

OCT.
2017

TROPHÉ

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

Livrable n°5 : Approche graduée
exemplifiée pour l'évaluation de
l'empoisonnement secondaire

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 :

Nicolas Pucheux, Rédaction

Sandrine Andres, Vérification

Eric Thybaud, Approbation

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, INERIS. 2017. TROPHé : Approche graduée exemplifiée pour l'évaluation de l'empoisonnement secondaire - Rapport. 27 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-17-138302-09471A

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

I	Introduction.....	8
II	Comparaison des modélisations pour l'évaluation de l'exposition des prédateurs.....	10
1.	Description des approches utilisées.....	10
1.1	L'approche générique	10
1.2	L'approche de TerraSys.....	11
1.3	BCF mesurés et BCF calculés.....	14
1.4	Résultats.....	15
2.	Comparaison des concentrations d'exposition calculées pour les prédateurs en fonction des modèles	17
3.	Comparaison des ratios de transfert Sol/Prédateur en fonction du modèle	19
3.1	Méthode de TerraSys	20
3.2	Méthode générique.....	20
4.	Synthèse de la comparaison des résultats	21
5.	Recommandations pour l'utilisation de ces différents modèles.....	21
III	Références	23



Table des Figures

FIGURE 1: MODELE CONCEPTUEL D'EXPOSITION SELON L'APPROCHE DECRITE DANS LES DOCUMENTS DE L'ECHA, ADAPTE DE MOERMOND AND VERBRUGGEN 2013.	10
FIGURE 2: MODELE CONCEPTUEL D'EXPOSITION SELON L'APPROCHE DANS TERRASYS	12
FIGURE 3 : COMPARAISON DES BCF CALCULES ET MESURES.....	15
FIGURE 4 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS D'EXPOSITION CALCULEES SELON LE MODELE UTILISE ((MODELE DE L'ECHA)/[TERRASYS] EN ECHELLE LOG)	17
FIGURE 5 : TRANSFERT DE LA SUBSTANCE DU SOL AU PREDATEUR SELON TERRASYS	20
FIGURE 6 : TRANSFERT DE LA SUBSTANCE DU SOL AU PREDATEUR SELON LA METHODE GENERIQUE	21

Table des Tableaux

TABLEAU 1: TABLEAU DES VALEURS DE FCM UTILISES PAR LE LOGICIEL TERRASYS	13
TABLEAU 2 : CONCENTRATIONS D'EXPOSITION DES PREDATEURS CALCULEES PAR LES DIFFERENTS MODELES.....	16
TABLEAU 3: LOGKOW ET FBT DES SUBSTANCES.....	19
TABLEAU 4 : CRITERES QUI DIFFERENTIENT L'UTILISATION DES DEUX APPROCHES DU POINT DE VUE DE L'EVALUATEUR	22

Annexes

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DE LA DIETE ET DES RELATIONS TROPHIQUES DANS LE RESEAU TROPHIQUE COMPLEXE



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'Evaluation 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 5

Le livrable 5 a pour objet d'exemplifier l'évaluation du risque pour les écosystèmes du point de vue de l'empoisonnement secondaire par l'utilisation de deux méthodes différentes : la méthode suivie dans les documents guides de l'ECHA et celle suivie par le logiciel d'évaluation du risque TerraSys.

Ces deux approches sont utilisées sur le site de Saint Cyprien, les données expérimentales obtenues sur le transfert des PCB et PCDD/F, tels que les BCF, et les concentrations mesurées dans les sols de ces mêmes substances lors des phases précédentes du projet TROPHé sont utilisées comme données d'entrée.

La démarche suivie par ces deux modèles est similaire en théorie (calculer la fraction transférée à chaque étape du réseau trophique pour modéliser l'empoisonnement secondaire des vertébrés supérieurs) et le risque est estimé pour une chaîne alimentaire modèle simple de type milieu/proie/prédateur. Cependant, alors que la méthode décrite dans les documents de l'ECHA considère un prédateur indéterminé, décrit par des paramètres génériques, la méthode TerraSys, plutôt adaptée à un contexte local, considère des espèces bien définies. Dans cet exercice, un même écosystème simplifié est comparé, avec pour Terrasys, la chaîne trophique : vers de terre => faisan => renard roux, ce dernier représentant un niveau trophique additionnel, le prédateur supérieur du système.

En considérant les BCF obtenus pendant la phase expérimentale et les concentrations moyennes mesurées dans les sols, la méthode décrite dans les documents de l'ECHA présente des concentrations d'exposition du prédateur presque systématiquement supérieures à celles calculées avec le logiciel TerraSys. L'inverse n'est observé que pour trois des PCDD/F parmi les plus lourdes. De plus la méthode décrite dans les documents de l'ECHA prévoit des concentrations dans les organismes vivants égales ou supérieures à celles du sol pour 13 des 34 substances, contre une seule si la modélisation est réalisée avec TerraSys.

Au cours de cette étude, il a été remarqué deux différences significatives entre les méthodes :

- La première concerne la façon dont sont calculés les BCF. En effet, chaque méthode propose une équation différente, mais en théorie similaire, permettant de déterminer le BCF depuis le coefficient de partage Kow de la substance. Pourtant, quantitativement, les résultats obtenus avec la méthode décrite dans les documents de l'ECHA (qui fait intervenir la notion de concentration dans l'eau interstitielle du sol) sont supérieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux calculés sous TerraSys. Les BCF obtenus durant la phase expérimentale du projet sont situés entre les deux.
- La seconde vient du fait que seule la méthode utilisée par TerraSys tente de modéliser la fraction transmise depuis la proie au prédateur et le phénomène de bioamplification. La méthode générique pour les écosystèmes terrestres² considère de son côté que passé le niveau du premier consommateur, le ratio de concentration proie/prédateur reste de 1.

