations dans les feuilles dépendantes des concentrations dans les sols. La tendance s'accroît pour les PCB fortement chlorés (6 et 7 atomes de chlore).

Cas des PCDD/F :

Pour les PCDD/F, le constat est différent. La contribution des différents végétaux est semblable quel que soit le congénère PCDD/F, excepté pour la courgette pour laquelle le degré de chloration a une influence.

La répartition des contributions, pour un bol alimentaire adulte, entre les espèces végétales est la suivante (selon un ordre décroissant) :

- La contribution de la pomme de terre (tubercules) est comprise entre 68 et 88%, toujours majoritaire par rapport aux autres végétaux ;
- La contribution de la carotte est de l'ordre de 10 à 15% ;
- La contribution de la courgette varie, quant à elle, entre 5 et 21% (contribution la plus élevée pour les substances les moins chlorées ; avec une diminution de plus de la moitié pour les congénères à 7 atomes de chlore. Leur contribution est quasi-inexistante pour les congénères à 8 atomes de chlore) ;
- La contribution de la laitue est de l'ordre de 1 à 5 % ;
- La contribution des haricots, rare, est comprise entre 2 et 4%.

Les organes souterrains (carotte et pomme de terre) ont, quant à eux, une contribution très élevée, pour l'ensemble des congénères, toujours comprise entre 80 et 100%.

3.2 Risques Sanitaires

3.2.1 Quotient de Danger

Les Quotients de Danger (QD), indicateurs de risque pour des effets à seuil, sont synthétisés au Tableau 15 et au Tableau 16 respectivement pour les PCB-ndl et la somme des PCDD/F et PCB-dl.

Tableau 15 : Quotient de Danger (QD) pour les PCB-ndl liés à l'ingestion, pour une exposition aux sols issus des mailles P1 et P4

PCB-ndl	Classes d'âge (en années)						
	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 11	11 - 15	15 - 18	18 - 70
QD lié à l'ingestion de sol							
Maille P1	4,0E-03	2,5E-03	1,7E-03	5,8E-04	3,5E-04	2,8E-04	2,4E-04
Maille P4	3,4E-02	2,1E-02	1,5E-02	5,0E-03	3,0E-03	2,4E-03	2,1E-03
QD lié à l'ingestion de végétaux							
Maille P1	2,6E-02	3,6E-02	1,5E-02	9,8E-03	7,2E-03	6,0E-03	6,5E-03
Maille P4	1,2E-01	1,4E-01	6,8E-02	4,4E-02	3,1E-02	2,6E-02	3,0E-02
QD lié à l'ingestion de sol et de végétaux							
Maille P1	3,0E-02	3,9E-02	1,7E-02	1,0E-02	7,6E-03	6,3E-03	6,7E-03
Maille P4	1,6E-01	1,6E-01	8,3E-02	4,9E-02	3,4E-02	2,8E-02	3,2E-02

QD supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets à seuil :

 QD > 1



Tableau 16 : Quotient de Danger (QD) liés à l'ingestion, pour une exposition aux sols issus des mailles P1 et P4

PCDD/F et PCB-DL	Classes d'âge (en années)						
	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 11	11 - 15	15 - 18	18 - 70
QD lié à l'ingestion de sol							
Maille P1	4,2E-02	2,6E-02	1,8E-02	6,2E-03	3,7E-03	2,9E-03	2,5E-03
Maille P4	4,1E+00	2,5E+00	1,8E+00	6,0E-01	3,6E-01	2,9E-01	2,5E-01
QD lié à l'ingestion de végétaux							
Maille P1	1,1E-01	1,5E-01	7,3E-02	4,5E-02	3,4E-02	2,8E-02	2,5E-02
Maille P4	2,4E+00	3,0E+00	1,5E+00	9,5E-01	7,1E-01	5,8E-01	5,4E-01
QD lié à l'ingestion de sol et de végétaux							
Maille P1	1,5E-01	1,7E-01	9,1E-02	5,1E-02	3,8E-02	3,1E-02	2,8E-02
Maille P4	6,5E+00	5,6E+00	3,3E+00	1,5E+00	1,1E+00	8,7E-01	7,9E-01

QD supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets à seuil : QD > 1

Les QD sont plus élevés :

- Comme attendu, pour une exposition à un sol issu de la maille P4 par rapport à un sol issu de la maille P1, en raison des concentrations plus élevées en PCB et PCDD/F dans la maille P4 ;
- Pour les PCDD/F et PCB-dl, par rapport aux PCB-ndl (1 à 2 ordres de grandeur) ;
- Pour les enfants de moins de 1 an et entre 1 et 3 ans.

D'après les critères d'acceptabilité conventionnellement admis pour la démarche de l'EQRS (cf. paragraphe II.2.2.3) :

- Pour le sol P1, les quotients de danger calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité, pour les usages retenus (ingestion de sol et de végétaux), que ce soit pour les PCB-ndl ou les PCDD/F + PCB-dl et ce, pour toutes les classes d'âge ;
- Pour le sol P4,
 - pour les PCB-ndl, les quotients de danger calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité, pour les deux usages (ingestion de sol et de végétaux) et ce toutes les classes d'âge ;
 - pour les PCDD/F + PCB-dl, les quotients de danger calculés sont supérieurs au critère d'acceptabilité, pour les enfants de moins de 15 ans pour une ingestion combinée de sol et de végétaux.

Pour les PCB-ndl, la contribution de l'ingestion des végétaux au risque est plus élevée que pour l'ingestion de sol, comme illustré à la Figure 14. Les substances tirant le risque parmi les PCB-ndl sont le PCB153 et dans une moindre mesure le PCB138, tous deux fortement présents dans les sols.

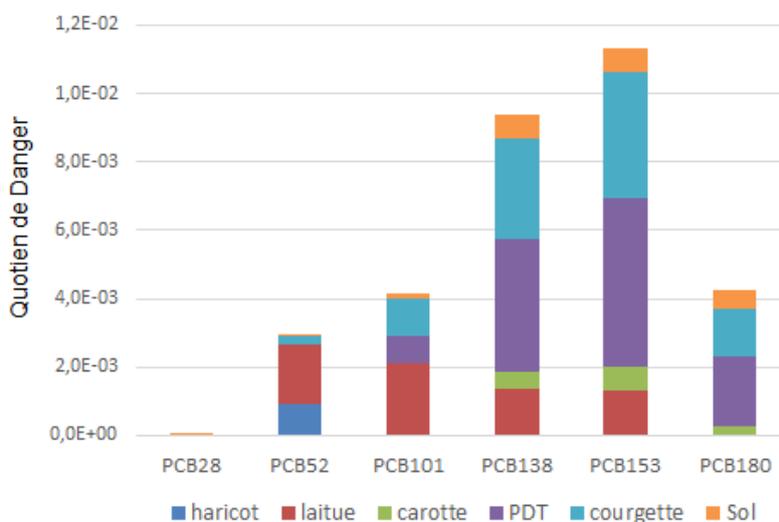


Figure 14 : Quotient de Danger (QD) en fonction des espèces végétales ingérées, selon le nombre croissant d'atomes de chlore pour les PCB-ndl – Cas des adultes exposés à un sol P4



Pour les PCDD/F, le constat est plus modéré puisque le sol contribue de manière plus conséquente au risque à seuil, comme illustré à la Figure 15. La 2,3,4,7,8-PeCDF puis la 2,3,7,8-TCDF tire le risque pour les PCDD/F. Les congénères qui tirent le risque ne sont pas les mêmes que ceux qui tiraient l'exposition en raison de la prise en compte des TEF pour le calcul des risques (valeurs TEF de 0,3 et 0,1 respectivement, pour une gamme de valeurs de TEF allant de 0,00003 à 1 ; cf. paragraphe I.3.2.3 suivant).

Quant aux PCB-ndl, un seul PCB - le PCB126 – tire le risque, se classant après les deux furannes faiblement chlorées 2,3,4,7,8-PeCDF et 2,3,7,8-TCDF citées précédemment. Moyennement présent dans le sol, avec un transfert modéré dans les végétaux et donc une exposition modérée, le risque lié au PCB126 se démarque du risque lié aux autres PCB-dl par la valeur de son facteur TEF (0,1) par rapport à celles des autres PCB-dl (TEF compris entre 0,00003 et 0,03).

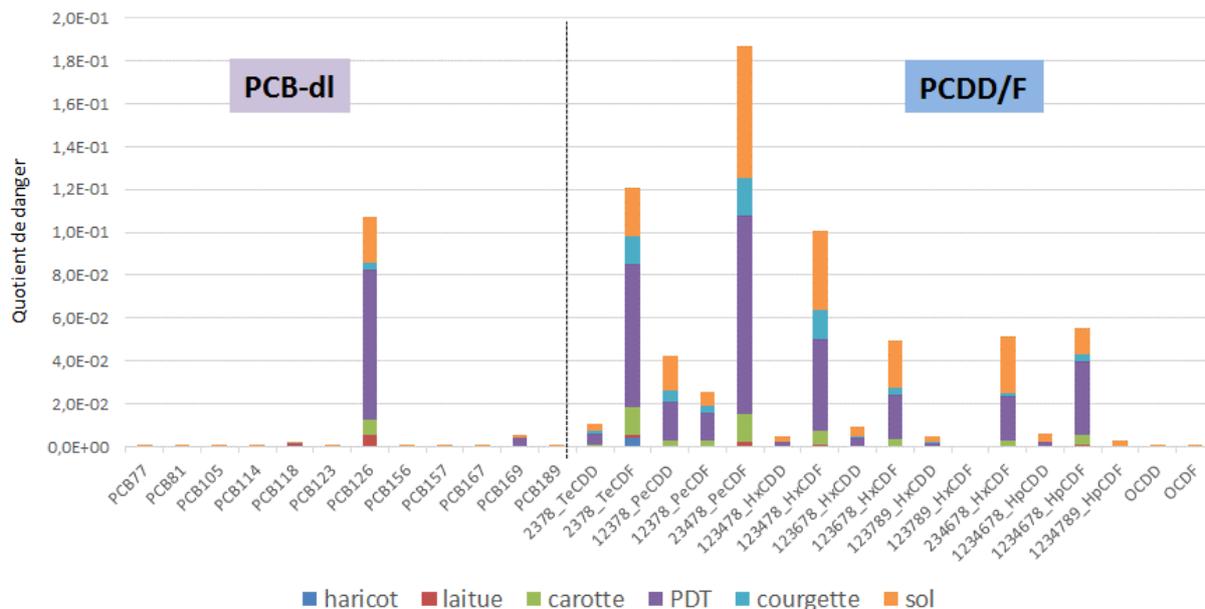


Figure 15 : Quotient de Danger (QD) en fonction des espèces végétales ingérées, selon le nombre croissant d'atomes de chlore pour les PCB-dl et les PCDD/F – Cas des adultes exposés à un sol P4

3.2.2 Excès de Risque Individuel

Des Excès de Risque Individuel (ERI), indicateurs de risque pour des effets sans seuil, sont calculés pour les adultes et pour les enfants de 1 à 3 ans (classe d'âge d'enfants la plus exposée³⁰).

Les Excès de Risque Individuel (ERI), sont résumés au Tableau 17 pour les PCB-ndl (pas de VTR à effet sans seuil pour les PCDD/F et PCB-dl, cf. annexe 7).

³⁰ Pour le calcul de l'ERI, pour les enfants de 1 à 3 ans, le début de l'exposition débute au 1 an de l'enfant, pour une durée d'exposition de 2 ans (soit jusqu'au 3 ans de l'enfant). L'exposition est pondérée sur la vie entière, soit sur 70 ans.



Tableau 17 : ERI liés aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour différentes classes d'âge

	Classes d'âge (en années)	
	Enfant (1 – 3)	Adulte (18 – 70)
<i>ERI lié à l'ingestion non intentionnelle de sol</i>		
Maille P1	1,4E-09	3,6E-09
Maille P4	1,2E-08	3,1E-08
<i>ERI lié à l'ingestion de végétaux</i>		
Maille P1	1,3E-08	9,5E-08
Maille P4	5,1E-08	4,4E-07
<i>ERI lié à l'ingestion de sol et de végétaux</i>		
Maille P1	1,5E-08	9,9E-08
Maille P4	6,3E-08	4,7E-07

ERI supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets sans seuil : ERI > 1,0E-05

D'après les critères d'acceptabilité conventionnellement admis pour la démarche de l'EQRS (cf. paragraphe II.2.2.3), les excès de risque individuel calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité, pour les différents usages (ingestion de sol et de végétaux), pour les enfants de 1 à 3 ans et les adultes, que ce soit pour une exposition à P1 ou à P4.

Les ERI sont logiquement plus élevés pour la maille P4 que pour la maille P1 (au regard du gradient de concentrations en PCB-ndl), pour les adultes et les enfants de 1 à 3 ans :

- d'un facteur 9 environ pour l'ingestion de sol ;
- d'un facteur 4 pour l'ingestion de végétaux ;
- d'un facteur 4 pour l'ingestion globale.

L'ERI lié à l'ingestion de végétaux est :

- 9 et 3 fois plus élevé que l'ERI par ingestion de sol pour une exposition à P1, respectivement pour les enfants de 1 à 3 ans et les adultes ;
- 4 et 1,5 fois plus élevé que l'ERI par ingestion de sol pour une exposition à P4, respectivement pour les enfants de 1 à 3 ans et les adultes.

3.2.3 Conséquences de l'application des facteurs d'équivalence toxique (TEF)

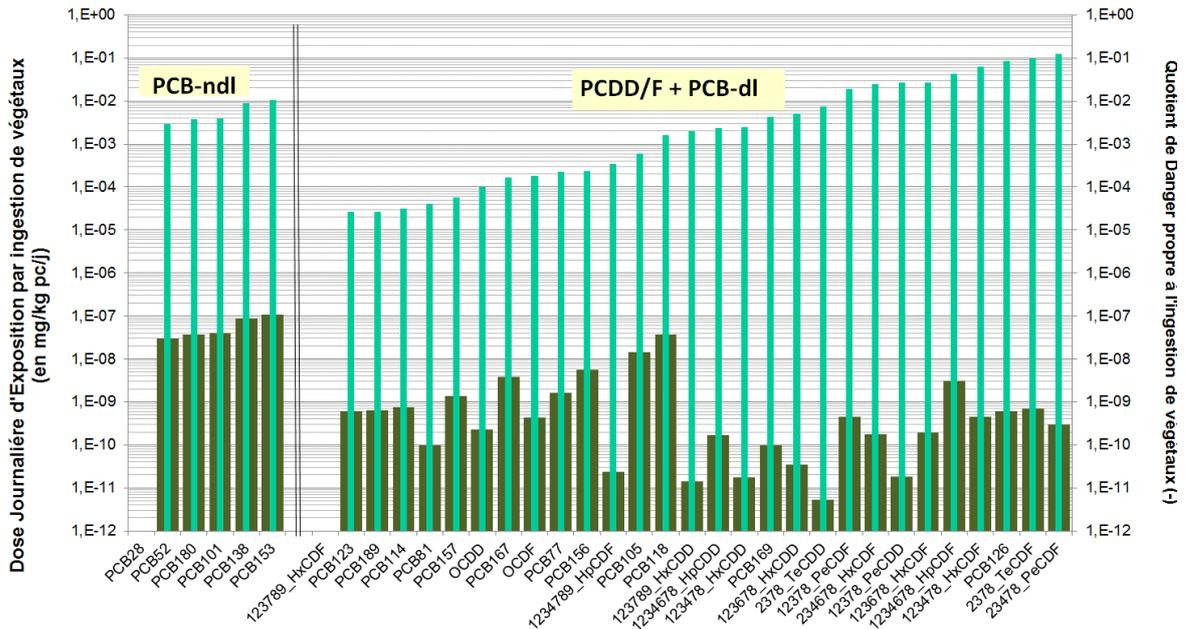
L'utilisation des TEF OMS 2005 pour passer de l'évaluation des expositions à celles des risques modifie la distribution des congénères. En effet, les congénères PCDD/F et PCB-dl qui tirent l'exposition ne sont pas forcément ceux qui tirent le risque (cf. paragraphe III.3.2.1).

A la Figure 16, comme constaté pour les PCB-ndl, les congénères qui tirent l'exposition sont les mêmes que ceux qui tirent le risque puisque la VTR à seuil est la même pour toute la famille de congénères.

Pour les PCDD/F et les PCB-dl, ce n'est pas le cas à cause de la pondération créée par l'application des facteurs TEF OMS 2005 entre le calcul des expositions et celui des risques sanitaires (pour les adultes et les enfants de 1 à 3 ans).



a) Adulte - Exposition à des végétaux cultivés sur un sol de maille P4



b) Enfants (1 à 3 ans) – Exposition à des végétaux cultivés sur un sol de maille P4

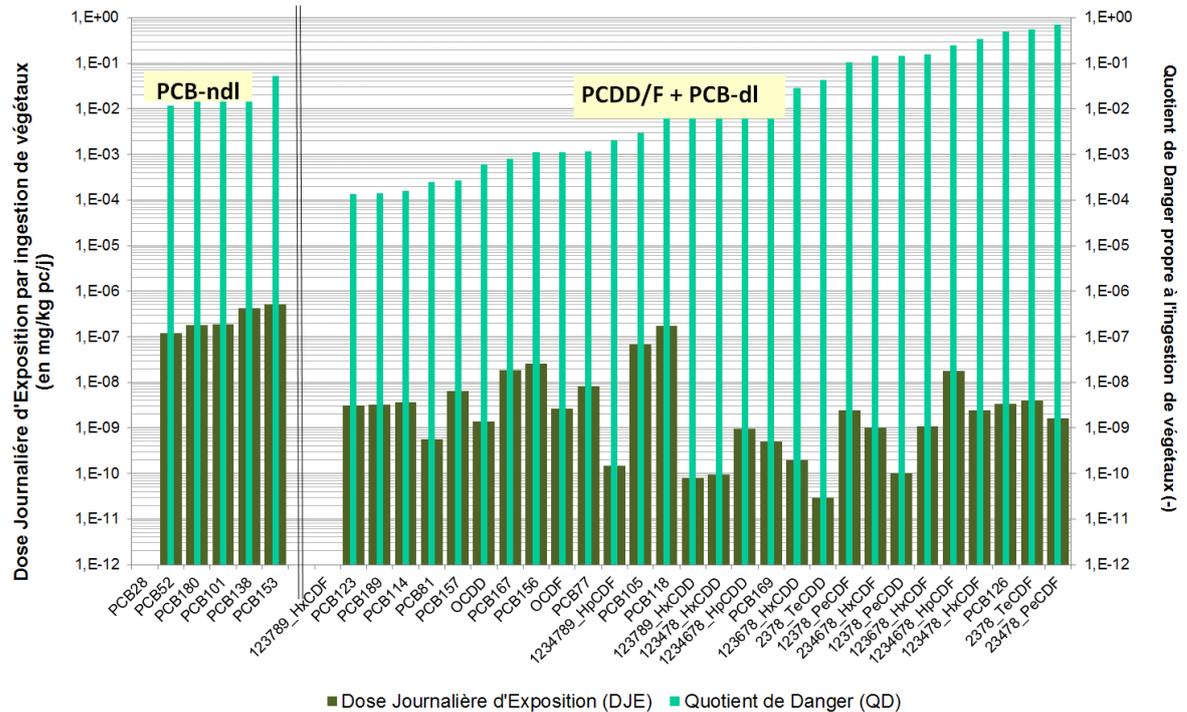


Figure 16 : DJE et QD liés à l'ingestion de végétaux potagers cultivés sur un sol P4, pour les adultes, et les enfants de 1 à 3 ans – échelle logarithmique – Tri selon l'ordre croissant des QD

Remarque : seule la place du PCB156 varie entre les risques sanitaires de l'adulte (11^{ème} position pour les PCDD/F) et ceux de l'enfant (9^{ème} position), en suivant un ordre croissant des valeurs de QD.

D'après la Figure 16, les PCB-dl présentent des DJE plus élevées que les PCDD/F et tirent l'exposition (PCB118/105/156). Cependant ce sont les PCDD/F+ PCB-dl qui présentent des risques sanitaires plus élevés que les PCB-ndl. L'ordre des substances parmi les PCDD/F + PCB-dl est modifié et ce sont la 2,3,4,7,8-PeCDF et la 2,3,7,8-TeCDF qui tirent le risque suivies du PCB126, en raison de valeurs TEF comprises entre 0,1 et 0,3 (pour une gamme de valeurs de TEF allant de 0,00003 à 1).



4. Synthèse tabulaire des résultats

Les résultats suivants, obtenus tout au long du déroulement de la démarche d'évaluation des expositions et des risques et ce, pour l'ensemble des congénères et des familles de substances, ont été repris et classés selon :

- Les concentrations dans le sol (*ordre croissant* des valeurs) ;
- Les transferts sol-végétaux, d'après les BCF calculées pour les cinq espèces végétales investiguées ;
- L'exposition liée à l'ingestion de végétaux, d'après les DJE calculées pour une population fictive définie dans le cadre du projet ;
- La toxicité des substances, d'après les VTR et le système de TEF ;
- Les risques sanitaires, d'après les QD calculés pour une exposition à l'ingestion de végétaux potagers cultivés sur un sol défini.

La synthèse des résultats pour le cas de l'exposition d'enfants de 1 à 3 ans à l'ingestion de végétaux potagers cultivés sur un sol issu de la maille P4 est reprise dans ce paragraphe. Le gradient de couleurs affecté aux résultats est décrit ci-dessous au Tableau 18, avec les valeurs minimales et maximales prises pour chaque classe.

Tableau 18 : Classes et codes couleur attribués aux résultats intermédiaires et finaux de la démarche d'évaluation des risques et des expositions (cas des enfants de 1 à 3 ans, exposés via l'ingestion de végétaux cultivés sur un sol de maille P4).

Code Couleur		Classification des résultats, selon un ordre croissant										
		Bornes des classes		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Concentration dans le sol P4		3,5E-06*		1,6E-05	5,0E-05	1,7E-04	8,2E-04	1,2E-03	7,1E-03	9,2E-03	9,7E-03	
Transfert sol / végétal - BCF 4 -	Pomme de terre	8,5E-04*		3,2E-03	9,7E-03	1,2E-02	6,3E-02	/	/	/	/	
	Carotte	/		1,9E-03	9,2E-03	1,2E-02	9,9E-02	/	/	/	/	
	Courgette	/		2,1E-03	2,9E-03	1,5E-02	8,5E-02	1,0E-01	9,1E-01	1,0E+00	4,0E+00	
	Haricot	6,2E-04*		2,4E-03	5,4E-03	1,3E-02	4,9E-02	5,5E-01*		/	/	
	Laitue	1,6E-04	9,7E-04	1,2E-03	3,4E-03	1,7E-02	9,5E-02	1,2E-01	8,4E-01	1,6E+00	5,1E+00	
Exposition liée à l'ingestion de végétaux - DJE enfant -		3,0E-11	9,3E-11	1,0E-10	9,6E-10	1,0E-09	8,1E-09	1,7E-08	6,7E-08	1,2E-07	5,2E-07	
Toxicité Orale à seuil - VTR -		4,3E+04	5,0E+04	1,4E+05	4,3E+05	1,4E+07	4,3E+07	1,4E+08	4,3E+08	1,4E+09*		
Risque à seuil lié à l'ingestion de végétaux - QD enfant -		/		1,3E-04	7,9E-04	1,1E-03	7,5E-03	1,2E-02	5,2E-02	1,1E-01	7,0E-01	

*1 seule valeur ; / : pas de valeur

Le Tableau 19 synthétise la chaîne de transfert des 35 substances étudiées depuis les sols jusqu'à l'Homme, pour le cas d'une exposition des enfants de 1 à 3 ans *via* l'ingestion de végétaux potagers cultivés sur un sol issu de la maille P4.



Tableau 19 : synthèse de la chaîne de transfert des POPs issus d'un sol de maille P4 pour une exposition des enfants de 1 à 3 ans via l'ingestion de végétaux potagers – tri selon les concentrations croissantes des POPs pour P4

Substances	Concentration dans le sol P4	Transfert sol / végétal - BCF 4 -					Exposition liée à l'ingestion de végétaux - DJE enfant -	Toxicité Orale à seuil - VTR -	Risque à seuil lié à l'ingestion de végétaux - QD enfant -
		Pomme de terre	Carotte	Courgette	Haricot	Laitue			
123789_HxCDF									
2378_TeCDD									
12378_PeCDD									
PCB81									
123478_HxCDD									
PCB114									
123789_HxCDD									
123678_HxCDD									
PCB123									
PCB169									
PCB28									
PCB157									
PCB189									
12378_PeCDF									
23478_PeCDF									
PCB126									
123678_HxCDF									
2378_TeCDF									
PCB77									
1234789_HpCDF									
234678_HxCDF									
PCB52									
123478_HxCDF									
1234678_HpCDD									
PCB167									
OCDD									
PCB156									
PCB105									
1234678_HpCDF									
OCDF									
PCB118									
PCB101									
PCB180									
PCB138									
PCB153									

PCB : PCB non dioxin-like (PCB-ndl)

 Pas de valeur calculée

Pour un enfant de 1 à 3 ans, le calcul des risques sanitaires liés à l'ingestion de végétaux cultivés sur un sol issu de la maille P4 conduit à des risques élevés pour :

- 1) Un seul PCB - le PCB126 – moyennement présent dans le sol, avec un transfert modéré dans les végétaux et donc une exposition modérée, mais disposant d'un facteur TEF élevé ;
- 2) Pour plusieurs PCDD/F, moyennement présents dans le sol, avec un transfert modéré dans les végétaux et donc une exposition modérée, mais disposant d'un facteur TEF élevé ;
- 3) La 2,3,7,8-TeCDD et le 1,2,3,7,8-PeCDD, faiblement présent dans le sol, avec un transfert modéré dans les végétaux, et donc une exposition faible, mais disposant d'un facteur TEF très élevé.

Alors que les PCB 118/101/180/138 et 153 sont les substances dont les concentrations dans le sol de maille P4 sont les plus élevées, elles ne conduisent pas à des risques sanitaires élevés. En effet, l'exposition via l'ingestion de végétaux est la plus élevée (BCF modérés voire élevés) mais au regard de leur faible toxicité, le risque sanitaire se trouve pondéré.

Le Tableau 20 présente les mêmes résultats que le Tableau 19 précédent, mais avec un classement selon le nombre croissant d'atomes de chlore des congénères par famille de substances (PCB et PCDD/F).



Tableau 20 : synthèse de la chaîne de transfert des POPs issus d'un sol de maille P4 pour une exposition des enfants de 1 à 3 ans via l'ingestion de végétaux potagers – tri selon le nombre croissant d'atomes de chlore par famille de substances

Substances	Concentration dans le sol P4	Transfert sol / végétal - BCF 4 -					Exposition liée à l'ingestion de végétaux - DJE enfant -	Toxicité Orale à seuil - VTR -	Risque à seuil lié à l'ingestion de végétaux - QD enfant -
		Pomme de terre	Carotte	Courgette	Haricot	Laitue			
PCB									
PCB28									
PCB52									
PCB77									
PCB81									
PCB101									
PCB105									
PCB114									
PCB118									
PCB123									
PCB126									
PCB138									
PCB153									
PCB156									
PCB157									
PCB167									
PCB169									
PCB180									
PCB189									
PCDD/F									
2378_TeCDD									
2378_TeCDF									
12378_PeCDD									
12378_PeCDF									
23478_PeCDF									
123478_HxCDD									
123478_HxCDF									
123678_HxCDD									
123678_HxCDF									
123789_HxCDD									
123789_HxCDF									
234678_HxCDF									
1234678_HpCDD									
1234678_HpCDF									
1234789_HpCDF									
OCDD									
OCDF									

PCB : PCB non dioxin-like (PCB-ndl)

 Pas de valeur calculée

D'après le Tableau 20, l'exposition via l'ingestion de végétaux est plus élevée pour les PCB, notamment du fait de leurs facteurs de transfert sol-végétaux plus élevés que pour les PCDD/F. Cependant, ce sont les PCDD/F qui présentent les risques sanitaires les plus élevés pour l'Homme.

Remarque : pour la construction la catégorie « Toxicité Orale à seuil », afin de pouvoir comparer la VTR des PCB-ndl avec les autres POPs, la VTR pour la somme des PCDD/F et PCB-dl a été multipliée par les facteurs TEF OMS 2005 propres à chaque congénère.



III Etude de sensibilité 1 : Influence de la quantité de sol ingérée

1. Objectifs

L'objectif est ici d'évaluer l'influence de la quantité de sol ingérée sur l'exposition et les risques sanitaires pour la population infantile, en comparaison à l'ingestion de végétaux. En effet, l'ingestion de sol non intentionnelle est une voie d'ingestion particulièrement sensible pour les jeunes enfants.

2. Paramètres testés

Le paramètre modifié est ici la quantité de sol ingéré par jour pour des enfants de 0 à 6 ans. Pour l'évaluation initiale, la valeur d'ingestion de sol choisie était volontairement protectrice (91 mg de sol ingéré par jour soit le 95^{ème} percentile de la distribution de Stanek³¹). Cette dernière est remplacée par la valeur de 24 mg de sol ingéré par jour (médiane de la distribution de Stanek). La quantité de sol ingérée est donc divisée par 4 environ.

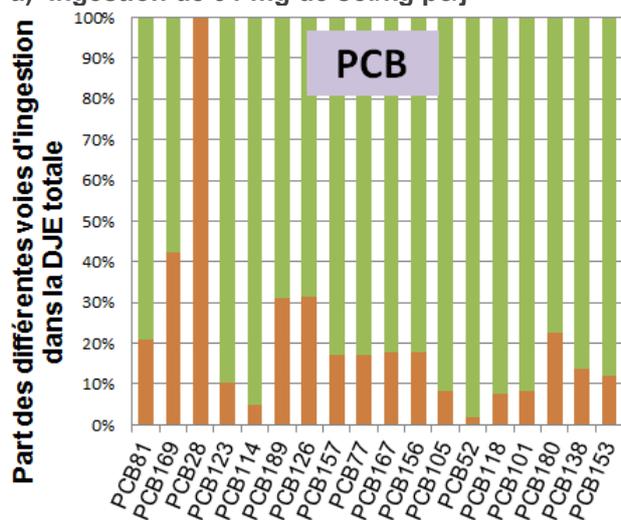
Les nouvelles valeurs d'exposition et de risque sont calculées dans le cas de l'ingestion non intentionnelle d'un sol P4 (concentrations en PCB et PCDD/F les plus élevées). Il n'y a donc pas de répercussion sur les DJE et les valeurs de risque sanitaire liés à l'ingestion de végétaux potagers.

3. Résultats

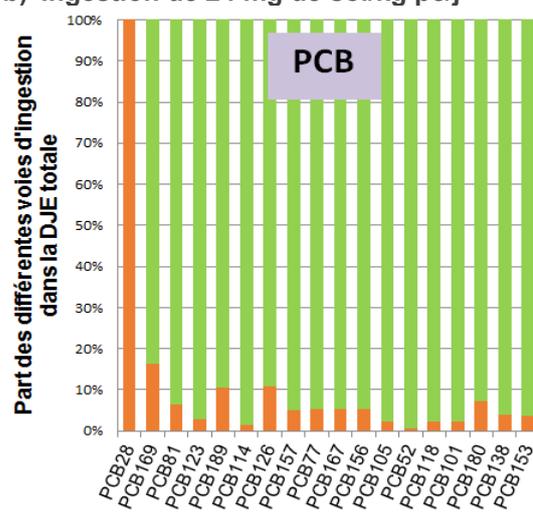
3.1 Exposition

Les graphiques à la Figure 17 illustrent la répartition de la contribution de l'ingestion de sol et de l'ingestion de végétaux dans la DJE totale en PCB et PCDD/F pour une ingestion de sol de 91 mg/j et de 24 mg/j.

a) Ingestion de 91 mg de sol/kg pc/j



b) Ingestion de 24 mg de sol/kg pc/j



³¹ InVS/INERIS, guide pratique 2012. Quantités de terre et poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants. (<http://www.ineris.fr/centredoc/guide-pratique-quantites-terre-poussieres-ingerees-bioaccessibilite-polluants-1--1348736162.pdf>)



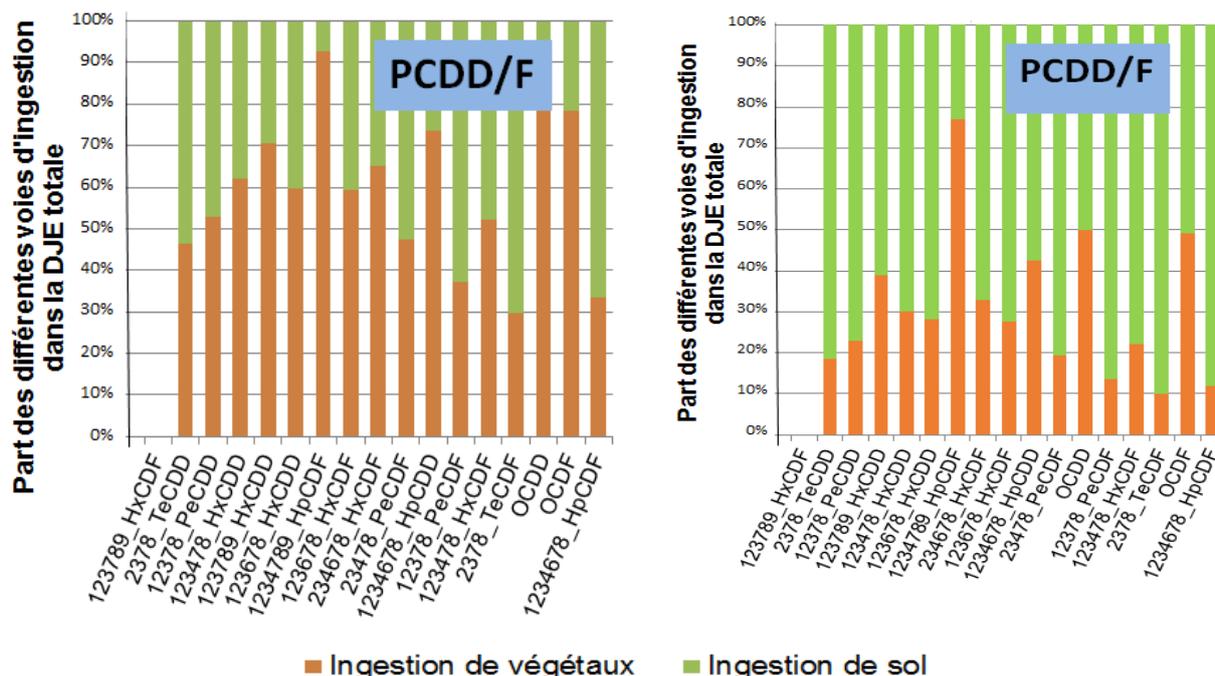


Figure 17 : Evolution de la répartition de la contribution de l'ingestion de sol et de végétaux dans l'exposition des enfants de 1 à 3 ans à un sol de maille P4 – Tri selon les DJE globales (sol et végétaux) croissantes

La diminution de la quantité de sol ingérée d'un facteur 4 baisse logiquement la contribution liée à l'ingestion de sol d'un facteur 4 et ce, pour les différents congénères. Les parts attribuables de l'exposition à la voie ingestion de sol et à la voie ingestion de végétaux sont modifiées. Cela a pour conséquence de changer le classement des congénères les plus contributeurs, au regard de la Figure 17 :

- Pour les PCB, les PCB 28/81/114/189 (inversions de position du PCB28 avec PCB 52, et du PCB114 avec le 189) ;
- Pour les PCDD/F, l'OCDD passe de la place de 3^{ème} substance contributrice à la DJE à la 6^{ème} et plusieurs inversions de positions sont observées entre le 1,2,3,7,8,9-HxCDD et le 1,2,3,4,7,8-HxCDD ; le 2,3,4,6,7,8-HxCDF et le 1,2,3,6,7,8-HxCDF ; le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et le 2,3,4,7,8-PeCDF.

Le Tableau 21 et le Tableau 22 synthétisent les Doses Journalières d'Exposition (DJE) calculées selon les quantités de sol ingérées, et les concentrations en POPs dans les sols (maille P1 ou P4 respectivement).

Tableau 21 : Dose Journalière d'Exposition pour les enfants de 1 à 3 ans liées à l'ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à un sol P1

	PCB-ndl	PCB-dl	PCDD/F	PCDD/F + PCB-dl
<i>en mg/kg pc*j</i>				
DJE par ingestion de sol (mg/kg pc*j)				
95 ^{ème} percentile – 91 mg/j	2,5E-08	2,7E-09	3,4E-10	3,0E-09
Médiane – 24 mg/j	6,5E-09	7,2E-10	9,0E-11	8,1E-10
DJE par ingestion de sol et de végétaux (mg/kg pc*j)				
95 ^{ème} percentile – 91 mg/j	3,9E-07	9,1E-08	9,5E-10	9,2E-08
Médiane – 24 mg/j	3,7E-07	8,9E-08	6,9E-10	9,0E-08

*kg pc : kilogramme de poids corporel



Tableau 22 : Dose Journalière d'Exposition pour les enfants de 1 à 3 ans liées à l'ingestion de sol et l'ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à un sol P4

	PCB-ndl	PCB-dl	PCDD/F	PCDD/F + PCB-dl
<i>en mg/kg pc*/j</i>				
DJE par ingestion de sol (mg/kg pc*/j)				
95^{ème} percentile – 91 mg/j	2,1E-07	3,7E-08	4,0E-08	1,8E-09
Médiane – 24 mg/j	5,6E-08	9,8E-09	1,0E-08	4,7E-10
DJE par ingestion de sol et de végétaux (mg/kg pc*/j)				
95^{ème} percentile – 91 mg/j	1,6E-06	3,5E-07	7,5E-08	3,9E-09
Médiane – 24 mg/j	1,5E-06	3,2E-07	4,6E-08	2,6E-09

*kg pc : kilogramme de poids corporel

En diminuant la quantité de sol ingérée d'un facteur 4, pour le cas des enfants de 1 à 3 ans, la DJE liée à l'exposition globale (sol et végétaux) diminue :

- Pour les PCB-ndl,
 - sur la maille P1, de 3,9E-07 à 3,7E-07 mg/kg pc*/j, soit une diminution de 5 % ;
 - sur la maille P4, de 1,6E-06 à 1,5E-06 mg/kg pc*/j, soit une diminution de 6 % ;
- Pour les PCB-dl,
 - sur la maille P1, de 9,1E-08 à 8,9E-08 mg/kg pc*/j, soit une diminution de 2 % ;
 - sur la maille P4, de 3,5E-07 à 3,2E-07 mg/kg pc*/j, soit une diminution de 9 % ;
- Pour les PCDD/F,
 - sur la maille P1, de 9,5E-10 à 6,9E-10 mg/kg pc*/j, soit une diminution de 32 % ;
 - sur la maille P4, de 7,5E-08 à 4,6E-08 mg/kg pc*/j, soit une diminution de 39 % .
- Pour la somme PCDD/F + PCB-dl
 - sur la maille P1, de 9,2E-08 à 9,0E-08 mg/kg pc*/j, soit une diminution de 2 % ;
 - sur la maille P4, de 4,3E-07 à 3,7E-07 mg/kg pc*/j, soit une diminution de 14 % .