² Ce n'est pas le cas pour les écosystèmes aquatiques



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.

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 Polluants Organiques Persistants (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 et Terrasys, développé par SANEXEN et 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 correspondant au Livrable n°5. Il a pour objet d'exemplifier l'évaluation du risque pour les écosystèmes du point de vue de l'empoisonnement secondaire par l'utilisation de deux méthodes différentes. L'empoisonnement secondaire correspond à l'exposition d'un organisme à une substance chimique par la consommation de proies contaminées. L'évaluation du risque pour l'environnement lié à l'empoisonnement secondaire cible donc les prédateurs présents dans un écosystème et les substances chimiques bioaccumulables qui y sont introduites.

La méthode d'évaluation du risque pour les écosystèmes décrite dans les documents guides de l'ECHA (ECHA 2008, ECHA 2010) fait référence dans le cadre de l'application de la réglementation REACH. Elle consiste à caractériser le risque par un ratio comparant une concentration d'exposition du milieu (PEC pour Predicted Exposure Concentration) et une concentration sans effet supposé sur les organismes (PNEC pour Predicted No Effect Concentration). Pour l'empoisonnement secondaire, la PEC correspond à la concentration à laquelle le prédateur est exposé par sa nourriture et la PNEC est la concentration dans ses proies au-dessus de laquelle il pourrait subir des effets néfastes. Dans ce contexte, l'empoisonnement secondaire est estimé selon deux scénarios « génériques » (non spécifié) qui représentent une chaîne trophique simplifiée, l'une lorsque la source de l'exposition est aquatique, l'autre terrestre. En pratique, le prédateur modèle est un oiseau ou un mammifère non caractérisé dont la voie de contamination est la consommation de poisson ou de vers de terre. Sa position en bout de chaîne alimentaire est censée l'exposer au maximum aux contaminants bioaccumulables. Ces scénarios d'exposition nécessitent relativement peu de données d'entrée puisqu'il n'est pas nécessaire de caractériser un site d'étude mais en conséquence peuvent largement différer d'un contexte local.

La méthode d'évaluation du risque portée par le logiciel TerraSys fonctionne sur le même principe d'opposer une concentration d'exposition des milieux avec des valeurs de références écotoxicologiques mais son utilisation est tournée vers l'évaluation du risque sur un site bien déterminé. Il nécessite des données d'entrée plus conséquentes. Il faut notamment, au moyen d'un modèle conceptuel, identifier une espèce ou un groupe d'espèces qui constitueront les objectifs de protection de l'évaluation et renseigner les voies d'exposition qui vont l'affecter dont la voie alimentation/prédation.

Des travaux menés en 2013 avaient déjà conduit à comparer les résultats du calcul de l'exposition pour le prédateur obtenus avec ces deux méthodes. Le but était d'apprécier l'impact que peut avoir sur les résultats le niveau de détail des informations utilisées pour une évaluation du risque. La première méthode considère une approche générale (et *a priori* protectrice), elle fait appel au logiciel de modélisation EUSES 2.1.2 qui reprend les principes décrits dans les documents guide de l'ECHA. La



seconde méthode prend en compte les spécificités d'un site et est mise en œuvre avec le logiciel TerraSys qui permet de caractériser le prédateur cible de la contamination en choisissant son espèce, la composition de sa diète et la dimension de son aire de chasse. Les résultats, exploités lors de la réalisation du poster « Inclusion of trophic network variability in regulatory environmental risk assessment » présenté au congrès SETAC 2013 de Glasgow (voir en annexe), soulignaient que plus les conditions du scénario d'exposition étaient documentées, moins les concentrations d'exposition calculées étaient élevées, que la méthode décrite dans les documents de l'ECHA, palliait le plus grand nombre d'incertitudes introduites dans les calculs par une marge de sécurité sur ses résultats.

Dans le cadre du projet TROPhé, le même exercice est réalisé cette fois en utilisant les concentrations en PCB et PCDD/F mesurées sur le site de Saint-Cyprien et les données concernant le transfert de ces substances obtenues durant la phase expérimentale (INERIS 2017).



II Comparaison des modélisations pour l'évaluation de l'exposition des prédateurs

1. Description des approches utilisées

1.1 L'approche générique

L'approche générale décrite dans les guides de l'ECHA considère un prédateur générique de l'écosystème, dont l'espèce n'est pas déterminée, exposée par le sol.

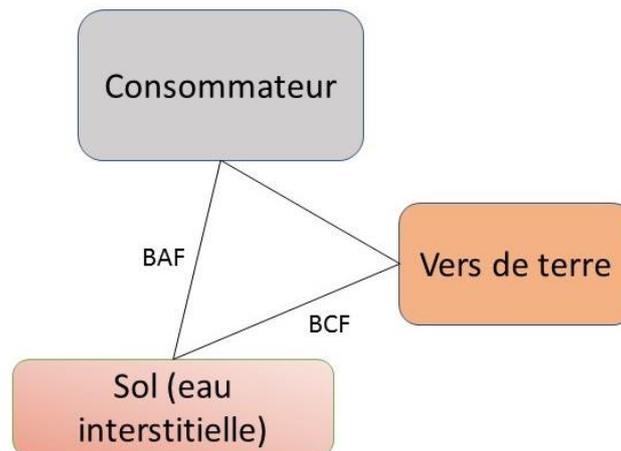


Figure 1: Modèle conceptuel d'exposition selon l'approche décrite dans les documents de l'ECHA, adapté de Moermond and Verbruggen 2013.