La baisse de la quantité de sol ingérée présente un impact relativement faible sur la DJE pour les PCB (ndl et dl) alors qu'elle diminue d'un tiers l'exposition aux PCDD/F, en raison de la forte contribution de l'ingestion de sol pour les PCDD/F (par rapport aux PCB dont la contribution par les végétaux est plus élevée que celle par le sol).

3.2 Risques Sanitaires

3.2.1 Quotient de Danger

Le Tableau 23 et le Tableau 24 synthétisent les Quotients de Danger (QD) calculés pour des enfants de 1 à 3 ans selon les quantités de sol ingérées, et le sol (P1 ou P4 respectivement).

Tableau 23 : QD pour les enfants de 1 à 3 ans par ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à un sol P1

	PCB-ndl	PCDD/F + PCB-dl
QD par ingestion de sol		
95^{ème} percentile – 91 mg/j	2,5E-03	2,6E-02
Médiane – 24 mg/j	6,5E-04	6,9E-03
QD par ingestion de sol et de végétaux		
95^{ème} percentile – 91 mg/j	3,9E-02	1,7E-01
Médiane – 24 mg/j	3,7E-02	1,5E-01

QD supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets à seuil :

 QD > 1



Tableau 24 : QD pour les enfants de 1 à 3 ans par ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à un sol P4

	PCB-ndl	PCDD/F + PCB-dl
QD par ingestion de sol		
95 ^{ème} percentile – 91 mg/j	2,1E-02	2,5E+00
Médiane – 24 mg/j	5,6E-03	6,7E-01
QD par ingestion de sol et de végétaux		
95 ^{ème} percentile – 91 mg/j	1,6E-01	5,6E+00
Médiane – 24 mg/j	1,5E-01	3,7E+00

QD supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets à seuil : QD > 1

D'après les critères d'acceptabilité conventionnellement admis pour la démarche de l'EQRS (cf. paragraphe II.2.2.3), pour les enfants de 1 à 3 ans :

- Pour le sol P1, les quotients de danger calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité pour les usages (ingestion de sol et de végétaux) que ce soit pour les PCB-ndl ou les PCDD/F + PCB-dl ;
- Pour le sol P4,
 - pour les PCB-ndl, les quotients de danger calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité ;
 - pour les PCDD/F + PCB-dl, les quotients de danger calculés sont supérieurs au critère d'acceptabilité sauf dans le cadre de l'ingestion seule de sol sur la base de la valeur médiane de 24 mg/j.

En diminuant la quantité de sol ingérée d'un facteur 4, pour le cas des enfants de 1 à 3 ans, le **risque à seuil global** (QD global) diminue :

- Pour les PCB-ndl, de 5% pour P1 et de 6% pour P4 (mêmes proportions que pour l'exposition avec la DJE) ;
- Pour les PCDD/F + PCB-dl (en prenant en compte le système TEF OMS 2005),
 - Pour une ingestion de sol issu de la maille P1, de 1,7E-01 à 1,5E-01, soit une diminution de 12 % ;
 - Pour une ingestion de sol issu de la maille P4, de 5,6 de à 3,7, soit une diminution de 34 %.

Alors que l'exposition globale aux PCDD/F + PCB-dl diminue de 2% pour P1 et de 14% pour P4, les risques à seuil globaux diminuent de 12% pour P1 et de 32% pour P4, dû à la prise en compte des facteurs TEF.

3.2.2 Excès de Risque Unitaire

Le Tableau 25 et le Tableau 26 synthétisent les Excès de Risque Individuel (ERI) calculés pour des enfants de 1 à 3 ans, sur la vie entière, selon les quantités de sol ingérées, et le sol (P1 ou P4 respectivement).



Tableau 25 : ERI lié aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour des enfants de 1 à 3 ans, pour une exposition à un sol P1

Classes d'âge (en années)	
Enfant (1 – 3)	
ERI lié à l'ingestion de sol	
95 ^{ème} percentile – 91 mg/j	1,4E-09
Médiane – 24 mg/j	3,7E-10
ERI lié à l'ingestion de sol et de végétaux	
95 ^{ème} percentile – 91 mg/j	1,5E-08
Médiane – 24 mg/j	1,4E-08

ERI supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets sans seuil : ERI > 1,0E-05

Tableau 26 : ERI lié aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour des enfants de 1 à 3 ans, pour une exposition à un sol P4

Classes d'âge (en années)	
Enfant (1 – 3)	
ERI lié à l'ingestion de sol	
95 ^{ème} percentile – 91 mg/j	1,2E-08
Médiane – 24 mg/j	3,2E-09
ERI lié à l'ingestion de sol et de végétaux	
95 ^{ème} percentile – 91 mg/j	6,3E-08
Médiane – 24 mg/j	5,5E-08

ERI supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets sans seuil : ERI > 1,0E-05

Conformément à la démarche de l'EQRS (cf. paragraphe II.2.2.3), les excès de risque individuel calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité, pour les enfants de 1 à 3 ans pour les deux niveaux d'ingestion de sol et ce, pour P1 et P4.

En diminuant la quantité de sol ingérée d'un facteur 4, pour le cas des enfants de 1 à 3 ans, le **risque sans seuil global** (ERI global) pour les PCB-ndl diminue de 7% pour P1 et de 13% pour P4.



IV Etude de sensibilité 2 : Influence de la prise en compte des limites de quantification dans l'estimation des BCF – BCF estimés

1. Objectifs

Les BCF estimés, nommés « BCFé », sont les BCF calculés en prenant en compte les limites de quantification (LQ) des polluants dans les sols ou dans les organes consommés, à l'issue des travaux expérimentaux précédents (cf. paragraphe I.2.3 et le chapitre IV du livrable TROPHé n°2).

Cette étude consiste à évaluer l'influence de l'utilisation des BCFé par rapport aux BCF ne prenant pas en compte les LQ, sur l'exposition et les risques sanitaires, et de justifier ou non leur utilisation.

2. Paramètres testés

Les valeurs de BCFé sont estimées pour tous les réplicats ne disposant pas de BCF. La moyenne des 3 réplicats calculée (BCFé1, BCFé4) remplace la valeur moyenne (3 réplicats) de BCF précédemment employée (BCF1, BCF4).

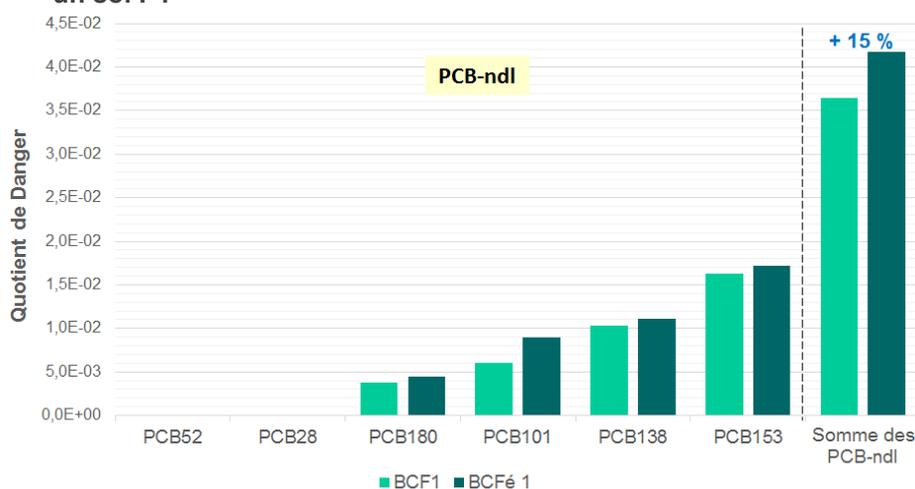
Les DJE et les risques sanitaires spécifiques à la voie d'ingestion de végétaux potagers sont calculés pour les adultes et les enfants de 1 à 3 ans et ce, pour les deux mailles de sol.

3. Résultats

Pour les **PCB-ndl**, les QD calculés pour des enfants de 1 à 3 ans pour les différents congénères pour des BCF et des BCFé sont représentés à la Figure 18 et ce, pour les deux sols.

Les graphes pour la classe d'âge « adulte » sont disponibles en annexe 11.

a) Quotient de danger pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P1



b) Quotient de danger pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P4

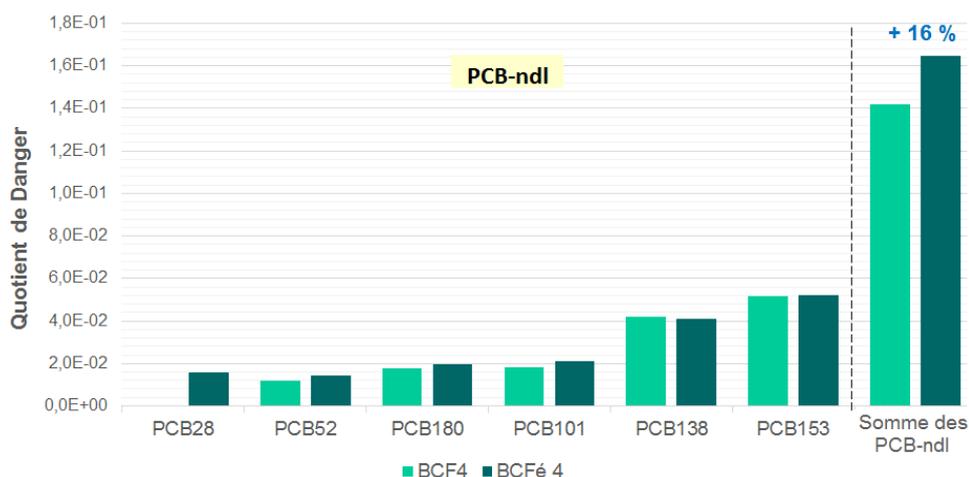


Figure 18 : Risques à seuil pour une exposition aux PCB-ndl d'enfants de 1 à 3 ans par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)

Le QD liés à l'ingestion de végétaux augmente en passant des BCF aux BCFé, comme illustré à la Figure 18 :

- de 15% pour les enfants de 1 à 3 ans pour une exposition à P1 (et de 30% pour les adultes) ;
- de 16% pour les enfants de 1 à 3 ans pour une exposition à P4 (et de 17% pour les adultes) ;

Cependant, des variations différentes sont constatés selon les congénères PCB-ndl :

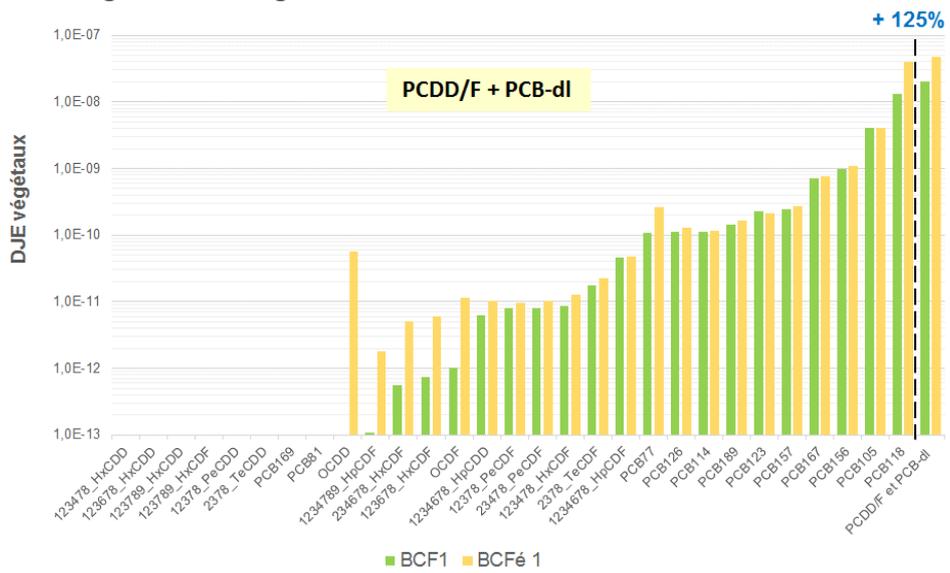
- Augmentation de 5 % à 49% pour les enfants 1 à 3 ans pour une exposition à P1 (et de 15 à 65 % pour les adultes) ;
- Diminution de -2 % jusqu'à une augmentation de 21% pour les enfants 1 à 3 ans pour une exposition à P4 (augmentation de 1 à 15% pour les adultes).

Remarque : Les variations sont similaires pour les DJE pour les PCB-ndl (application de la même VTR aux DJE des PCB-ndl pour le calcul des QD).

Pour les **PCDD/F + PCB-dl**, les DJE et les QD calculés pour les enfants de 1 à 3 ans pour les différents congénères pour des BCF et des BCFé sont représentés respectivement à la Figure 19 et à la Figure 20 et ce, pour les deux sols.

Les graphes pour la classe d'âge « adulte » sont disponibles en annexe 11.

a) Dose Journalière d'Exposition (DJE, en mg/kg pc/j) pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P1



b) Dose Journalière d'Exposition (DJE, en mg/kg pc/j) pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P4

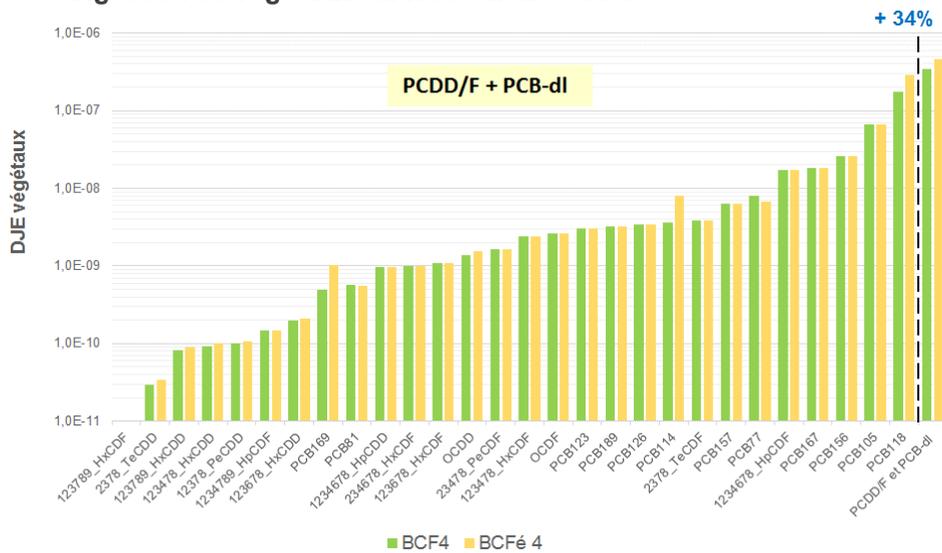
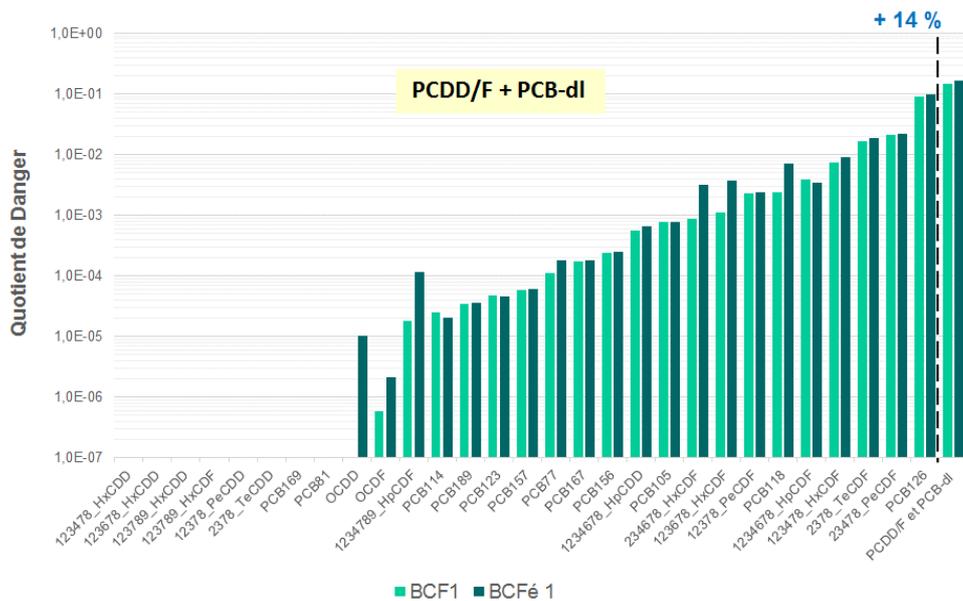


Figure 19 : Exposition aux PCDD/F d'enfants de 1 à 3 ans par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)



a) Quotient de danger pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P1



b) Quotient de danger pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P4

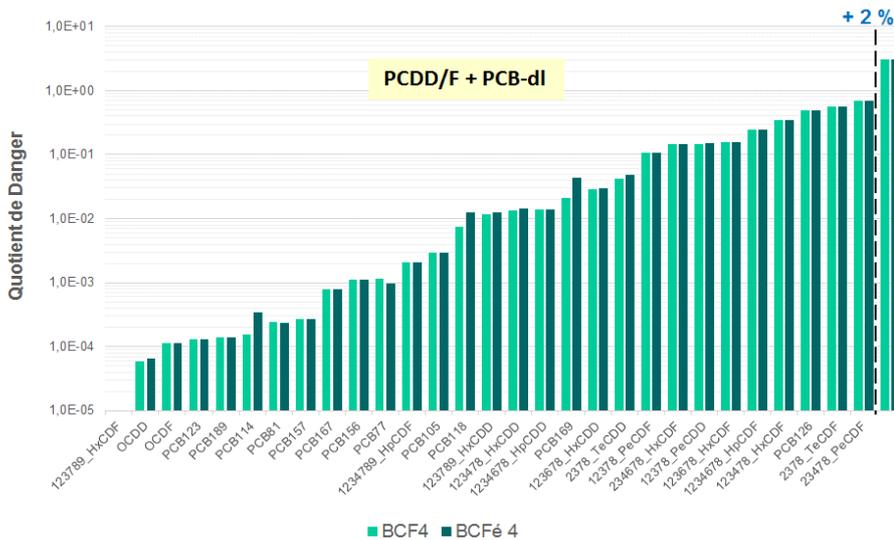


Figure 20 : Risques à seuil pour une exposition aux PCDD/F d'enfants de 1 à 3 ans par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)

Le passage des BCF aux BCFé augmente les DJE et les QD pour les PCDD/F+PCB-dl pour les enfants, sauf pour quelques substances (le PCB123, le PCB114 et le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF pour P1 et le PCB 77, le PCB81 et le PCB189 pour P4). Cela est dû au fait que les BCF et les BCFé sont des moyennes sur 3 réplicats.

Les DJE sommées pour l'ensemble des PCDD/F+PCB-dl, liées à l'ingestion de végétaux, augmente en passant des BCF aux BCFé, comme illustré à la Figure 19 :

- de 125% pour les enfants de 1 à 3 ans pour une exposition à P1 (et de 136% pour les adultes);
- de 34% pour les enfants de 1 à 3 ans pour une exposition à P4 (et de 35% pour les adultes).

Cependant, l'augmentation de la DJE est très variable selon les congénères PCDD/F et PCB-dl, pouvant ainsi être :

- Diminution de -18% jusqu'à une augmentation de 543 % pour les enfants 1 à 3 ans pour une exposition à P1 (et de -4% à 1 571% pour les adultes) ;
- Diminution de -16 % jusqu'à une augmentation de 121% pour les enfants 1 à 3 ans pour une exposition à P4 (Diminution de -15% à jusqu'à augmentation de 102% pour les adultes).



Les variations pour chaque substance, entre l'utilisation du BCF et du BCFé, sont les mêmes pour les QD. Mais les écarts sur le QD de la somme des PCDD/F+PCB-dl sont différents des écarts constatés pour la DJE, en raison de l'application de facteurs TEF qui pondèrent les risques.

Les QD sommés pour l'ensemble des PCDD/F+PCB-dl, liés à l'ingestion de végétaux, augmente en passant des BCF aux BCFé, comme illustré à la Figure 20 :

- de 14% pour les enfants de 1 à 3 ans pour une exposition à P1 (et de 29% pour les adultes) ;
- de 2% pour les enfants de 1 à 3 ans pour une exposition à P4 (et de 3% pour les adultes) ;

Les écarts entre les résultats obtenus avec les BCF et les BCFé sont plus grands pour une exposition pour P1 que pour P4.

Pour le sol P1, une telle variation de résultats en utilisant les BCFé à la place des BCF s'explique par le nombre de valeurs nulles de BCF remplacées par des BCF estimés à LQ/2, ce qui augmente le nombre de transferts sol-végétaux pris en compte. En effet, pour 79 valeurs de BCF (sur 35 congénères pour 5 espèces végétales, soit sur 175 substances évalués), la prise en compte des LQ, dès lors que les concentrations dans les sols et les végétaux sont supérieures à la LQ, conduit à considérer 52 valeurs de BCFé, soit une augmentation de 72% des transferts à prendre en compte.

Pour le sol P4, compte tenu des concentrations plus élevées que pour le sol P1, un nombre plus conséquent de BCF avait pu être estimé (129). En prenant en compte les LQ, 37 valeurs de BCFé sont considérées, soit une augmentation de 28% des transferts à prendre en compte. Les écarts entre les résultats pour les BCF et les BCFé pour le sol P4 sont donc moindre que pour le sol P1.

4. Considération des BCFé

Dans le cas où l'évaluateur de risque ne dispose que de très peu de données de BCF (beaucoup de données manquantes), utiliser par défaut un BCF estimé pour les polluants disposant de concentrations inférieures aux limites de quantification (LQ) du laboratoire se traduit par la prise en compte de transferts supplémentaires des sols vers les végétaux (non quantifié expérimentalement).

La considération de valeurs de BCF estimés constitue une approche conservatoire qui apparaît ici peu sensible pour les risques sanitaires calculés. Sur la base des scénarios retenus et des LQ fournies par le laboratoire d'analyse, pour cette étude, cette considération induit une surestimation du risque sanitaire jusqu'à 30% au maximum.

Il peut être intéressant pour l'évaluateur de considérer un scénario conservateur « worst case » (prise en compte de tous les BCFé) et d'un « best case » (pas de prise en compte des BCFé) pour encadrer les expositions et les risques de son étude.



V Etude de sensibilité 3 : Prise en compte des concentrations des différentes fractions granulométriques du sol

1. Objectifs

Les concentrations en PCB et PCDD/F dans les sols issus des mailles P1 et P4 (cf. paragraphe I.2.2.1) sont des concentrations moyennes pour des particules de sol de diamètre 0-1 cm (fraction envoyée au laboratoire d'analyses).

Dans le cas de l'ingestion non intentionnelle de sol, la fraction de sol ingérée correspond à la fraction de particules de sol de diamètre 0-250 µm. En effet, c'est cette fraction de sol qui est susceptible d'adhérer à la peau lors de contact main-bouche chez les enfants, par exemple (InVS/INERIS, 2012).

Les concentrations en PCB et PCDD/F étant 2 à 3 fois plus élevées dans la fraction '0-250 µm' que dans la fraction '0-1 cm' (cf. paragraphe I.2.2.1), l'exposition et les risques liés à l'ingestion non intentionnelle de sol seraient sous-estimés.

2. Paramètres testés

Les expositions et les risques sanitaires liés à l'ingestion non intentionnelle de sol sont calculés pour les concentrations de la fraction '0-250 µm' (et non plus pour celles de la fraction '0-1 cm'), pour les 2 mailles de sol P1 et P4 et ce, pour les enfants de 1 à 3 ans.

Les expositions et les risques sanitaires spécifiques à l'ingestion de végétaux ne seront pas impactées puisque les concentrations prises en compte pour les transferts sol-végétaux restent celles de la fraction '0-1 cm'.

3. Résultats

3.1 Quotient de danger

Comme vu précédemment au paragraphe I.2.2 (cf. Tableau 2), les concentrations dans les fractions de sol '0-250 µm' sont 2 à 3 fois supérieures à celles dans la fraction '0-1 cm' et ce, pour les deux sols.

Les QD calculés liés à l'ingestion de sol, et liés à l'ingestion globale, pour P1 et P4, sont présentés respectivement au Tableau 27 et au Tableau 28 pour les PCB-ndl et les PCDD/F et PCB-dl et ce, pour les enfants de 1 à 3 ans.

Tableau 27 : QD pour les enfants de 1 à 3 ans par ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à P1

	PCB-ndl	PCDD/F et PCB-dl
QD par ingestion de sol		
Concentrations Fraction '0-1 cm'	2,5E-03	2,6E-02
Concentrations Fraction '0-250 µm'	5,3E-03	7,3E-02
QD par ingestion de sol et de végétaux		
Concentrations Fraction '0-1 cm'	3,9E-02	1,7E-01
Concentrations Fraction '0-250 µm'	4,2E-02	2,2E-01

QD supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets à seuil :

 QD > 1



Tableau 28 : QD pour les enfants de 1 à 3 ans par ingestion de sol et ingestion globale selon les familles de substances, pour une exposition à P4

	PCB-ndl	PCDD/F et PCB-dl
QD par ingestion de sol		
Concentrations Fraction '0-1 cm'	2,1E-02	2,5E+00
Concentrations Fraction '0-250 µm'	4,9E-02	6,5E+00
QD par ingestion de sol et de végétaux		
Concentrations Fraction '0-1 cm'	1,6E-01	5,6E+00
Concentrations Fraction '0-250 µm'	1,9E-01	9,5E+00

QD supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets à seuil : QD > 1

Conformément à la démarche de l'EQRS (cf. paragraphe II.2.2.3), pour les enfants de 1 à 3 ans :

- Pour le sol P1, les quotients de danger calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité, pour les différents usages (ingestion de sol et de végétaux), que ce soit pour les PCB-ndl ou les PCDD/F + PCB-dl et ce, pour les deux fractions de sol considérées ;
- Pour le sol P4,
 - pour les PCB-ndl, les quotients de danger calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité ;
 - pour les PCDD/F + PCB-dl, les quotients de danger calculés sont supérieurs au critère d'acceptabilité, pour une exposition par ingestion seule de sol ou combinée à l'ingestion de végétaux.

Le QD lié à l'ingestion de sol augmente d'un facteur 2 pour une exposition à un sol P1 et à un sol P4. Le QD global (ingestion de sol et de végétaux) augmente, mais de manière moindre (en raison de la voie d'apport majoritaire par les végétaux) :

- Pour les PCB-ndl, de 8% pour une exposition à P1, et de 19% pour une exposition à P4 ;
- Pour les PCDD/F + PCB-dl, de 29% pour une exposition à P1 et de 70% pour une exposition à P4.

L'impact de la prise en compte de la fraction '0-250 µm' pour l'ingestion non intentionnelle de sol est donc fortement variable selon les familles de congénères et leurs niveaux de concentrations dans les sols.

3.2 Excès de risque individuel

Le Tableau 29 et le Tableau 30 synthétisent les Excès de Risque Individuel (ERI) calculés pour deux fractions de sol, pour des enfants de 1 à 3 ans, sur la vie entière, pour une exposition à P1 et P4.

Tableau 29 : ERI lié aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour des enfants de 1 à 3 ans, pour une exposition à un sol P1

	Classes d'âge (en années)
	Enfant (1 – 3)
ERI lié à l'ingestion de sol	
Concentrations Fraction '0-1 cm'	1,4E-09
Concentrations Fraction '0-250 µm'	3,0E-09
ERI lié à l'ingestion de sol et de végétaux	
Concentrations Fraction '0-1 cm'	1,5E-08
Concentrations Fraction '0-250 µm'	1,6E-08

ERI supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets sans seuil : ERI > 1,0E-05



Tableau 30 : ERI lié aux PCB-ndl, pour les différentes voies d'ingestion pour des enfants de 1 à 3 ans, pour une exposition à un sol P4

Classes d'âge (en années)	
Enfant (1 – 3)	
<i>ERI lié à l'ingestion de sol</i>	
Concentrations Fraction '0-1 cm'	1,2E-08
Concentrations Fraction '0-250 µm'	2,8E-08
<i>ERI lié à l'ingestion de sol et de végétaux</i>	
Concentrations Fraction '0-1 cm'	6,3E-08
Concentrations Fraction '0-250 µm'	7,9E-08

ERI supérieur au critère d'acceptabilité de l'EQRS pour les effets sans seuil : ERI > 1,0E-05

D'après la démarche de l'EQRS (cf. paragraphe II.2.2.3), les excès de risque individuel calculés sont inférieurs au critère d'acceptabilité, pour les différents usages (ingestion de sol et de végétaux) pour les enfants de 1 à 3 ans pour les deux fractions de sol et ce, pour P1 et P4.

En prenant en compte les concentrations de la fraction '0-250 µm' de sol, le risque sans seuil lié à l'ingestion non intentionnelle de sol pour les PCB-ndl, pour des enfants de 1 à 3 ans, augmente de 114% pour P1 et de 133% pour P4. Quant au risque sans seuil global (sol et végétaux), l'ERI n'augmente que de 7% pour P1 et de 25% pour P4, dû à l'apport majoritaire des PCB-ndl par l'ingestion de végétaux.



VI Etude de sensibilité 4 : Influence de la biodisponibilité relative dans le sol

1. Objectifs

Cette étude consiste à évaluer l'influence de l'utilisation de facteurs de biodisponibilité relative dans les sols, obtenus expérimentalement, sur l'exposition et les risques sanitaires.

2. Paramètres testés

Les biodisponibilités relatives expérimentales disponibles pour les quatre PCB-ndI sont introduites dans le modèle d'évaluation des expositions et des risques sanitaires.

Le facteur de biodisponibilité relative est utilisé pour le calcul de la dose d'exposition ajustée, qui correspond à l'exposition interne à la substance contenue dans le sol tenant compte de sa biodisponibilité dans la matrice utilisée pour élaborer la VTR et dans le sol étudié (cf. paragraphe I.2.2.4).

Par défaut, d'après une approche conservatoire, le facteur de biodisponibilité relative dans le sol est considéré à 1 pour les PCB.

Les valeurs expérimentales de biodisponibilité relative sont rappelées au paragraphe I.2.2.4 . Elles sont élevées et comprises entre 83 % et 94 %.

3. Résultats

- Les DJE liées à l'ingestion de sol sont directement proportionnelles à la valeur de la biodisponibilité relative des quatre PCB-ndI (101/138/153/180) dans les sols.
-
- Le Tableau 31 présente les valeurs de DJE par congénère pour une exposition liée à l'ingestion de sol P4 et pour une exposition globale (ingestion de sol P4 et de végétaux), pour les enfants de 1 à 3 ans, à la fois pour une biodisponibilité relative de valeur 1 (cf. évaluation initiale au chapitre III) et pour les valeurs de biodisponibilité relative issues des expérimentations (cf. paragraphe I.2.2.4). Pour les PCB 28 et 52, en l'absence de données expérimentales, les DJE pour une biodisponibilité relative par défaut à 100% ont été prises en compte pour une exposition à la somme des PCB-ndI.

Tableau 31 : DJE globale selon la biodisponibilité relative, pour une exposition à un sol P4

	Biodisponibilité relative dans le sol	DJE par ingestion - enfants de 1 à 3 ans - (en mg/kg pc/j)	
		sol	globale (sol et végétaux)
PCB 28	100 %	1,20E-09	1,20E-09
PCB 52	100 %	2,20E-09	1,20E-07
PCB 101	100 %	1,70E-08	2,00E-07
	83 %	1,40E-08	2,00E-07
PCB 138	100 %	6,70E-08	4,90E-07
	92 %	6,20E-08	4,80E-07
PCB 153	100 %	7,10E-08	5,90E-07
	94 %	6,70E-08	5,80E-07
PCB 180	100 %	5,20E-08	2,30E-07
	83 %	4,30E-08	2,20E-07
Somme PCB-ndl		2,1E-07	2,10E-07
		1,9E-07	1,89E-07

En raison des valeurs élevées de biodisponibilité relative pour 4 des PCB-ndl (PCB 101/138/153/180) dans les sols, il est noté une légère baisse de l'exposition par ingestion de sol (10%) pour la classe d'âge testée et une baisse encore plus faible pour l'exposition globale (de 1,8%), pour laquelle la voie d'exposition majoritaire est la consommation de végétaux potagers (à 87%).

Le résultat est similaire pour le risque à seuil global (QD) pour les PCB-ndl en raison de l'application de la même VTR à tous les congénères PCB-ndl (passage d'un QD de 1,63E-01 à un QD de 1,60E-01). Dans ce cas précis, la prise en compte de la biodisponibilité pour les PCB-ndl a très peu d'impact sur l'évaluation des risques globaux et n'est donc pas de nature à modifier les conclusions de l'étude.



VII Synthèse générale

Le projet TROPHÉ porte sur les Transferts et les Risques des Organiques Persistants chez l'Homme et les écosystèmes, à savoir les dioxines/furannes (PCDD/F) et les polychlorobiphényles (PCB : PCB_i et PCB_{dl}). Les terres utilisées pour cette étude proviennent de parcelles situées autour d'un ancien site industriel localisé à Saint Cyprien (42), et ayant subi une pollution par dispersion de POPs dans l'environnement suite à un incendie. L'objectif du livrable n°3 a été d'évaluer les expositions et les risques sanitaires chez l'Homme à l'aide de l'outil de modélisation MODUL'ERS (outil multi-compartiment créé et développé par l'INERIS).

Il convient de souligner que l'objectif de ces travaux n'est pas de réaliser une nouvelle évaluation des risques du site mais d'apprécier la sensibilité de paramètres intervenant lors d'une évaluation des risques chez l'Homme et ce pour répondre à des questions de recherche. Le scénario étudié ne correspond d'ailleurs pas à un scénario réel puisqu'aucune des parcelles étudiées dans le cadre de ce projet ne fait l'objet d'un usage résidentiel ou de jardinage.

L'évaluation des expositions et des risques sanitaires (démarche ERS, guide INERIS 2013) a été menée pour une population fictive type, composée d'adultes et d'enfants, exposée aux POPs via l'ingestion non intentionnelle de sol et de végétaux potagers et ce, pour des sols issus de deux mailles différemment contaminées (P1 et P4). L'objectif ici a été d'exploiter les données expérimentales générées lors de la première étape du projet TROPHÉ : concentrations en POPs dans les sols avec la prise en compte ou non de la granulométrie, facteurs de transferts des POPs dans les végétaux avec la prise en compte ou non des limites de quantification (LQ), et facteurs de biodisponibilité relative dans les sols. En complément, plusieurs valeurs pour différents paramètres de modélisation ont pu être testées afin d'évaluer la sensibilité des résultats calculés, sur les doses journalières d'exposition (DJE) par ingestion et sur les risques sanitaires afférents.

Les niveaux de contaminations des deux mailles de sols sont différents, avec des concentrations en PCB-ndl de 3,4 µg/kg et de 28,7 µg/kg de sol sec, et en PCDD/F + PCB-dl de 0,4 µg/kg et de 10,5 µg/kg de sol sec respectivement pour P1 et P4. Comme attendu, l'exposition globale (ingestion de sol et de végétaux) à un sol issu de la maille P4 est plus élevée que l'exposition à un sol issu de la maille P1 pour les différentes familles de composés chimiques, en notant une exposition par ingestion plus grande pour les PCB-ndl que pour les PCB-dl et PCDD/F.

Pour la population française, la contribution des légumes (hors pommes de terre) à l'exposition totale via l'alimentation générale est estimée dans l'Etude de l'Alimentation Totale française respectivement à 0,2% pour les PCB-ndl, et à 0,1% pour les PCDD/F + PCB-dl (échantillonnage sur le marché alimentaire national, ANSES, 2011) ; les aliments contribuant majoritairement à l'exposition aux PCB et PCDD/F étant le poisson, les produits laitiers et les produits carnés.

Dans le cadre du projet TROPHÉ, la contribution de l'ingestion de sol et de végétaux potagers à l'exposition de la population fictive étudiée est au contraire non négligeable en raison de la contamination des sols investigués, objets de la présente étude.

En comparant les expositions calculées avec l'Etude de l'Alimentation Totale française³², l'exposition globale (ingestion de sol et végétaux) aux PCB-ndl, pour les adultes et les enfants (par exemple, pour les 1 à 3 ans) est inférieure à l'exposition moyenne française via l'alimentation. Pour les PCDD/F + PCB-dl, l'exposition globale est également plus faible sauf pour l'exposition des enfants (1 à 3 ans) à P4.

L'exposition liée à l'ingestion non intentionnelle de sol est particulièrement sensible chez les enfants, notamment chez les moins de 1 an qui sont les plus exposés. Cette exposition diminue avec l'augmentation du poids de l'enfant avec l'âge, et la diminution de la quantité de sol ingérée dès 6 ans, dans le cas de notre étude.

L'exposition liée à l'ingestion de végétaux, au regard du bol alimentaire testé, est supérieure à celle liée à l'ingestion de sol et ce, pour P1 et P4. Ce constat est à nuancer, car cela dépend de la famille de substances (ici, l'exposition aux PCB se fait majoritairement via l'ingestion de végétaux, ce qui n'est pas toujours le cas pour les congénères PCDD/F). De plus, la répartition entre la contribution de l'ingestion de sol et des

³² ANSES, Juin 2011. Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2). Tome 1. Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques, persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes.



végétaux varie au sein de ces familles de substances. Les enfants de 1 à 3 ans sont ceux qui sont les plus exposés à un risque sanitaire global (sol et végétaux).

Pour une même population, consommant un bol alimentaire fixe, l'exposition aux différents congénères, par ingestion de végétaux, varie différemment pour la famille des PCB et pour la famille des PCDD/F, selon le nombre de chlore et selon les espèces végétales consommées. La répartition des contributions des espèces végétales aux DJE par congénère ne correspond donc pas à la répartition des catégories de végétaux dans le bol alimentaire.