Avec BCF : facteur de bioconcentration, le rapport entre la concentration dans les tissus d'un organisme et dans le milieu contaminé (le transfert se fait par diffusion/transport du milieu vers l'organisme).

BAF : facteur de bioaccumulation, le rapport entre la concentration dans la chair d'un organisme et dans le milieu contaminé (le transfert se fait par diffusion du milieu vers l'organisme et via l'alimentation de proies contaminées vivant dans ce milieu).

La concentration d'exposition du prédateur s'obtient avec une équation présentée dans les documents techniques (ECHA 2008, ECHA 2010) encadrant la méthode générique :

$$[\text{proie}] = \frac{BCF_{\text{ver de terre}} \cdot C_{\text{eau interstitielle}} \cdot W_{\text{ver de terre}} + C_{\text{sol}} \cdot W_{\text{boyaux}}}{W_{\text{ver de terre}} + W_{\text{boyaux}}}$$

Avec :

[proie], la concentration dans le ver en mg/kg de ver frais

$BCF_{\text{ver de terre}}$, le facteur de bioconcentration obtenu prenant en compte la concentration de la substance dans l'eau interstitielle

$C_{\text{eau interstitielle}}$, la concentration de la substance dans l'eau interstitielle du sol en mg/L

C_{sol} , la concentration totale de la substance dans le sol en mg/kg poids frais

$W_{\text{ver de terre}}$, le poids de la chair de vers de terre en kg de poids frais

W_{intestin} , le poids du contenu des intestins en kg de poids frais.

Sachant que,

$$W_{\text{boyaux}} = \frac{W_{\text{ver de terre}} \cdot F_{\text{intestin}} \cdot RHO_{\text{sol}}}{F_{\text{solide}} \cdot RHO_{\text{solide}}}$$



Avec :

F_{solide} , la fraction en volume de solide dans le sol (valeur par défaut : 0,6)

F_{intestin} , la fraction de contenu des intestins sur le poids du ver de terre (valeur par défaut : 0,1)

RHO_{solide} la densité de la phase solide (valeur par défaut : 2500)

RHO_{sol} la densité d'un sol humide (valeur par défaut : 1700)

Pour calculer la concentration dans l'alimentation du prédateur (le consommateur dans la Figure 1) les documents de l'ECHA prennent en compte deux variables principales :

- la fraction de contaminant du sol qui est transférée dans la chair du ver de terre, déterminée par le $BCF_{\text{vers de terre}}$,
- la quantité de sol contaminé présente dans le tube digestif du vers au moment où il est consommé par le prédateur.

Les valeurs obtenues pendant la première phase de TROPHÉ ne comprennent pas les mesures de la concentration interstitielle du sol en PCB et PCDD/F. Pour pouvoir utiliser les données obtenues lors de la phase expérimentale du projet TROPHÉ (voir 1.3), le BCF mesuré est obtenu selon l'équation : $BCF = C_{\text{ver de terre}} / C_{\text{sol}}$. Ces deux concentrations mesurées sont disponibles et les BCF obtenus correspondent aux BCF discutés dans les autres livrables du projet. Il est à noter que si le BCF avait été calculé avec la formule $BCF = C_{\text{ver de terre}} / C_{\text{eau interstitielle}}$, sa valeur aurait été beaucoup plus importante, notamment dans le cas de substances fortement hydrophobes comme c'est le cas ici. Les valeurs moyennes de C_{sol} et $BCF_{\text{ver de terre}}$ (toutes parcelles confondues) sont retenues pour la suite de la modélisation. Ces valeurs sont également utilisées avec le modèle utilisé dans TerraSys.

De plus, la méthode recommande de considérer que le prédateur ne chasse que 50 % de ses proies sur la zone contaminée, pour plus de simplicité il sera considéré que le prédateur chasse 100% de ses proies sur la zone contaminée, cette hypothèse de travail sera aussi conservée lors de l'utilisation du logiciel TerraSys.

1.2 L'approche de TerraSys

L'approche de Terrasys nécessite de caractériser un prédateur supérieur « cible de la contamination » et de renseigner son régime alimentaire. La voie d'exposition par consommation de « ver de terre » a été préférée à celle par la consommation de plantes pour mieux correspondre au scénario précédent et faciliter la comparaison des résultats. Les animaux sélectionnés pour décrire le modèle conceptuel sont le faisan et le renard, ce dernier joue le rôle de prédateur supérieur du système. Enfin, toujours pour permettre une meilleure comparaison des résultats, le paramètre de l'aire de chasse des animaux est réduit pour correspondre à la dimension des mailles sélectionnées lors de la phase expérimentale, cela signifie que le modèle considère que les cibles de l'évaluation ne se nourrissent que sur la zone contaminée.