Pour les PCB les moins chlorés (inférieurs à 4-5 atomes de chlore), une forte contribution des salades à la DJE est à remarquer. Cette dernière chute fortement pour les PCB les plus chlorés. Les contributions de la courgette et de la pomme de terre sont les plus élevées pour les PCB les plus chlorés. Pour la carotte, la contribution reste stable indépendamment du nombre d'atomes de chlore. Il est à noter que ces observations ne s'appliquent pas aux PCB coplanaires non ortho-substitués (PCB77/81/126/169).

Pour les PCDD/F, le constat est différent. Quel que soit le nombre d'atomes de chlore, la contribution des végétaux à l'exposition semble identique, exceptée pour la courgette. La contribution de la pomme de terre est majoritaire (69 à 88% des DJE pour les différents congénères) suivie des contributions de la courgette et de la carotte. Les végétaux souterrains (pomme de terre et carotte) représentent 78 à 100% des contributions. Quant à la laitue et aux haricots, leurs contributions sont faibles (moins de 5%).

Les indices de risque (QD et ERI) sont directement proportionnels aux doses d'exposition (DJE) pour les PCB-ndl. Le risque sanitaire lié aux PCB est tiré par les congénères présents majoritairement dans les sols P1 et P4, soit les PCB153/138/180. Dans le cas des PCDD/F et PCB-dl, l'utilisation du système de facteur d'équivalent toxique (TEF) crée une pondération entre l'exposition et les risques sanitaires. Cela conduit à constater que les congénères tirant l'exposition diffèrent de ceux tirant le risque sanitaire. Les congénères présents majoritairement dans les sols sont le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, l'OCDF et l'OCDD alors que les risques sont tirés par les furannes les moins chlorés tels que la 2,3,4,7,8-PeCDF, la 2,3,7,8-TeCDF ainsi que par le PCB126.

Suite aux expérimentations explicitées dans les Livrables n°1 et n°2 du projet TROPHé, une gamme de valeurs de BCF a été obtenue. Le choix des valeurs de BCF est à la main de l'évaluateur. Appliquer les valeurs de BCF les plus élevées (transfert observé sur les sols les moins contaminés) à un sol quelconque est une démarche conservatoire.

Diminuer la valeur de la quantité de sol ingérée (passage du 95^{ème} percentile à la valeur médiane de la distribution de Stanek, avec une réduction d'un facteur 4) a des conséquences relativement faibles pour l'exposition globale aux PCB (baisse de la DJE globale de 6% pour les PCB-ndl et de 9% pour les PCB-dl, pour des enfants de 1 à 3 ans exposés à P4, par exemple). L'exposition aux PCDD/F y est plus sensible (baisse de la DJE globale de 39% pour des enfants de 1 à 3 ans exposés à P4), en raison de la plus forte contribution de l'ingestion de sol dans l'exposition globale à cette famille de substance. Pour les risques sanitaires pour les PCDD/F + PCB-dl, l'utilisation des TEF pondère cette variabilité (baisse du QD de 32% pour les enfants pour P4). Pour les risques sanitaires sans seuil, l'impact est ici très minime (de l'ordre de 10% pour les PCB-ndl pour P4).

La considération de valeurs de BCF estimés constitue une approche conservatoire qui apparaît ici peu sensible pour les risques sanitaires calculés. Sur la base des scénarios retenus et des LQ fournies par le laboratoire d'analyse, pour cette étude, cette considération induit une surestimation du risque sanitaire jusqu'à 30% au maximum.

Dans le cas où l'évaluateur de risque ne dispose que de très peu de données de BCF (beaucoup de données manquantes), utiliser par défaut un BCF estimé pour les polluants disposant de concentrations inférieures aux limites de quantification (LQ) du laboratoire se traduit par la prise en compte de transferts supplémentaires des sols vers les végétaux (non quantifié expérimentalement).

Comme vu précédemment, pour certaines populations infantiles, et pour certains congénères, l'ingestion non intentionnelle de sol est une voie majeure d'exposition. Les concentrations en POPs mesurées dans les différentes fractions granulométriques des sols ont mis en évidence une grande variabilité de celles-ci selon les fractions considérées. Les concentrations pour la fraction '0-250 µm', fraction susceptible d'adhérer à la peau lors de contacts main-bouche chez les enfants par exemple (InVS/INERIS, 2012), sont 2 à 3 fois supérieures à celles pour la fraction '0-1 cm' considérée en première approche dans les calculs de risques



sanitaires. La prise en compte des concentrations de la fraction '0-1 cm' conduit ici à sous-estimer les risques globaux (pour les enfants de 1 à 3 ans, pour P1 et P4, risques à seuil plus élevés avec la fraction '0-250 μm ' de 8 et 29% pour les PCB-ndl, de 29 et 70% pour les PCDD/F ; risques sans seuils plus élevés de 7 et de 25% pour les PCB-ndl).

Enfin, la prise en compte de la biodisponibilité relative de PCB-ndl dans les sols (mesurée expérimentalement), au lieu de la démarche conservatoire considérant la totalité de la masse de polluant comme biodisponible, peut permettre d'avoir une appréciation plus réaliste de l'exposition. Cependant, l'ajustement de la DJE par la biodisponibilité n'apparaît pertinent que si l'ingestion de sol est une voie d'exposition majeure et si sa prise en compte entraîne une diminution sensible des risques sanitaires.



VIII Conclusions et Recommandations

D'après l'évaluation des expositions et des risques chez l'Homme menée dans le cadre du projet TROPHé sur la base des résultats expérimentaux, les contributions à l'exposition, selon les voies d'ingestion (sol et végétaux potagers) sont différentes selon les familles de substances et les végétaux. L'exposition par l'ingestion de végétaux potagers est plus élevée pour les PCB que pour les PCDD/F en raison de facteurs de bioconcentration (BCF) expérimentaux plus élevés. Cependant, ce sont les PCDD/F et le PCB126 qui tirent les risques sanitaires, en raison de valeurs toxicologiques élevées. Suite à l'étude de sensibilité de différents paramètres intervenant lors de cette évaluation, les **observations** suivantes peuvent être formulées :

- L'ingestion de POPs via les sols et les végétaux cultivés sur des sols contaminés constitue une voie à considérer pour l'exposition des populations, notamment pour les enfants ;
- L'exposition par l'ingestion non intentionnelle de sol et par l'ingestion de végétaux cultivés est sensiblement équivalente pour les PCDD/F ;
- En comparaison, l'exposition aux PCB d'un sol est majoritairement portée par l'ingestion de végétaux cultivés sur ce sol par rapport à l'ingestion non intentionnelle de sol. Cela s'explique par des transferts sol-plantes plus élevés pour les PCB que pour les PCDD/F ;
- A ce stade, il n'a pas été identifié de traceurs au sein des POP pouvant simplifier l'EQRS en ne sélectionnant que quelques congénères au lieu de la totalité des substances ;
- La population infantile est particulièrement sensible à l'exposition liée à l'ingestion non intentionnelle de sol (contact main-bouche). Le paramètre « quantité de sol ingéré » est un paramètre sensible pour l'évaluation des expositions et des risques sanitaires pour l'enfant, ainsi que la concentration des POPs dans la fraction fine ('0-250 µm') susceptible d'adhérer aux mains des enfants.

Suite à l'étude de sensibilité de différents paramètres intervenant lors de cette évaluation, les **recommandations** suivantes peuvent être formulées :

- Il convient de considérer les congénères PCB-ndl, PCB-dl et PCDD/F de manière distincte dans les matrices environnementales investiguées en réalisant des analyses sur les sols mais aussi dans les végétaux potagers lorsque cela est possible (démarche IEM³³). En effet, l'exposition est très dépendante des congénères présents de par la variabilité de leur transfert dans les végétaux ;
- Les POPs doivent être analysés sur la fraction des sols la plus fine, celle adhérente aux mains ('0-250 µm') en complément de la fraction globale généralement envoyée au laboratoire d'analyse, pour une prise en compte adaptée de l'exposition par ingestion ;
- Le calcul d'une moyenne des valeurs BCF obtenues sur les 4 mailles étudiées permet d'esquisser les grandes tendances en termes de transferts des POPs par rapport à la considération des valeurs BCF obtenues individuellement sur les mailles (BCF P1, BCF P2, BCF P3 ou BCF P4) ;
- Des valeurs BCFmoyen sont proposées à l'issue des essais expérimentaux ainsi qu'une interprétation des résultats sur ces valeurs qui a permis de mettre en évidence les grandes tendances mentionnées ci-dessus. Il reviendra à tout évaluateur des risques souhaitant modéliser le transfert des POPs dans les végétaux de considérer la série de valeurs adaptée au contexte et aux objectifs de l'étude (BCF P1, BCF P2, BCF P3, BCF P4 ou BCFmoyen) ;
- Prendre en compte les limites de quantification pour estimer les transferts sols-plantes constitue une approche conservatoire. Si le choix est fait de travailler avec des facteurs de bioconcentration estimés, l'évaluateur doit apprécier la sensibilité de ces facteurs sur l'éventuelle surestimation des expositions et des risques. Veiller à retenir, dans la mesure du possible, un laboratoire d'analyse présentant des seuils de quantifications bas peut ainsi réduire cette surestimation des expositions et des risques ;
- Prendre en compte la biodisponibilité relative dans le sol n'apparaît pertinent que si l'ingestion de sol est une voie d'exposition majeure et si sa prise en compte entraîne une diminution sensible des risques sanitaires ;
- Dans un contexte de multipollution, l'évaluateur doit s'attacher à considérer un bol alimentaire varié, représentatif de celui de la population générale, composé de toutes les catégories de végétaux, en raison des transferts variables selon les POPs considérés.

³³ Interprétation de l'Etat des Milieux



IX Annexes

ANNEXE	LIBELLE
1	METHODE DE CALCUL ET FACTEUR D'EQUIVALENCE TOXIQUE (TEF) DE L'OMS
2	CONCENTRATIONS EN POPS DANS LES SOLS SELON LE NOMBRE D'ATOMES DE CHLORE- FRACTION 0-1CM (GRAPHE ET TABLEAU)
3	CONCENTRATIONS EN POPS DANS LES SOLS - FRACTION 0-250 μ M
4	VALEURS DES BCF1 ET BCF4
5	VALEURS DES BCFE1 ET BCFE4 (valeurs estimées)
6	LE LOGICIEL MODUL'ERS
7	METHODOLOGIE POUR LA RECHERCHE ET LA SELECTION DES VALEURS TOXICOLOGIQUES DE REFERENCE (VTR)
8	EVALUATION DE L'EXPOSITION - DJE POUR LES PCDDF ET PCB-DL SELON TEF OM98 ET 2005
9	EVALUATION DE L'EXPOSITION - DJE PAR VOIES D'EXPOSITION ET CONGENERES POUR LES ADULTES ET LES ENFANTS DE 1 A 3 ANS EXPOSES A UN SOL P4
10	EVALUATION DE L'EXPOSITION - DJE PAR VEGETAUX POUR DES ENFANTS DE 1 A 3 ANS EXPOSES A UN SOL P1 ET P4
11	ETUDE DE SENSIBILITE 3 – REPRESENTATIONS GRAPHIQUES DES QD SELON LES BCF ET LES BCFE



Annexe 1 :

**Méthode de calcul et Facteur d'Equivalence Toxique (TEF)
de l'OMS**

Expression des résultats pour les substances PCDD/F et PCB-dl par un système TEQ :

Les dioxines, furannes et PCB-dl sont présents sous la forme d'un mélange de congénères. Leurs concentrations peuvent être estimées de deux façons, par la concentration :

- individuelle de chaque congénère, exprimée en ng/kg de matière sèche (MS) ou matière fraîche (MF) ;
- totale des congénères (somme des PCDD/F et PCB-dl).

En plus des expressions massiques usuelles, les valeurs peuvent être exprimées en équivalent toxique (I-TEQ, international toxic equivalent). Le TEQ prend en compte la toxicité des congénères en leur attribuant un facteur d'équivalence toxique (FET ou TEF, toxic equivalency factor) établi au regard de la toxicité de la 2,3,7,8-TCDD (nommée dioxine de SEVESO) dont le TEF s'élève à 1. Les autres congénères se voient attribuer un facteur équivalent toxique de 1 (même toxicité que la dioxine de SEVESO) ou bien un facteur inférieur.

Pour un mélange donné, le calcul en équivalent toxique (I-TEQ) consiste donc à multiplier la concentration de chaque molécule présente dans le mélange par son TEF puis à sommer l'ensemble des concentrations :

$$\text{Total Toxic Equivalency (TEQ)} = \sum_{n=1}^k C_n * TEF_n$$

Il existe aujourd'hui deux systèmes attribuant des facteurs TEF aux congénères. Ces systèmes sont celui de l'OMS de 2005 (utilisé ici) modifiant celui de 1998 et celui de l'OTAN de 1989.

Facteur d'équivalent toxique (FET ou TEF, toxic equivalency factor)

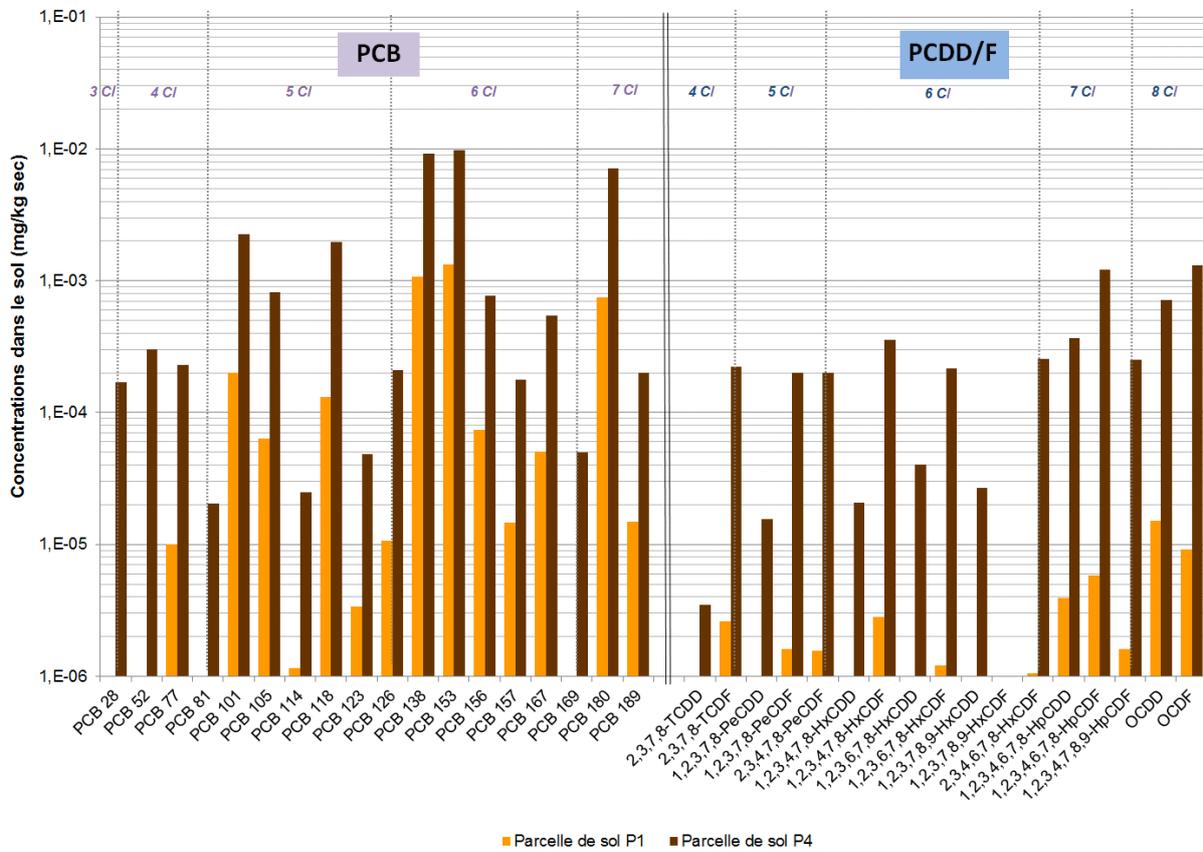
Isomère ou groupe homologue (numéro IUPAC pour les isomères de PCB)		TEF (OMS 1998)	TEF (OMS 2005)
PCDD	2,3,7,8-tétraCDD	1	1
	1,2,3,7,8-pentaCDD	1	1
	1,2,3,4,7,8-hexaCDD	0,1	0,1
	1,2,3,6,7,8-hexaCDD	0,1	0,1
	1,2,3,7,8,9-hexaCDD	0,1	0,1
	1,2,3,4,6,7,8-heptaCDD	0,01	0,01
	OCDD	0,0001	0,0003
PCDF	2,3,7,8-TCDF	0,1	0,1
	1,2,3,7,8-pentaCDF	0,05	0,03
	2,3,4,7,8-pentaCDF	0,5	0,3
	1,2,3,4,7,8-hexaCDF	0,1	0,1
	1,2,3,6,7,8-hexaCDF	0,1	0,1
	1,2,3,7,8,9-hexaCDF	0,1	0,1
	2,3,4,6,7,8-hexaCDF	0,1	0,1
	1,2,3,4,6,7,8-heptaCDF	0,01	0,01
	1,2,3,4,7,8,9-heptaCDF	0,01	0,01
	OCDF	0,0001	0,0003
PCB non ortho	3,3',4,4'-TCB (77)	0,0001	0,0001
	3,3',4',5'-TCB (81)	0,0001	0,0003
	3,3',4,4',5'-PeCB (126)	0,1	0,1
	3,3',4,4',5,5'-HxCB (169)	0,01	0,03
PCB mono-ortho	2,3,3',4,4'-PeCB (105)	0,0001	0,00003
	2,3,4,4',5'-PeCB (114)	0,0005	0,00003
	2,3',4,4',5'-PeCB (118)	0,0001	0,00003
	2',3,4,4',5'-PeCB (123)	0,0001	0,00003
	2,3,3',4,4',5'-HxCB (156)	0,0005	0,00003
	2,3,3',4,4',5'-HxCB (157)	0,0005	0,00003
	2,3',4,4',5,5'-HxCB (167)	0,00001	0,00003
	2,3,3',4,4',5,5'-HpCB (189)	0,0001	0,00003

Les valeurs en gras indiquent un changement dans la valeur du TEF.