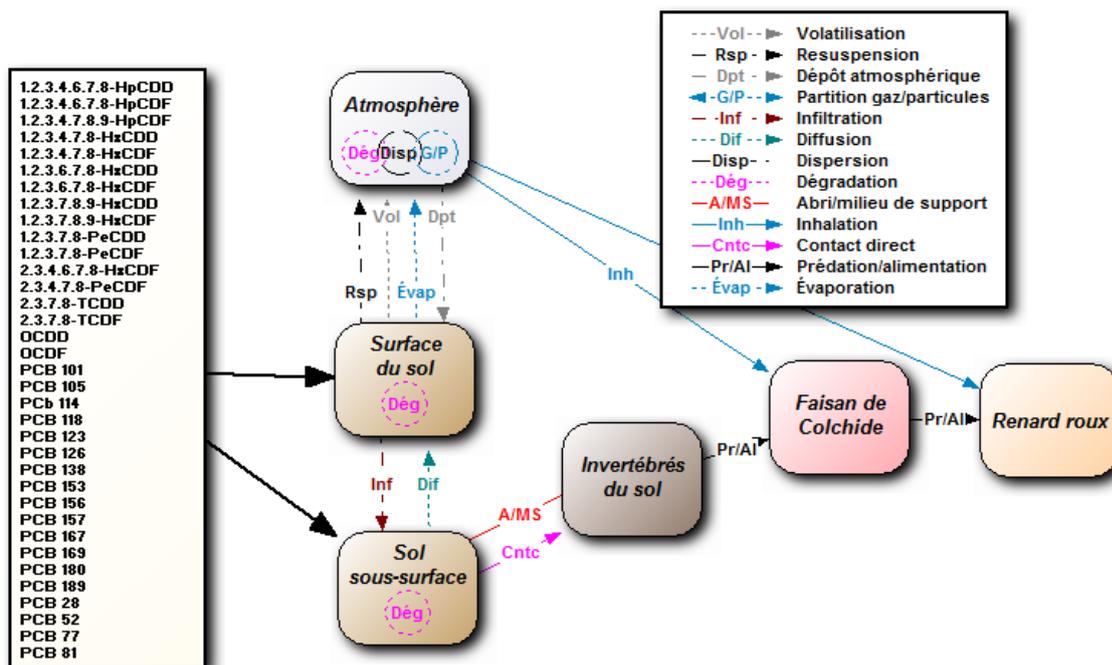


Figure 2: Modèle conceptuel d'exposition selon l'approche dans TerraSys

Il est possible de renseigner avec précision le régime alimentaire des espèces identifiées comme cibles de la contamination, jusqu'à sa composition en fonction du mois de l'année. Pour les besoins de cet exercice, il est considéré que le faisan ne se nourrit que de ver de terre et que le renard ne se nourrit que de faisans, mais une réponse plus réaliste basée sur des données plus nombreuses serait possible.

La concentration d'exposition du prédateur, le renard, s'obtient avec l'équation (Sanexen 2002) :

$$C_{\text{mam-alim}} = \sum_{i=1}^{i=n} \left[C_{\text{alim}_i} \times f_{\text{alim}_i} \times \text{FBT}_{\text{mam}} \times \text{TI}_{\text{mam}} \times \frac{\text{FCM}_i}{\text{FCM}_\mu} \right] \times k_{\text{mét-mam}} \times F_{\text{hab}}$$

Où

$C_{\text{mam-alim}}$: concentration chez le mammifère découlant de l'alimentation mg/kg

i : indice de chaque élément de l'alimentation

n : nombre d'éléments dans l'alimentation (ici $n=1$)

$C_{\text{alim}(i)}$: concentration dans l'aliment i du mammifère en kg/kg (dans cet exemple, la concentration dans le faisan)

$f_{\text{alim}(i)}$: fraction de l'aliment i dans l'alimentation du mammifère

FBT_{mam} : facteur de biotransfert pour le mammifère en j/kg (obtenu selon l'équation $\log \text{FBT}_{\text{mam}} = -7,6 + \log \text{Kow}$)

TI_{mam} : taux d'ingestion alimentaire du mammifère en kg/j

FCM_i : facteur multiplicatif de niveau trophique pour l'élément i de l'alimentation (voir Tableau 1)

FCM_μ : facteur multiplicatif de niveau trophique moyen pour l'alimentation du mammifère

$k_{\text{mét-mam}}$: coefficient de métabolisme du contaminant par les mammifères (par défaut, 1)

F_{hab} : facteur d'ajustement pour l'aire d'alimentation.



Tableau 1: Tableau des valeurs de FCM utilisés par le logiciel TerraSys

Tableau des valeurs de facteur multiplicateur de niveau trophique *

log K _{ow}	FCM - 3	FCM - 4	log K _{ow}	FCM - 3	FCM - 4
2	1,005	1,000	6	10,556	15,996
2,5	1,010	1,002	6,1	11,337	17,783
3	1,028	1,007	6,2	12,064	19,907
3,1	1,034	1,007	6,3	12,691	21,677
3,2	1,042	1,009	6,4	13,228	23,281
3,3	1,053	1,012	6,5	13,662	24,604
3,4	1,067	1,014	6,6	13,980	25,645
3,5	1,083	1,019	6,7	14,223	26,363
3,6	1,103	1,023	6,8	14,355	26,669
3,7	1,128	1,033	6,9	14,388	26,669
3,8	1,161	1,042	7	14,305	26,242
3,9	1,202	1,054	7,1	14,142	25,468
4	1,253	1,072	7,2	13,852	24,322
4,1	1,315	1,096	7,3	13,474	22,856
4,2	1,380	1,130	7,4	12,987	21,038
4,3	1,491	1,178	7,5	12,517	18,967
4,4	1,614	1,242	7,6	11,708	16,749
4,5	1,766	1,334	7,7	10,914	14,388
4,6	1,950	1,459	7,8	10,069	12,050
4,7	2,175	1,633	7,9	9,162	9,840
4,8	2,452	1,871	8	8,222	7,798
4,9	2,780	2,193	8,1	7,278	6,012
5	3,181	2,612	8,2	6,361	4,519
5,1	3,643	3,162	8,3	5,489	3,311
5,2	4,188	3,873	8,4	4,683	2,371
5,3	4,803	4,742	8,5	3,949	1,663
5,4	5,502	5,821	8,6	3,296	1,146
5,5	6,266	7,079	8,7	2,732	0,778
5,6	7,096	8,551	8,8	2,246	0,521
5,7	7,962	10,209	8,9	1,837	0,345
5,8	8,841	12,05	9	1,493	0,226
5,9	9,716	13,964			

Note : pour les niveaux trophiques 1 et 2, la valeur de FCM est de 1,0.

* Selon (U.S. EPA 1998)

La concentration d'exposition liée à l'alimentation du faisan s'obtient avec une équation similaire, et la concentration dans « l'aliment-ver de terre » est obtenue selon l'équation :

$$C_{inv.sol} = C_{sol} \times BCF_{inv.sol}$$

Où

C_{inv.sol} : concentration dans l'invertébré du sol, mg/kg pf

C_{sol} : concentration en contaminant dans le sol, mg/kg ps

BCF_{inv.sol} : facteur de bioconcentration sol-invertébrés du sol (dans cette étude, le BCF moyen obtenu pendant la phase expérimentale).



Cette dernière équation est semblable à celle considérée lors de l'approche générique sauf qu'elle ne prend pas en compte la fraction de sol contenue dans l'intestin de l'invertébré et qu'elle ne s'applique qu'au premier niveau du réseau trophique. TerraSys prévoit donc une étape supplémentaire (l'équation de la page 13) pour modéliser la fraction transmise depuis le premier consommateur (ici le faisan) à son prédateur (ici le renard).

1.3 **BCF mesurés et BCF calculés**

Le BCF (facteur de bioconcentration) mesuré correspond aux données obtenues lors de la phase expérimentale du projet TROPHÉ (INERIS 2017).

Les deux méthodes développées dans ce document proposent une équation différente pour extrapoler le BCF depuis le coefficient de partage octanol-eau (K_{ow}) si la substance est organique.

Equation pour les documents de l'ECHA :

$$BCF_{earthworm} = (0.84 + 0.012K_{ow}) / RHO_{earthworm}$$

Avec pour $RHO_{earthworm}$ (la densité du ver de terre) une valeur générique de 1.

Equation pour TerraSys :

$$\log BCF_{inv.sol} = 1,588 - 0,578 \log K_{ow}$$

Ces deux formules sont différentes et entraînent des différences importantes dans les BCF calculés (Figure 3).

Les BCF calculés avec l'équation de TerraSys sont inférieurs de plusieurs ordres de grandeur aux BCF mesurés durant la phase expérimentale ($[vers]_{pf}/[sol]$), eux-mêmes inférieurs de plusieurs ordres de grandeur aux BCF calculés avec l'équation de l'approche générique.

Dans les documents de l'ECHA, le BCF est décrit comme la fraction de partage hydrophobique entre l'eau interstitielle du sol et l'intérieur de l'organisme (d'après l'équation page 11), seule la fraction biodisponible dans le sol est considérée. Dans TerraSys, il peut être déduit de l'équation page 14 qu'il correspond au rapport entre la concentration dans l'organisme et la concentration totale dans le sol. Cette différence d'interprétation de ce qu'est le BCF se retrouve dans la différence entre les deux équations et donc dans les résultats. Toutefois, les BCF calculés avec la formule de TerraSys et les BCF obtenus pendant la phase expérimentale du projet sont comparables puisque tous deux sont définis comme le rapport entre la concentration de l'invertébré et la concentration totale du sol. Il en ressort que la formule proposée par TerraSys n'est pas suffisamment protectrice du moins pour les PCB et les PCDD/F considérés dans le projet TROPHÉ et dans les conditions (sols multicontaminés) qui lui sont propres.