Annexe 2 :

Concentrations en POPS dans les sols selon le nombre d'atomes de chlore-fraction 0-1cm (graphe et tableau)

Concentrations dans les sols issus des mailles P1 et P4, selon les congénères et le nombre croissant d'atomes de chlore par famille



Substances	Concentrations dans P1 (mg/kg MS)	Concentrations dans P4 (mg/kg MS)
1234678_HpCDD	3,9E-06	3,7E-04
1234678_HpCDF	5,8E-06	1,2E-03
1234789_HpCDF	1,6E-06	2,5E-04
123478_HxCDD	0,0E+00	2,1E-05
123478_HxCDF	2,8E-06	3,6E-04
123678_HxCDD	0,0E+00	4,0E-05
123678_HxCDF	1,2E-06	2,2E-04
123789_HxCDD	0,0E+00	2,7E-05
123789_HxCDF	0,0E+00	0,0E+00
12378_PeCDD	0,0E+00	1,6E-05
12378_PeCDF	1,6E-06	2,0E-04
PCB138	1,1E-03	9,2E-03
PCB180	7,5E-04	7,1E-03
PCB153	1,3E-03	9,7E-03
PCB101	2,0E-04	2,3E-03
PCB52	0,0E+00	3,0E-04
PCB167	5,0E-05	5,4E-04
PCB118	1,3E-04	2,0E-03
PCB157	1,5E-05	1,8E-04
PCB189	1,5E-05	2,0E-04
PCB156	7,3E-05	7,6E-04
PCB105	6,3E-05	8,2E-04
PCB114	1,2E-06	2,5E-05
234678_HxCDF	1,1E-06	2,6E-04
23478_PeCDF	1,6E-06	2,0E-04
2378_TeCDD	0,0E+00	3,5E-06
2378_TeCDF	2,6E-06	2,2E-04
PCB28	0,0E+00	1,7E-04
PCB169	0,0E+00	5,0E-05
PCB77	1,0E-05	2,3E-04
PCB126	1,1E-05	2,1E-04
PCB81	0,0E+00	2,1E-05
OCDD	1,5E-05	7,2E-04
OCDF	9,2E-06	1,3E-03
PCB123	3,4E-06	4,8E-05

MS : Matière Sèche de sol

Annexe 3 :

Concentrations en POPS dans les sols – fraction 0-250 μM

Les concentrations dans la fraction '0-250 µm' de sol sont la moyenne des répliqués de sol (cf. livrable TROPHÉ n°2).

Congénères	Concentrations en mg/kg (sol sec)	
	Fraction 0-250 µm Maille P1	Fraction 0-250 µm Maille P4
1234678_Heptachlorodibenzodioxine	9,3E-06	8,7E-04
1234678_Heptachlorodibenzofuranne	1,4E-05	2,8E-03
1234789_Heptachlorodibenzofuranne	3,8E-06	6,2E-04
123478_Hexachlorodibenzodioxine	0,0E+00	5,6E-05
123478_Hexachlorodibenzofuranne	6,9E-06	9,7E-04
123678_Hexachlorodibenzodioxine	9,1E-07	1,1E-04
123678_Hexachlorodibenzofuranne	3,0E-06	5,3E-04
123789_Hexachlorodibenzodioxine	6,8E-07	8,3E-05
123789_Hexachlorodibenzofuranne	0,0E+00	0,0E+00
12378_Pentachlorodibenzodioxine	3,3E-07	4,4E-05
12378_Pentachlorodibenzofuranne	4,2E-06	5,5E-04
22'344'55'_Hexachlorobiphényle_(138)	2,2E-03	1,9E-02
22'344'55'_Heptachlorobiphényle_(180)	1,7E-03	1,7E-02
22'44'55'_Hexachlorobiphényle_(153)	2,7E-03	2,4E-02
22'455'_Pentachlorobiphényle_(101)	4,6E-04	5,5E-03
22'55'_Tétrachlorobiphényle_(52)	1,0E-04	8,7E-04
23'44'55'_Hexachlorobiphényle_(167)	1,1E-04	1,2E-03
23'44'5'_Pentachlorobiphényle_(118)	3,1E-04	4,9E-03
233'44'5'_Hexachlorobiphényle_(157)	3,6E-05	4,5E-04
233'44'55'_Heptachlorobiphényle_(189)	3,4E-05	5,0E-04
233'44'5'_Hexachlorobiphényle_(156)	1,7E-04	1,8E-03
233'44'_Pentachlorobiphényle_(105)	1,5E-04	1,9E-03
2344'5'_Pentachlorobiphényle_(114)	2,4E-06	1,1E-04
234678_Hexachlorodibenzofuranne	2,5E-06	6,1E-04
23478_Pentachlorodibenzofuranne	4,1E-06	5,2E-04
2378_Tétrachlorodibenzodioxine	0,0E+00	1,0E-05
2378_Tétrachlorodibenzofuranne	6,7E-06	5,5E-04
244'_Trichlorobiphényle_(28)	0,0E+00	1,8E-04
33'44'55'_Hexachlorobiphényle_(169)	3,8E-06	1,3E-04
33'44'_Tétrachlorobiphényle_(77)	2,4E-05	5,2E-04
3344'5'_Pentachlorobiphényle_(126)	2,8E-05	5,2E-04
344'5'_Tétrachlorobiphényle_(81)	0,0E+00	9,5E-05
Octachlorodibenzodioxine	3,4E-05	1,6E-03
Octachlorodibenzofuranne	2,2E-05	2,9E-03
PCB_123	7,2E-06	1,6E-04

Annexe 4 :
Valeurs des BCF1 et BCF4

Valeurs des BCF pour un sol de maille P1

	Pommes de Terre	Carotte entière	Courgettes	Haricots	Laitues
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	1,47E-02	3,64E-02	2,29E-02	NA	NA
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	7,77E-02	1,14E-01	1,52E-01	NA	NA
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	NA	7,63E-03	5,18E-03	NA	NA
1,2,3,4,7,8-HxCDD	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,4,7,8-HxCDF	2,79E-02	5,60E-02	1,24E-01	NA	NA
1,2,3,6,7,8-HxCDD	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,6,7,8-HxCDF	NA	6,25E-02	6,85E-02	NA	NA
1,2,3,7,8,9-HxCDD	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,7,8,9-HxCDF	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,7,8-PeCDD	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,7,8-PeCDF	3,48E-02	1,25E-01	1,06E-01	NA	7,76E-02
PCB 138	1,13E-01	2,15E-01	7,47E-01	NA	3,54E-01
PCB 180	8,08E-02	1,39E-01	3,04E-01	NA	NA
PCB 153	1,52E-01	2,81E-01	7,75E-01	NA	4,05E-01
PCB 101	NA	NA	1,90E+00	NA	4,81E+00
PCB 52	NA	NA	NA	NA	NA
PCB 167	1,07E-01	1,89E-01	3,23E-01	NA	2,43E-01
PCB 114	1,11E-01	3,07E-01	8,64E-01	6,98E-01	4,22E+00
PCB 157	1,17E-01	1,52E-01	3,83E-01	NA	4,33E-01
PCB 189	9,14E-02	9,45E-02	1,44E-01	NA	7,25E-02
PCB 156	8,21E-02	1,87E-01	5,60E-01	NA	3,17E-01
PCB 105	9,16E-02	2,47E-01	8,27E-01	4,04E-01	2,72E+00
PCB 118	NA	NA	6,72E-01	NA	8,45E+00
2,3,4,6,7,8-HxCDF	NA	5,47E-02	5,40E-02	NA	NA
2,3,4,7,8-PeCDF	3,89E-02	8,35E-02	1,11E-01	NA	8,96E-02
2,3,7,8-TCDD	NA	NA	NA	NA	NA
2,3,7,8-TCDF	6,13E-02	1,78E-01	1,06E-01	NA	NA
PCB 28	NA	NA	NA	NA	NA
PCB 169	NA	NA	NA	NA	NA
PCB 77	NA	3,47E-01	2,33E-01	NA	7,04E-01
PCB 126	1,09E-01	1,22E-01	3,84E-02	NA	NA
PCB 81	NA	NA	NA	NA	NA
OCDD	NA	NA	NA	NA	NA
OCDF	NA	1,56E-02	NA	NA	NA
PCB 123	1,41E-01	3,10E-01	8,61E-01	2,19E-01	3,35E+00

Valeurs des BCF pour un sol de maille P4

	Pommes de Terre	Carottes entières	Courgettes	Haricots	Laitues
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	4,01E-03	6,70E-03	1,49E-02	NA	2,23E-03
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	2,33E-02	3,72E-02	8,23E-02	NA	3,36E-03
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	8,48E-04	1,90E-03	2,08E-03	NA	1,64E-04
1,2,3,4,7,8-HxCDD	6,70E-03	1,16E-02	7,32E-02	NA	NA
1,2,3,4,7,8-HxCDF	9,70E-03	1,79E-02	1,11E-01	NA	1,46E-03
1,2,3,6,7,8-HxCDD	7,68E-03	1,36E-02	4,32E-02	NA	NA
1,2,3,6,7,8-HxCDF	7,87E-03	1,33E-02	4,14E-02	NA	1,19E-03
1,2,3,7,8,9-HxCDD	4,72E-03	8,79E-03	2,17E-02	NA	NA
1,2,3,7,8,9-HxCDF	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,7,8-PeCDD	9,46E-03	1,79E-02	1,03E-01	NA	NA
1,2,3,7,8-PeCDF	1,80E-02	3,32E-02	1,59E-01	6,23E-04	3,05E-03
PCB 138	4,90E-02	8,05E-02	1,37E+00	NA	1,31E-01
PCB 180	3,33E-02	5,32E-02	8,40E-01	NA	NA
PCB 153	5,88E-02	9,85E-02	1,61E+00	NA	1,22E-01
PCB 101	4,14E-02	NA	2,04E+00	NA	8,38E-01
PCB 52	NA	NA	3,97E+00	5,49E-01	5,07E+00
PCB 167	4,22E-02	5,01E-02	7,55E-01	5,08E-03	9,03E-02
PCB 114	5,37E-02	9,67E-02	1,63E+00	4,95E-02	1,60E+00
PCB 157	3,75E-02	4,34E-02	9,10E-01	4,54E-03	1,47E-01
PCB 189	2,36E-02	3,22E-02	2,76E-01	NA	1,99E-02
PCB 156	3,56E-02	4,69E-02	9,12E-01	5,38E-03	1,25E-01
PCB 105	3,89E-02	5,07E-02	1,01E+00	3,64E-02	8,18E-01
PCB 118	3,47E-02	5,23E-02	1,00E+00	4,22E-02	9,41E-01
2,3,4,6,7,8-HxCDF	6,62E-03	9,21E-03	1,69E-02	NA	9,67E-04
2,3,4,7,8-PeCDF	1,25E-02	2,09E-02	8,51E-02	NA	2,32E-03
2,3,7,8-TCDD	1,23E-02	2,54E-02	1,09E-01	NA	NA
2,3,7,8-TCDF	2,42E-02	5,46E-02	1,69E-01	2,39E-03	4,21E-03
PCB 28	NA	NA	NA	NA	NA
PCB 169	2,30E-02	NA	NA	NA	NA
PCB 77	2,28E-02	4,24E-02	1,85E-01	1,40E-02	3,11E-01
PCB 126	2,67E-02	3,33E-02	4,71E-02	NA	1,67E-02
PCB 81	3,18E-02	7,62E-02	1,38E-01	NA	9,47E-02
OCDD	3,29E-03	5,30E-03	NA	NA	NA
OCDF	3,19E-03	5,96E-03	2,91E-03	NA	5,10E-04
PCB 123	6,27E-02	6,77E-02	7,34E-01	1,25E-02	3,94E-01

Annexe 5 :
Valeurs des BCF_{E1} et BCF_{E4}
(valeurs estimées)

Valeurs des BCFé pour un sol de maille P1

	Pommes de Terre	Carotte entière	Courgettes	Haricots	Laitues
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	1,23E-02	2,72E-02	2,29E-02	1,79E-02	2,62E-02
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	5,49E-02	1,14E-01	1,52E-01	2,98E-02	4,47E-02
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	7,25E-03	6,64E-03	4,05E-03	6,23E-03	8,00E-03
1,2,3,4,7,8-HxCDD	NA	NA	1,18E-01	NA	NA
1,2,3,4,7,8-HxCDF	2,79E-02	5,60E-02	1,24E-01	1,98E-02	2,66E-02
1,2,3,6,7,8-HxCDD	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1,79E-02	6,25E-02	6,85E-02	3,87E-02	5,62E-02
1,2,3,7,8,9-HxCDD	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,7,8,9-HxCDF	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,7,8-PeCDD	NA	NA	1,60E-01	NA	NA
1,2,3,7,8-PeCDF	3,48E-02	1,25E-01	1,06E-01	1,89E-02	7,16E-02
PCB 138	1,13E-01	2,15E-01	7,47E-01	6,47E-02	3,54E-01
PCB 180	5,30E-02	1,35E-01	3,04E-01	9,71E-02	1,69E-01
PCB 153	1,52E-01	2,81E-01	7,75E-01	5,81E-02	4,05E-01
PCB 101	1,40E-01	4,26E-01	1,90E+00	4,06E-01	4,81E+00
PCB 52	NA	NA	6,49E+00	5,57E+00	4,44E+01
PCB 167	1,07E-01	1,89E-01	3,23E-01	1,73E-02	2,43E-01
PCB 114	NA	4,18E-01	1,01E+00	2,16E+00	1,58E+01
PCB 157	1,17E-01	1,52E-01	3,83E-01	2,52E-02	4,33E-01
PCB 189	9,14E-02	9,45E-02	1,44E-01	2,63E-02	6,25E-02
PCB 156	8,21E-02	1,87E-01	5,60E-01	2,54E-02	3,17E-01
PCB 105	9,16E-02	2,47E-01	8,27E-01	4,04E-01	2,72E+00
PCB 118	1,11E-01	3,07E-01	8,64E-01	6,98E-01	4,22E+00
2,3,4,6,7,8-HxCDF	1,87E-02	4,74E-02	5,40E-02	3,64E-02	5,96E-02
2,3,4,7,8-PeCDF	3,89E-02	8,35E-02	1,11E-01	2,84E-02	6,10E-02
2,3,7,8-TCDD	NA	NA	NA	NA	NA
2,3,7,8-TCDF	6,13E-02	1,78E-01	1,06E-01	1,65E-02	7,03E-02
PCB 28	NA	NA	1,85E+00	NA	9,61E+00
PCB 169	NA	NA	NA	NA	NA
PCB 77	7,58E-02	3,47E-01	2,33E-01	1,85E-01	5,72E-01
PCB 126	1,09E-01	1,12E-01	2,83E-02	2,20E-02	4,30E-02
PCB 81	NA	NA	NA	NA	NA
OCDD	1,33E-02	3,02E-02	1,60E-02	3,27E-02	5,33E-02
OCDF	4,49E-03	1,33E-02	4,52E-03	1,07E-02	1,57E-02
PCB 123	1,41E-01	2,27E-01	8,61E-01	1,82E-01	3,35E+00

Valeurs des BCFé pour un sol de maille P4

	Pommes de Terre	Carottes entières	Courgettes	Haricots	Laitues
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	4,01E-03	6,70E-03	1,49E-02	1,76E-04	1,70E-03
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	2,33E-02	3,72E-02	8,23E-02	1,63E-04	3,36E-03
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	8,48E-04	1,90E-03	2,08E-03	2,80E-05	1,04E-04
1,2,3,4,7,8-HxCDD	6,70E-03	1,16E-02	7,32E-02	1,49E-03	3,59E-03
1,2,3,4,7,8-HxCDF	9,70E-03	1,79E-02	1,11E-01	1,19E-04	1,46E-03
1,2,3,6,7,8-HxCDD	7,68E-03	1,36E-02	4,32E-02	8,93E-04	2,88E-03
1,2,3,6,7,8-HxCDF	7,87E-03	1,33E-02	4,14E-02	1,87E-04	1,19E-03
1,2,3,7,8,9-HxCDD	4,72E-03	7,73E-03	2,17E-02	1,38E-03	4,16E-03
1,2,3,7,8,9-HxCDF	NA	NA	NA	NA	NA
1,2,3,7,8-PeCDD	9,46E-03	1,79E-02	1,03E-01	1,19E-03	3,81E-03
1,2,3,7,8-PeCDF	1,80E-02	3,32E-02	1,59E-01	6,24E-04	3,05E-03
PCB 138	4,90E-02	8,05E-02	1,37E+00	8,49E-03	9,64E-02
PCB 180	3,33E-02	4,64E-02	8,40E-01	9,66E-03	2,79E-02
PCB 153	5,88E-02	9,85E-02	1,61E+00	7,04E-03	1,22E-01
PCB 101	4,14E-02	9,13E-02	2,04E+00	3,06E-02	8,38E-01
PCB 52	8,65E-02	5,42E-01	2,78E+00	5,58E-01	5,07E+00
PCB 167	4,22E-02	5,01E-02	7,55E-01	5,14E-03	9,03E-02
PCB 114	5,37E-02	9,67E-02	1,63E+00	5,54E-02	1,60E+00
PCB 157	3,75E-02	4,34E-02	9,10E-01	4,56E-03	1,47E-01
PCB 189	2,36E-02	3,22E-02	2,76E-01	1,46E-03	1,50E-02
PCB 156	3,56E-02	4,69E-02	9,12E-01	5,44E-03	1,25E-01
PCB 105	3,89E-02	5,07E-02	1,01E+00	3,65E-02	8,18E-01
PCB 118	3,47E-02	5,23E-02	1,00E+00	2,07E+00	9,41E-01
2,3,4,6,7,8-HxCDF	6,62E-03	9,21E-03	1,69E-02	1,32E-04	8,54E-04
2,3,4,7,8-PeCDF	1,25E-02	2,09E-02	8,51E-02	1,88E-04	2,32E-03
2,3,7,8-TCDD	1,23E-02	2,54E-02	1,09E-01	3,57E-03	1,57E-02
2,3,7,8-TCDF	2,42E-02	5,46E-02	1,69E-01	2,39E-03	4,21E-03
PCB 28	2,51E-01	8,62E-01	NA	8,50E-01	1,08E+01
PCB 169	1,80E-02	5,66E-02	2,99E-02	1,98E-02	7,80E-02
PCB 77	2,28E-02	4,24E-02	1,85E-01	1,42E-02	2,13E-01
PCB 126	2,67E-02	3,33E-02	4,71E-02	7,51E-04	1,67E-02
PCB 81	3,18E-02	7,62E-02	5,66E-02	6,23E-03	7,53E-02
OCDD	3,29E-03	5,30E-03	1,04E-03	6,71E-04	1,91E-03
OCDF	3,19E-03	5,96E-03	2,91E-03	7,19E-05	4,20E-04
PCB 123	6,27E-02	6,77E-02	7,34E-01	1,31E-02	3,94E-01

Annexe 6 :
Le logiciel MODUL'ERS

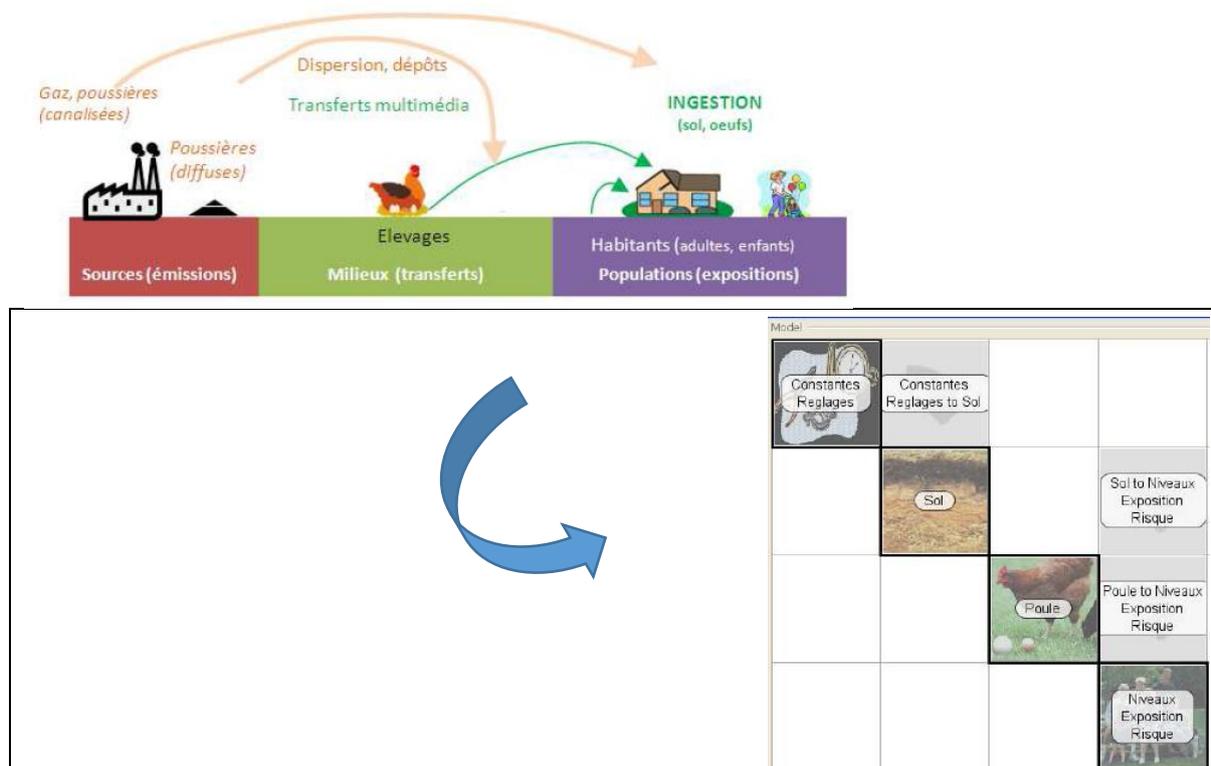
PRESENTATION DU MODELE DE TRANSFERT (MODUL'ERS)

Cet outil de modélisation a été développé sur la base des équations décrites dans le manuel « Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle »¹. Ce document, ayant fait l'objet d'une revue critique par plusieurs relecteurs extérieurs, est disponible sur le site internet de l'INERIS². Il présente les équations utilisées par l'INERIS pour modéliser les concentrations dans les milieux, les doses d'exposition de la population à partir des différentes sources/milieux de l'environnement, et les niveaux de risques attendus en fonction du temps, en s'appliquant à tracer l'origine de ces équations, les hypothèses sur lesquelles elles reposent et leurs limites d'utilisation.