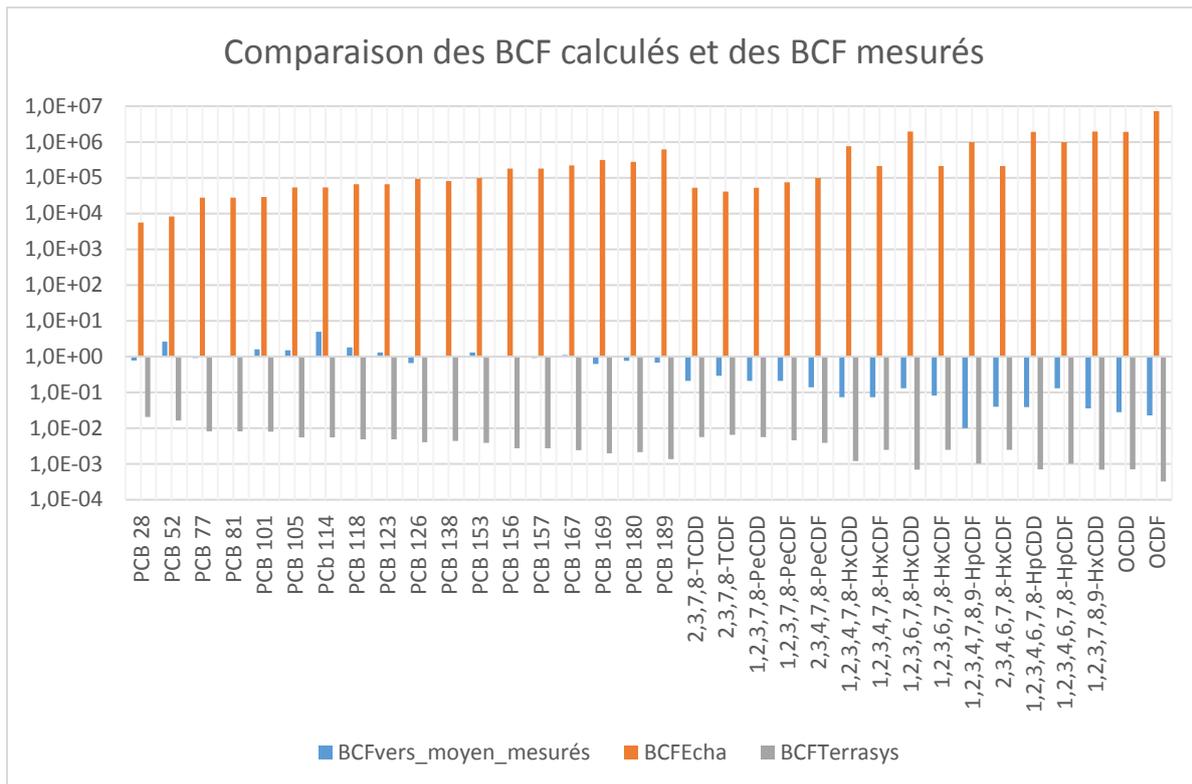


Figure 3 : Comparaison des BCF calculés et mesurés

L'objectif de ce document est de présenter l'approche graduée avec deux méthodes dont le niveau de prise en compte des paramètres est différent. Afin de garder la comparaison des résultats possible et d'atteindre cet objectif, une base commune de données de départ est nécessaire. Les BCF moyens mesurés sur les vers de terre et les concentrations totales des substances qui ont été obtenus pendant la phase expérimentale du projet TROPHé constituent cette base commune de données de départ. Ainsi, les BCF mesurés ont été privilégiés dans cette étude et ne constituent pas une source de divergence ; Toutefois, dans le cas où ces données seraient absentes, l'utilisation de l'un ou l'autre des modèles pour la détermination de la donnée BCF qui est à la base de la modélisation des transferts, pourrait créer des écarts importants sur le résultat final.

1.4 **Résultats**

En ce qui concerne la variabilité des concentrations mesurées dans le sol ainsi que des BCF mesurés pour chaque substances, l'étude a été réalisée en utilisant les moyennes pour ces deux variables, il n'a pas été cherché à observer des différences en fonction des parcelles.

Les concentrations d'exposition du prédateur obtenues selon les modèles employés sont rassemblées dans le Tableau 2.



Tableau 2 : Concentrations d'exposition des prédateurs calculées par les différents modèles

	[sol] _{moyenne} (mg/kg ps)	BCF _{moyen}	[alimentation du predateur] _{TerraSys} (mg/kg pf)	[alimentation du prédateur] _{méthode générique} (mg/kg pf)
PCB 28	9,2E-05	7,8E-01	3,1E-09	8,5E-05
PCB 52	1,7E-04	2,6E+00	3,2E-08	4,7E-04
PCB 77	1,2E-04	9,2E-01	8,3E-08	1,3E-04
PCB 81	1,3E-05	1,0E+00	9,8E-09	1,5E-05
PCB 101	1,3E-03	1,6E+00	1,7E-06	2,3E-03
PCB 105	5,1E-04	1,5E+00	2,2E-06	8,3E-04
PCB 114	1,9E-05	5,0E+00	2,7E-07	9,7E-05
PCB 118	1,3E-03	1,8E+00	1,0E-05	2,5E-03
PCB 123	3,9E-05	1,3E+00	2,2E-07	5,6E-05
PCB 126	1,2E-04	6,6E-01	7,0E-07	9,8E-05
PCB 138	6,7E-03	1,0E+00	4,6E-05	7,7E-03
PCB 153	7,9E-03	1,3E+00	1,1E-04	1,1E-02
PCB 156	5,6E-04	9,3E-01	1,7E-05	6,0E-04
PCB 157	1,3E-04	9,2E-01	3,7E-06	1,3E-04
PCB 167	3,9E-04	1,1E+00	2,2E-05	4,9E-04
PCB 169	2,1E-05	6,2E-01	1,3E-06	1,6E-05
PCB 180	5,2E-03	7,7E-01	3,1E-04	4,7E-03
PCB 189	1,3E-04	6,7E-01	3,4E-05	1,1E-04
Somme des PCB	2,47E-02		5,59E-04	3,2E-02
2,3,7,8-TCDD	1,4E-06	2,1E-01	8,4E-10	5,0E-07
2,3,7,8-TCDF	1,1E-04	2,9E-01	5,3E-08	4,7E-05
1,2,3,7,8-PeCDD	5,3E-06	2,1E-01	3,1E-09	1,9E-06
1,2,3,7,8-PeCDF	8,8E-05	2,1E-01	9,6E-08	3,1E-05
2,3,4,7,8-PeCDF	8,4E-05	1,4E-01	1,2E-07	2,4E-05
1,2,3,4,7,8-HxCDD	6,9E-06	7,3E-02	2,9E-07	1,5E-06
1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,4E-04	7,3E-02	4,8E-07	3,0E-05
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1,5E-05	1,3E-01	7,4E-06	4,1E-06
1,2,3,6,7,8-HxCDF	7,3E-05	8,1E-02	2,2E-05	1,6E-05
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	3,6E-04	1,0E-02	3,6E-06	5,5E-05
2,3,4,6,7,8-HxCDF	8,5E-05	4,0E-02	1,6E-07	1,6E-05
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	1,3E-04	3,9E-02	1,8E-05	2,3E-05
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	9,8E-05	1,3E-01	1,3E-05	2,7E-05
1,2,3,7,8,9-HxCDD	9,2E-06	3,6E-02	1,3E-06	1,6E-06
OCDD	2,8E-04	2,8E-02	2,9E-05	4,8E-05
OCDF	4,8E-04	2,3E-02	5,8E-04	7,9E-05
Somme des PCDD/F	1,97E-03		6,76E-04	4,1E-04

Des informations sont disponibles dans la littérature scientifique sur les concentrations en PCB mesurées dans les tissus de renard de trois provinces d'Italie (Corsolini et al. 2000). La somme des



concentrations de PCB va de 7,6E-03 à 3,8E-02 mg/kg de muscle. Ce sont des concentrations mesurées directement dans le renard et pas dans leurs proies mais il est déjà intéressant de constater qu'elles se situent entre les concentrations calculées avec les deux méthodes utilisées. Les auteurs font aussi remarquer que les PCB présentant les concentrations les plus importantes lors de leurs mesures sont le PCB 138, 153, 170 et 180, tout comme dans trois autres références bibliographiques (Norheim 1978, Wangandersen et al. 1993, Georgii et al. 1994). Mis à part le PCB 170 qui n'a pas été recherché, cette observation peut également s'appliquer sur les résultats obtenus avec les deux méthodes déroulées dans cette étude.

2. Comparaison des concentrations d'exposition calculées pour les prédateurs en fonction des modèles

Les concentrations calculées avec l'approche décrite dans les documents de l'ECHA, considérant un prédateur indéterminé, sont presque systématiquement supérieures (31 fois sur 34) à celles calculées avec le logiciel TerraSys pour lequel le prédateur supérieur du système (le renard) a été décrit. Cette différence dépasse un ordre de grandeur pour 25 des 34 substances et peut atteindre une différence de 4 ordres de grandeur pour les PCB les plus légers (PCB 28 et PCB 52).

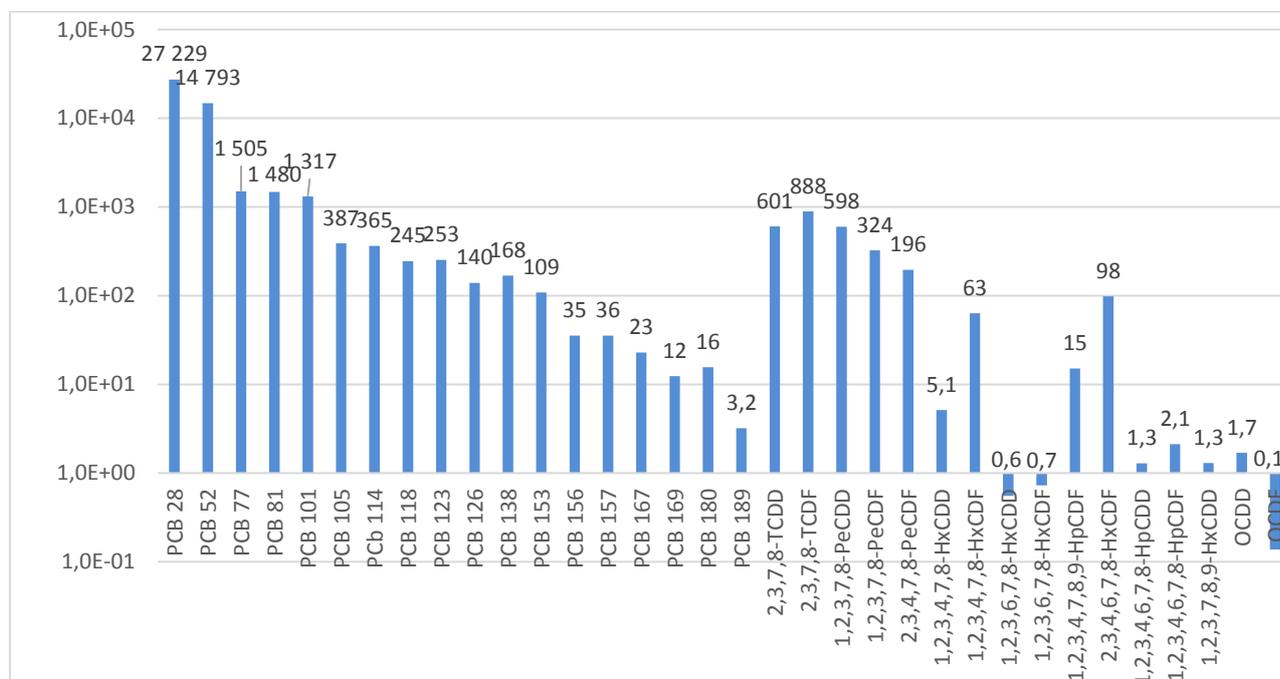


Figure 4 Comparaison des concentrations d'exposition calculées selon le modèle utilisé ([modèle de l'ECHA]/[TerraSys] en échelle log)

En ce qui concerne les PCB, il est possible d'observer deux tendances très nettes :

- les concentrations calculées pour le prédateur sont toujours supérieures avec la méthode générique,
- la différence entre les concentrations calculées est inversement proportionnelle au nombre de chlore des PCB. Ainsi, pour les PCB 28 et PCB 52, la différence est de 4 ordres de grandeur mais n'est plus que 3 fois supérieure pour le PCB 189.