L'utilisation de MODUL'ERS se fait par la connexion de modules représentant les milieux de transfert des polluants (sol, végétaux par exemple) dans la « matrice » reflétant le schéma conceptuel (cf. figure ci-dessous). Ces modules sont paramétrés avec les équations correspondant aux transferts applicables.

Le logiciel distribué par l'INERIS comprend un jeu de modules prédéfinis avec des valeurs de paramètres renseignées par défaut ou proposées à partir de données bibliographiques analysées par l'INERIS³. Les valeurs spécifiques au contexte local, tels que les concentrations et dépôts doivent être renseignées par l'utilisateur.

Cet outil a été conçu en vue d'améliorer les pratiques et la transparence des estimations réalisées dans les études de risques, dans le cadre des missions d'appui de l'INERIS pour le ministère chargé de l'environnement.



Traduction du Schéma Conceptuel d'Exposition des populations à une « matrice » d'exposition sous le logiciel MODUL'ERS

Les modélisations pour cette étude ont été réalisées sur la version 2.0.1 du logiciel avec la bibliothèque de modules v1.2.25.

¹ Rapport d'étude N° DRC-08—94882-16675B ; 01/08/2010 ; Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle

² Dossier thématique INERIS réunissant l'ensemble des documents existants relatif au logiciel MODUL'ERS

³ Les rapports relatifs aux jeux de paramètres font l'objet de rapports qui seront publiés au cours des années 2014-2015.

Annexe 7 :

**Méthodologie pour la recherche et la sélection des Valeurs
Toxicologiques de Référence (VTR)**

La toxicité d'une substance se caractérise par les effets qu'une exposition est susceptible de générer sur la santé humaine. Lorsque que le niveau d'exposition croît, le premier effet sanitaire qui apparaît est appelé *effet critique*. Les VTR permettent de définir la relation quantitative entre un niveau d'exposition et la possibilité ou la probabilité d'apparition de l'effet critique. On parle de « relation dose-effet ».

Les VTR sont établies sur la base d'une analyse des connaissances toxicologiques et épidémiologiques actuellement disponibles.

Selon les mécanismes toxiques mis en jeu, deux types d'effets sanitaires sont considérés :

- **les effets survenant à partir d'un seuil de dose d'exposition.**

Il s'agit des effets non cancérogènes voire cancérogènes non génotoxiques. Dans ce cas, une VTR représente le seuil en-dessous duquel aucun effet sanitaire n'est attendu. Au-delà de ce seuil, un effet sanitaire est possible.

La VTR s'exprime différemment selon la voie d'exposition considérée. Pour une exposition par inhalation, il s'agit d'une Concentration Admissible dans l'Air (CAA), qui s'exprime en masse de substance par mètre cube d'air inhalé (mg/m^3). Pour une exposition par ingestion, il s'agit d'une Dose Journalière Admissible (DJA), qui s'exprime en masse de substance ingérée par jour et par kilogramme de poids corporel ($\text{mg}/\text{kg}_{\text{pc}}/\text{j}$).

- **les effets survenant sans seuil de dose d'exposition.**

Il s'agit des effets cancérogènes mutagènes ou génotoxiques. Dans ce cas, une VTR représente la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu contracte un effet s'il est exposé pendant sa vie entière à une unité de dose de la substance.

La VTR est nommée Excès de Risque Unitaire, par inhalation (ERU_i) ou par voie orale (ERU_o). Elle s'exprime différemment selon la voie d'exposition, dans une unité inverse de celle de l'exposition : en $(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$ pour la voie inhalation et en $(\text{mg}/\text{kg}_{\text{pc}}/\text{j})^{-1}$ pour la voie ingestion.

En France, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a pour mission d'élaborer des VTR. Les VTR construites à ce jour sont présentées sur le site Internet de l'ANSES¹.

Dans le cadre du recensement de VTR d'une ERS, lorsque l'ANSES ne fournit pas de VTR pour certaines substances étudiées, sept bases de données sont recommandées par la Direction Générale de la Santé via la note d'information en date de 31 octobre 2014². Ces bases sont exploitées par les organismes suivants :

- Agence Américaine de Protection de l'Environnement - USEPA³ ;
- Agence Américaine des Substances Toxiques et du Registre des Maladies - ATSDR⁴ ;
- Organisation Mondiale de la Santé - (OMS⁵/IPCS⁶) ;
- Ministère Fédéral Canadien pour la Santé - *Santé Canada*⁷ ;
- Institut National de Santé Publique des Pays-Bas - RIVM⁸ ;
- Bureau Américain pour l'Evaluation des Dangers en Santé Environnementale - OEHHA⁹ ;
- Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA¹⁰).

¹ <http://www.anses.fr/fr/documents/ANSES-Ft-ConstructionVTR.pdf>

² Note d'Information N°DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués.

³ *United States Environmental Protection Agency* - base de données IRIS (*Integrated Risk Information System*) : <https://www.epa.gov/iris>

⁴ *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* - <http://www.atsdr.cdc.gov/mrls/index.asp>

⁵ *Organisation Mondiale de la Santé* - www.who.int/fr

⁶ *International Program on Chemical Safety* - <http://www.inchem.org>

⁷ www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/contaminants/hbct-jact/index-fra.php

⁸ *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu* - <http://www.rivm.nl/>

⁹ *Office of Environmental Health Hazard Assessment* - www.oehha.ca.gov/air/allrels.html

Dans ces bases, lorsque plusieurs VTR existent pour une même substance, une même voie d'exposition et une même durée d'exposition, deux cas de figures sont possibles :

- L'ANSES, l'INERIS ou une autre expertise nationale recommandent un choix de VTR. Dans ce cas, ce choix est retenu pour l'étude, sauf si une valeur plus récente a été publiée par un des organismes cités précédemment.

Les recommandations de l'ANSES figurent sur son site Internet¹¹.

Les recommandations de l'INERIS figurent dans les *Fiches de Données Toxicologiques et Environnementales* (FDTE) disponibles sur le *Portail Substances Chimiques* de l'INERIS¹².

- Aucune recommandation de l'ANSES ou de l'INERIS n'est disponible pour la substance étudiée. Dans ce cas, la note d'information de la DGS et de la DGPR N°DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 recommande de « sélectionner la VTR la plus récente parmi les trois bases de données : US-EPA, ATSDR ou OMS ». Si aucune VTR n'est trouvée dans ces bases, la « dernière VTR proposée par Santé Canada, le RIVM, l'OEHHA ou l'EFSA » doit être sélectionnée.

¹⁰ *European Food Safety Authority* - <http://www.efsa.europa.eu/fr/>

¹¹ <http://www.anses.fr/fr/documents/ANSES-Ft-SelectionVTR.pdf>

¹² <http://www.ineris.fr/substances/fr/page/21>

Les VTR pour l'ingestion retenues pour cette étude sont recensées dans le tableau ci-dessous.

Substance	Type d'effet	Voie d'exposition	Valeur de référence	Source, Année de révision	Origine de la valeur retenue	Matrice expérimentation VTR
PCDD/F et PCB-DL (1746-01-6)	à seuil	orale	$7 \cdot 10^{-10}$ mg TEQ.kg ⁻¹ .j ⁻¹	USEPA 2012	Choix INERIS 2013	Mocarelli et al, étude épidémiologique chez nouveaux nés, SEVSO Italie
PCDD/F et PCB-DL	Sans seuil	orale	Pas de valeur retenue	/	Selon recommandations OMS et DGS 1998*	/
PCBi (PCB-NDL)	à seuil	orale	$1 \cdot 10^{-5}$ mg.kg ⁻¹ .j ⁻¹	AFSSA 2010	Choix INERIS 2013 Sur 6 ou 7 PCB indicateurs ***	209 congénères ATSDR 2000 **, chez le singe (absorption de capsule de PCB)
PCBi (1336-36-3)	Sans seuil	orale	2 (mg.kg ⁻¹ .j ⁻¹) ⁻¹	USEPA 1997	Trois valeurs disponibles à l'USEPA, valeur majorante retenue, risques et persistance élevés	Brunner et al., 1996; Norback and Weltman, 1985 – RAT - alimentation sur Aroclors 1260 et 1254. (prend en compte l'exposition depuis l'enfance)

*<http://www.ineris.fr/substances/fr/substance/getDocument/9721>

** ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2000. Toxicological profile for Polychlorinated biphenyls (PCBs), 948 p → trouver (20 ng/kg/j et donc AFSSA estime que PCBi représente 50% des PCB totale et divise donc par 2)

*** VTR adapté pour les 6 ou 7 PCBi car ajout du 118 ne change pas les environ 50% représentés par les autres PCB sur les PCB totaux

Annexe 8 :

**Evaluation de l'exposition – DJE pour les PCDDF et PCB_{-DL}
selon TEF OM98 et 2005**

Dose Journalière d'Exposition aux PCDD/F et PCB-DL (en mg TEQ OMS/kg pc*/j) par voies d'ingestion pour les différentes classes d'âge, pour une exposition à des sols P1 et P4

Selon le référentiel OMS 1998 (cf. Annexe 1)

PCDD/F et PCB-DL 29 congénères	Classes d'âge (en années)						
	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 11	11 - 15	15 - 18	18 - 70
DJE par ingestion de sol (mg TEQ OMS/kg pc*/j)							
Maille P1	3,0E-11	1,8E-11	1,3E-11	4,3E-12	2,6E-12	2,1E-12	1,8E-12
Maille P4	3,4E-09	2,1E-09	1,5E-09	5,0E-10	3,0E-10	2,4E-10	2,0E-10
DJE par ingestion de végétaux (mg TEQ OMS/kg pc*/j)							
Maille P1	9,0E-11	1,2E-10	5,9E-11	3,7E-11	2,8E-11	2,3E-11	2,1E-11
Maille P4	2,0E-09	2,5E-09	1,3E-09	7,9E-10	5,9E-10	4,8E-10	4,5E-10
DJE par ingestion de sol et de végétaux (mg TEQ OMS/kg pc*/j)							
Maille P1	1,2E-10	1,4E-10	7,2E-11	4,1E-11	3,1E-11	2,5E-11	2,3E-11
Maille P4	5,4E-09	4,6E-09	2,7E-09	1,3E-09	8,9E-10	7,2E-10	6,6E-10

*kg pc : kilogramme de poids corporel

Selon le référentiel OMS 2005 (cf. Annexe 1)

PCDD/F et PCB-DL 29 congénères	Classes d'âge (en années)						
	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 11	11 - 15	15 - 18	18 - 70
DJE par ingestion de sol (mg TEQ OMS/kg pc*/j)							
Maille P1	3,0E-11	1,8E-11	1,3E-11	4,3E-12	2,6E-12	2,1E-12	1,8E-12
Maille P4	2,9E-09	1,8E-09	1,2E-09	4,2E-10	2,6E-10	2,0E-10	1,7E-10
DJE par ingestion de végétaux (mg TEQ OMS/kg pc*/j)							
Maille P1	7,6E-11	1,0E-10	5,1E-11	3,2E-11	2,4E-11	2,0E-11	1,8E-11
Maille P4	1,7E-09	2,1E-09	1,1E-09	6,6E-10	5,0E-10	4,1E-10	3,8E-10
DJE par ingestion de sol et de végétaux (mg TEQ OMS/kg pc*/j)							
Maille P1	1,1E-10	1,2E-10	6,3E-11	3,6E-11	2,7E-11	2,2E-11	1,9E-11
Maille P4	4,6E-09	3,9E-09	2,3E-09	1,1E-09	7,5E-10	6,1E-10	5,5E-10

*kg pc : kilogramme de poids corporel

Annexe 9 :

Evaluation de l'exposition – DJE par voies d'exposition et congénères pour les adultes et les enfants de 1 à 3 ans exposés à un sol P4

Adultes – Exposition à un sol de maille P4

Dose Journalière d'Exposition exprimée en mg/kg pc/j

Substances	DJE ingestion végétaux	DJE ingestion sol	DJE ingestion globale
PCB81	9,6E-11	1,5E-11	1,1E-10
PCB28	0,0E+00	1,2E-10	1,2E-10
PCB169	9,8E-11	3,6E-11	1,3E-10
PCB123	6,2E-10	3,5E-11	6,5E-10
PCB126	6,0E-10	1,5E-10	7,5E-10
PCB114	7,4E-10	1,8E-11	7,6E-10
PCB189	6,3E-10	1,4E-10	7,7E-10
PCB157	1,3E-09	1,3E-10	1,5E-09
PCB77	1,6E-09	1,6E-10	1,8E-09
PCB167	3,8E-09	3,9E-10	4,2E-09
PCB156	5,5E-09	5,5E-10	6,1E-09
PCB105	1,4E-08	5,9E-10	1,5E-08
PCB52	2,9E-08	2,2E-10	2,9E-08
PCB118	3,7E-08	1,4E-09	3,8E-08
PCB101	4,0E-08	1,6E-09	4,2E-08
PCB180	3,7E-08	5,1E-09	4,2E-08
PCB138	8,7E-08	6,6E-09	9,4E-08
PCB153	1,1E-07	7,0E-09	1,1E-07
123789_HxCDF	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
2378_TeCDD	5,2E-12	2,5E-12	7,7E-12
12378_PeCDD	1,9E-11	1,1E-11	3,0E-11
123478_HxCDD	1,7E-11	1,5E-11	3,2E-11
123789_HxCDD	1,4E-11	1,9E-11	3,3E-11
123678_HxCDD	3,5E-11	2,9E-11	6,4E-11
1234789_HpCDF	2,4E-11	1,8E-10	2,0E-10
123678_HxCDF	1,9E-10	1,6E-10	3,5E-10
234678_HxCDF	1,8E-10	1,8E-10	3,6E-10
1234678_HpCDD	1,7E-10	2,6E-10	4,3E-10
23478_PeCDF	2,9E-10	1,4E-10	4,4E-10
12378_PeCDF	4,5E-10	1,4E-10	5,9E-10
123478_HxCDF	4,5E-10	2,6E-10	7,0E-10
OCDD	2,3E-10	5,1E-10	7,5E-10
2378_TeCDF	6,8E-10	1,6E-10	8,4E-10
OCDF	4,3E-10	9,3E-10	1,4E-09
1234678_HpCDF	3,0E-09	8,6E-10	3,9E-09

Enfants (1 à 3 ans) – Exposition à un sol de maille P4

Dose Journalière d'Exposition exprimée en mg/kg pc/j

Substances	DJE ingestion végétaux	DJE ingestion sol	DJE ingestion globale
PCB81	5,7E-10	1,5E-10	7,2E-10
PCB169	4,9E-10	3,6E-10	8,6E-10
PCB28	0,0E+00	1,2E-09	1,2E-09
PCB123	3,1E-09	3,6E-10	3,4E-09
PCB114	3,6E-09	1,8E-10	3,8E-09
PCB189	3,3E-09	1,5E-09	4,7E-09
PCB126	3,4E-09	1,6E-09	5,0E-09
PCB157	6,4E-09	1,3E-09	7,7E-09
PCB77	8,1E-09	1,7E-09	9,8E-09
PCB167	1,8E-08	4,0E-09	2,2E-08
PCB156	2,6E-08	5,6E-09	3,2E-08
PCB105	6,7E-08	6,0E-09	7,3E-08
PCB52	1,2E-07	2,2E-09	1,2E-07
PCB118	1,7E-07	1,4E-08	1,9E-07
PCB101	1,8E-07	1,7E-08	2,0E-07
PCB180	1,8E-07	5,2E-08	2,3E-07
PCB138	4,2E-07	6,7E-08	4,9E-07
PCB153	5,2E-07	7,1E-08	5,9E-07
123789_HxCDF	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
2378_TeCDD	3,0E-11	2,5E-11	5,5E-11
12378_PeCDD	1,0E-10	1,1E-10	2,2E-10
123478_HxCDD	9,3E-11	1,5E-10	2,4E-10
123789_HxCDD	8,1E-11	2,0E-10	2,8E-10
123678_HxCDD	2,0E-10	3,0E-10	5,0E-10
1234789_HpCDF	1,5E-10	1,9E-09	2,0E-09
123678_HxCDF	1,1E-09	1,6E-09	2,7E-09
234678_HxCDF	1,0E-09	1,9E-09	2,9E-09
23478_PeCDF	1,6E-09	1,5E-09	3,1E-09
1234678_HpCDD	9,6E-10	2,7E-09	3,7E-09
12378_PeCDF	2,5E-09	1,5E-09	3,9E-09
123478_HxCDF	2,4E-09	2,6E-09	5,1E-09
2378_TeCDF	3,9E-09	1,6E-09	5,5E-09
OCDD	1,4E-09	5,3E-09	6,7E-09
OCDF	2,6E-09	9,6E-09	1,2E-08
1234678_HpCDF	1,7E-08	8,8E-09	2,6E-08

Annexe 10 :

**Etude 1 – DJE par végétaux pour des enfants de 1 à 3 ans
exposés à un sol P1 et P4**

Adulte – Exposition par ingestion de végétaux cultivés sur des sols de mailles P1 et P4

Dose Journalière d'Exposition exprimée en mg/kg pc/j

Substances	DJE par ingestion de végétaux cultivés sur P1	DJE par ingestion de végétaux cultivés sur P4
PCB28	0,0E+00	0,0E+00
PCB81	0,0E+00	9,6E-11
PCB169	0,0E+00	9,8E-11
PCB126	1,1E-10	6,0E-10
PCB123	2,2E-10	6,2E-10
PCB189	1,4E-10	6,3E-10
PCB114	1,1E-10	7,4E-10
PCB157	2,5E-10	1,3E-09
PCB77	1,1E-10	1,6E-09
PCB167	7,1E-10	3,8E-09
PCB156	9,8E-10	5,5E-09
PCB105	4,1E-09	1,4E-08
PCB52	0,0E+00	2,9E-08
PCB118	1,3E-08	3,7E-08
PCB180	6,5E-09	3,7E-08
PCB101	1,2E-08	4,0E-08
PCB138	1,8E-08	8,7E-08
PCB153	2,9E-08	1,1E-07
123789_HxCDF	0,0E+00	0,0E+00
2378_TeCDD	0,0E+00	5,2E-12
123789_HxCDD	0,0E+00	1,4E-11
123478_HxCDD	0,0E+00	1,7E-11
12378_PeCDD	0,0E+00	1,9E-11
1234789_HpCDF	1,1E-13	2,4E-11
123678_HxCDD	0,0E+00	3,5E-11
1234678_HpCDD	6,2E-12	1,7E-10
234678_HxCDF	5,5E-13	1,8E-10
123678_HxCDF	7,3E-13	1,9E-10
OCDD	0,0E+00	2,3E-10
23478_PeCDF	8,1E-12	2,9E-10
OCDF	1,0E-12	4,3E-10
123478_HxCDF	8,7E-12	4,5E-10
12378_PeCDF	8,1E-12	4,5E-10
2378_TeCDF	1,8E-11	6,8E-10
1234678_HpCDF	4,6E-11	3,0E-09

Enfants (1 à 3 ans) – Exposition par ingestion de végétaux cultivés sur des sols de mailles P1 et P4

Dose Journalière d'Exposition exprimée en mg/kg pc/j

Substances	DJE par ingestion de végétaux cultivés sur P1	DJE par ingestion de végétaux cultivés sur P4
PCB28	0,0E+00	0,0E+00
PCB169	0,0E+00	4,9E-10
PCB81	0,0E+00	5,7E-10
PCB123	1,1E-09	3,1E-09
PCB189	8,0E-10	3,3E-09
PCB126	6,3E-10	3,4E-09
PCB114	5,9E-10	3,6E-09
PCB157	1,4E-09	6,4E-09
PCB77	7,8E-10	8,1E-09
PCB167	4,1E-09	1,8E-08
PCB156	5,6E-09	2,6E-08
PCB105	1,8E-08	6,7E-08
PCB52	0,0E+00	1,2E-07
PCB118	5,5E-08	1,7E-07
PCB180	3,8E-08	1,8E-07
PCB101	6,0E-08	1,8E-07
PCB138	1,0E-07	4,2E-07
PCB153	1,6E-07	5,2E-07
123789_HxCDF	0,0E+00	0,0E+00
2378_TeCDD	0,0E+00	3,0E-11
123789_HxCDD	0,0E+00	8,1E-11
123478_HxCDD	0,0E+00	9,3E-11
12378_PeCDD	0,0E+00	1,0E-10
1234789_HpCDF	1,2E-12	1,5E-10
123678_HxCDD	0,0E+00	2,0E-10
1234678_HpCDD	4,0E-11	9,6E-10
234678_HxCDF	6,0E-12	1,0E-09
123678_HxCDF	7,9E-12	1,1E-09
OCDD	0,0E+00	1,4E-09
23478_PeCDF	4,9E-11	1,6E-09
123478_HxCDF	5,2E-11	2,4E-09
12378_PeCDF	5,3E-11	2,5E-09
OCDF	1,4E-11	2,6E-09
2378_TeCDF	1,2E-10	3,9E-09
1234678_HpCDF	2,7E-10	1,7E-08

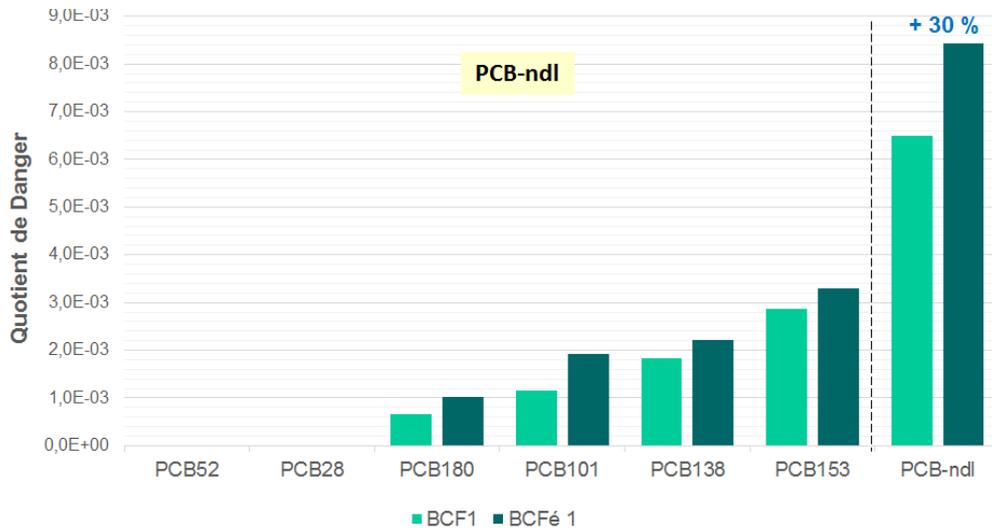
Annexe 11

**Etude de sensibilité 3 – Représentations graphiques des
QD selon les BCF et les BCF_E**

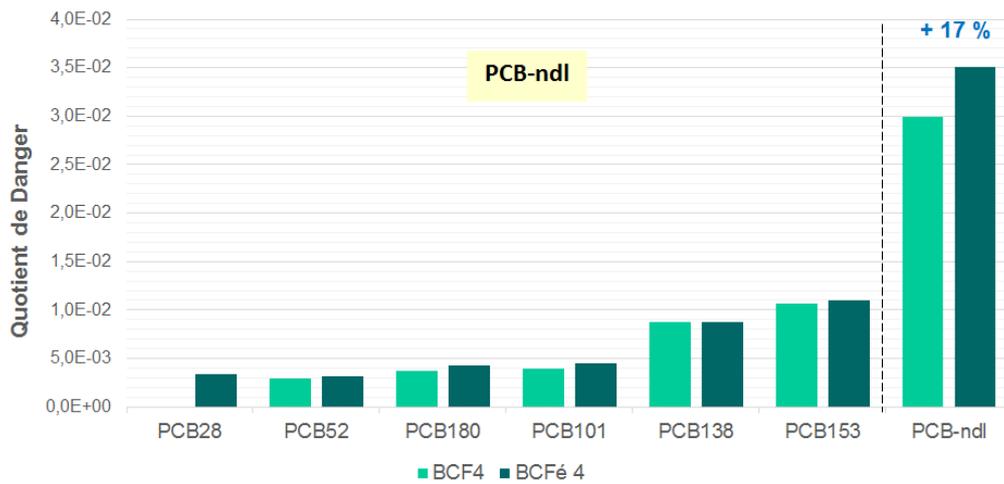
Exposition aux végétaux d'un sol issu de la maille P1

PCB-ndl

a) Quotient de danger pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P1



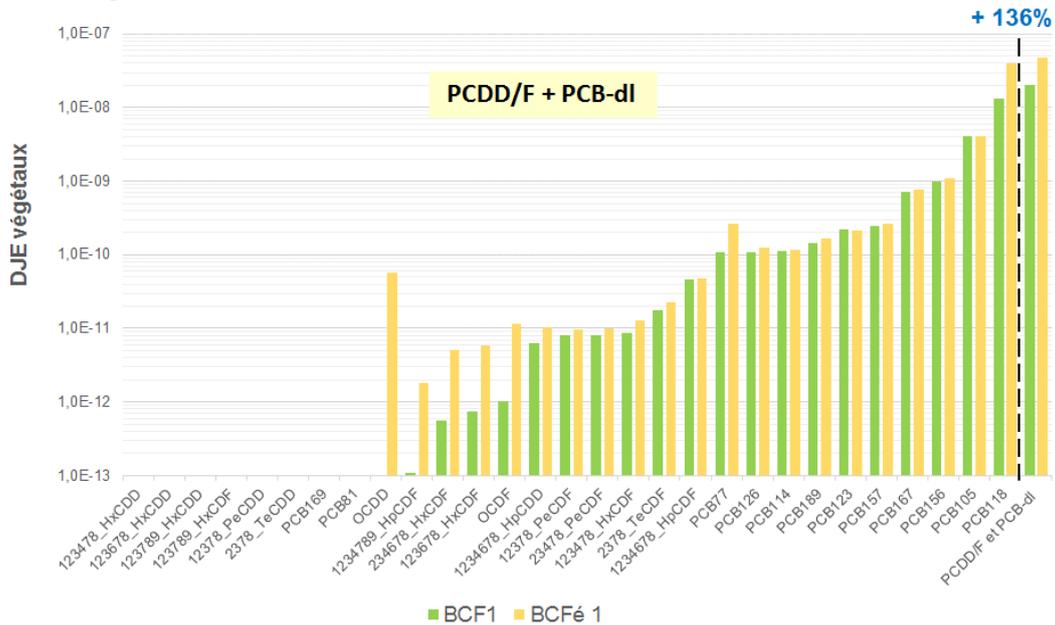
b) Quotient de danger pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P4



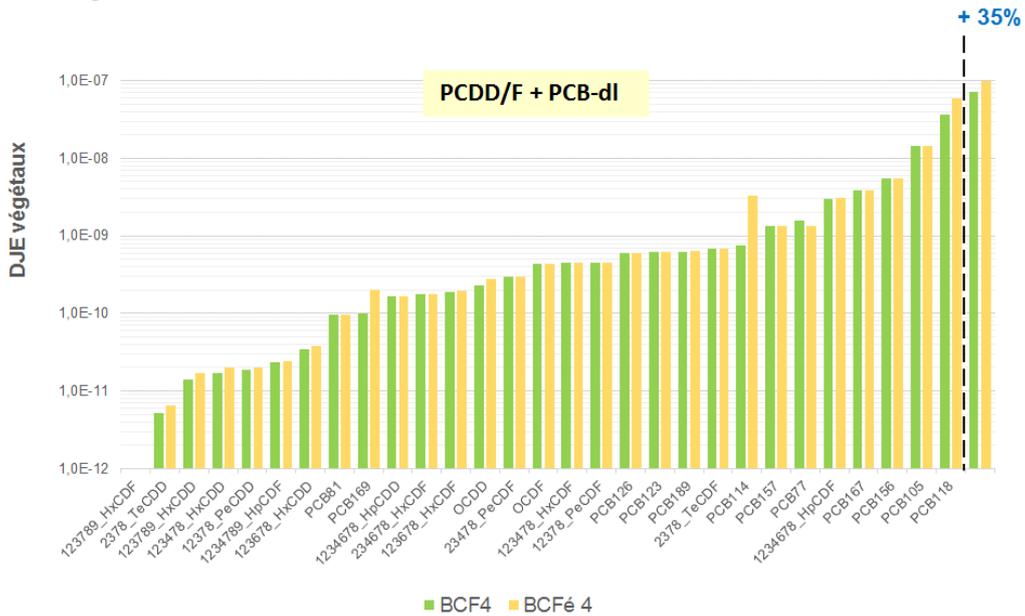
Risques à seuil pour une exposition aux PCB-ndl d'adultes par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)

PCDD/F + PCB-dl

a) Dose Journalière d'Exposition (DJE, en mg/kg pc/j) pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P1

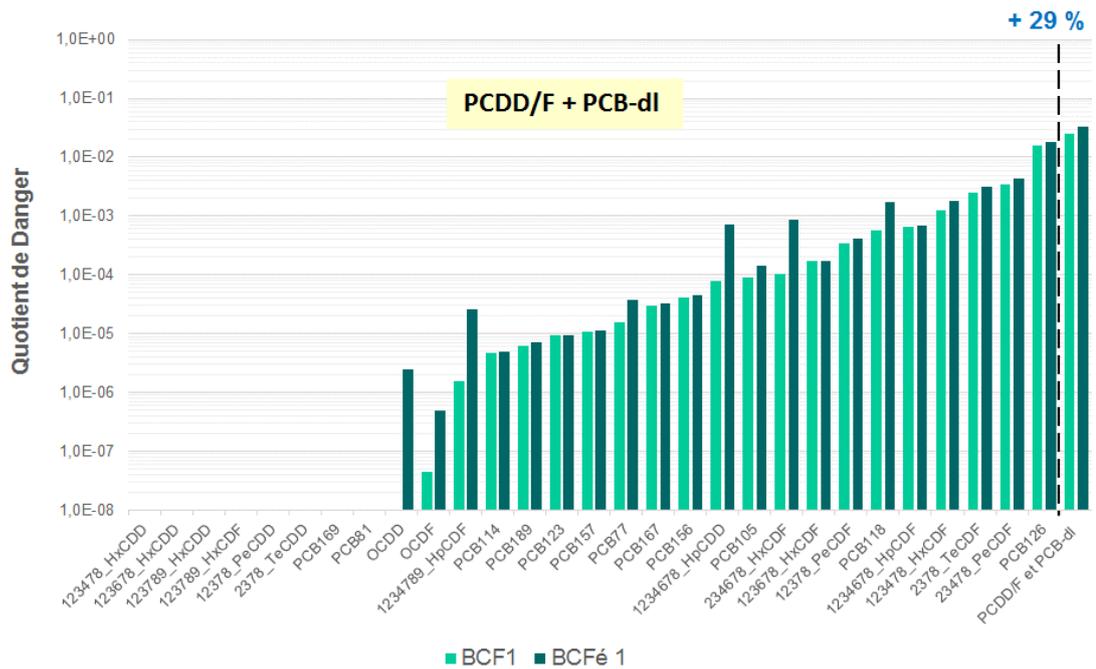


b) Dose Journalière d'Exposition (DJE, en mg/kg pc/j) pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P4

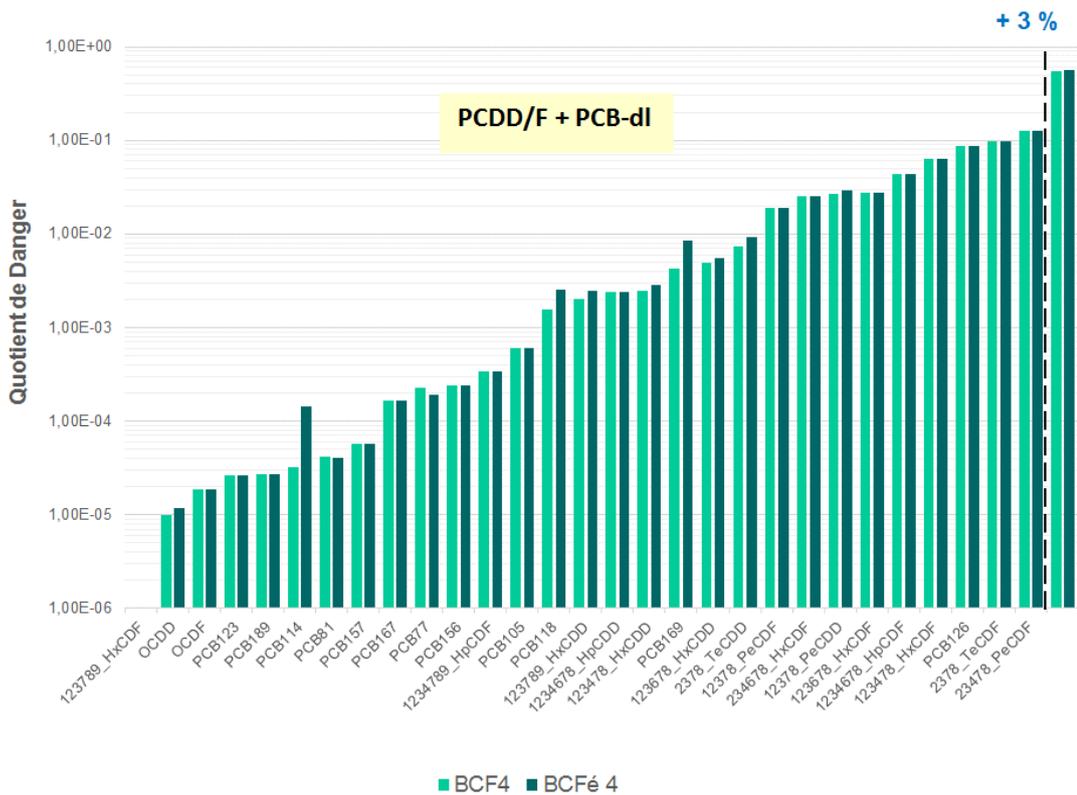


Exposition aux PCDD/F d'adultes par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)

a) Quotient de danger pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P1



b) Quotient de danger pour une exposition par ingestion de végétaux cultivés sur un sol P4



Risques à seuil pour une exposition aux PCDD/F d'adultes de 1 à 3 ans par ingestion de végétaux à a) un sol P1 b) un sol P4 et ce, pour divers facteurs de transferts sol-plantes (BCF et BCFé)

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





TROPHÉ

LIVRABLE N°3 - Evaluation des expositions et des risques sanitaires chez l'Homme

Résumé Les polychlorobiphényles (PCB) et les dioxines/furannes (PCDD/PCDF) présentent un potentiel important d'accumulation dans les sols, les sédiments et les graisses animales. Se pose alors la question du risque sanitaire pour le consommateur jardinier, travaillant la terre de son potager et consommant les fruits et légumes cultivés.

Le livrable 3 utilise les BCF expérimentaux déterminés sur les végétaux potagers (livrables 1 et 2) pour évaluer *in fine* les risques sanitaires liés au jardinage et à la consommation de végétaux auto-produits.

L'exposition globale des adultes et des enfants est évaluée au travers du logiciel MODUL'ERS (ingestion de sol et de végétaux). L'exposition diffère selon les POP, en notant une exposition par ingestion de végétaux plus grande pour les PCB-ndl que pour les PCB-dl et PCDD/F, pour les adultes et les enfants. L'exposition aux PCB se fait majoritairement via l'ingestion de végétaux alors que l'exposition aux PCDD/F se partage entre l'ingestion de sol et de végétaux auto-produits.

Pour l'ingestion de sol, l'étude de sensibilité montre l'influence de la quantité ingérée retenue et de la concentration des polluants organiques sur la fraction adhérente aux mains, et dans une moindre mesure, celle de la biodisponibilité relative des PCB-ndl (> 80%).

Quant à la consommation de végétaux, l'exposition diffère selon les classes d'âge, en raison du bol alimentaire spécifique et d'une contribution de chaque congénère variable en fonction du végétal considéré, avec une proportion plus élevée de PCB apportés par l'alimentation.

Concernant le risque, ce sont majoritairement les PCDD/F et le PCB126 qui tirent le risque sanitaire (Figure 2), en raison des valeurs toxicologiques élevées alors que ces polluants sont peu transférés dans les végétaux par rapport aux autres PCB.

Essentiel à retenir

L'exposition globale du consommateur jardinier est davantage liée à la présence des PCB dans les sols et à leur transfert dans les végétaux par rapport aux PCDD/F. En revanche le risque sanitaire est majoritairement porté par les PCDD/F et le PCB126 (PCB-dioxin like à 5 atomes de chlore), en raison de leur forte toxicité.

ADEMEAgence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energiewww.ademe.fr