Par contre, en ce qui concerne les PCDD/F :

- les concentrations calculées avec la méthode générique ne sont supérieures que pour les molécules les plus légères et la plupart des molécules les plus lourdes,
- la différence entre les résultats obtenus est plus importantes pour les molécules les plus légères, cette tendance est quand même moins bien marquée que pour les PCB.



Les modèles conceptuels d'exposition définis dans cette étude (une seule voie d'exposition, aire d'alimentation limitée et 100% de la diète du prédateur composée d'un animal ne consommant que des vers de terre) permettent d'isoler les paramètres qui font varier les résultats obtenus. Le fait que les concentrations d'exposition du prédateur calculées par la méthode TerraSys deviennent égales ou même supérieures à celles calculées avec la méthode générique pour les molécules les plus lourdes est à relier aux termes supplémentaires dans les équations proposées par la méthode TerraSys (voir page 13) : le FBT et le FCM. Ces paramètres correspondent aux variables prises en compte par TerraSys pour évaluer la quantité de substance transmise d'un niveau trophique à un autre là où la méthode générique simplifie la modélisation en considérant que tous les prédateurs reçoivent la même quantité de polluant quelle que soit sa place dans le réseau trophique (voir 1.2).

Le paramètre le plus déterminant semble être le FBT³. Il est largement inférieur à 1 pour la plupart des substances, l'équation prévoit alors une réduction de la quantité de substance transmise via la prédation, mais il est supérieur à 1 pour les substances ayant un log de Kow supérieur à 7,6. Cela correspond bien à la plupart des substances pour lesquelles il est calculé une égalité ou une augmentation de la concentration d'exposition via l'alimentation en passant au niveau trophique supérieur (les log Kow et les FBT des substances sont présentés dans le Tableau 3), on parle alors de bioamplification. Cela concerne le 1,2,3,6,7,8-HxCDD, le 1,2,3,7,8,9-HxCDD, le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD, le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, le 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF, l'OCDD et l'OCDF.

³ Le terme FCM/FCM_μ est d'environ 1 pour toutes les substances, à l'exception du 1,2,3,6,7,8-HxCDF pour lequel il est égal à 9.



Tableau 3: logKow et FBT des substances

Substance	logKow	FBT	FBT supérieur à 1 ?
PCB 28	5,67	0,01	-
PCB 52	5,84	0,02	-
PCB 77	6,36	0,06	-
PCB 81	6,36	0,06	-
PCB 101	6,38	0,06	-
PCB 105	6,65	0,11	-
PCb 114	6,65	0,11	-
PCB 118	6,74	0,14	-
PCB 123	6,74	0,14	-
PCB 126	6,89	0,19	-
PCB 138	6,83	0,17	-
PCB 153	6,92	0,21	-
PCB 156	7,18	0,38	-
PCB 157	7,18	0,38	-
PCB 167	7,27	0,47	-
PCB 169	7,42	0,66	-
PCB 180	7,36	0,58	-
PCB 189	7,71	1,29	oui
2,3,7,8-TCDD	6,64	0,11	-
2,3,7,8-TCDF	6,53	0,09	-
1,2,3,7,8-PeCDF	6,79	0,15	-
2,3,4,7,8-PeCDF	6,92	0,21	-
1,2,3,4,7,8-HxCDD	7,80	1,59	oui
1,2,3,4,7,8-HxCDF	7,25	0,45	-
1,2,3,6,7,8-HxCDD	8,21	4,07	oui
1,2,3,6,7,8-HxCDF	7,25	0,45	-
1,2,3,7,8,9-HxCDD	8,21	4,07	oui
2,3,4,6,7,8-HxCDF	7,25	0,45	-
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	8,20	3,97	oui
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	7,92	2,09	oui
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	7,92	2,09	oui
OCDD	8,20	3,97	oui
OCDF	8,78	15,15	oui

3. Comparaison des ratios de transfert Sol/Prédateur en fonction du modèle

L'étude des ratios de transfert apportent de nouvelles informations sur la façon de calculer le transfert selon la méthode choisie. Les concentrations sont issues des deux modélisations et les résultats utilisés sont ceux présentés dans le Tableau 2.

$$\text{Ratio de transfert} = [\text{alimentation du prédateur}] / [\text{sol}]$$



3.1 **Méthode de TerraSys**

Selon les résultats obtenus avec la méthode TerraSYS, pour les PCB comme pour les PCDD/F, le transfert devient plus efficace avec l'augmentation du nombre de chlore dans la molécule (Figure 5), il devient même supérieur à 1 (la concentration dans l'organisme est supérieure à celle dans le sol) pour l'OCDF. Cette tendance est particulièrement visible pour les PCB.

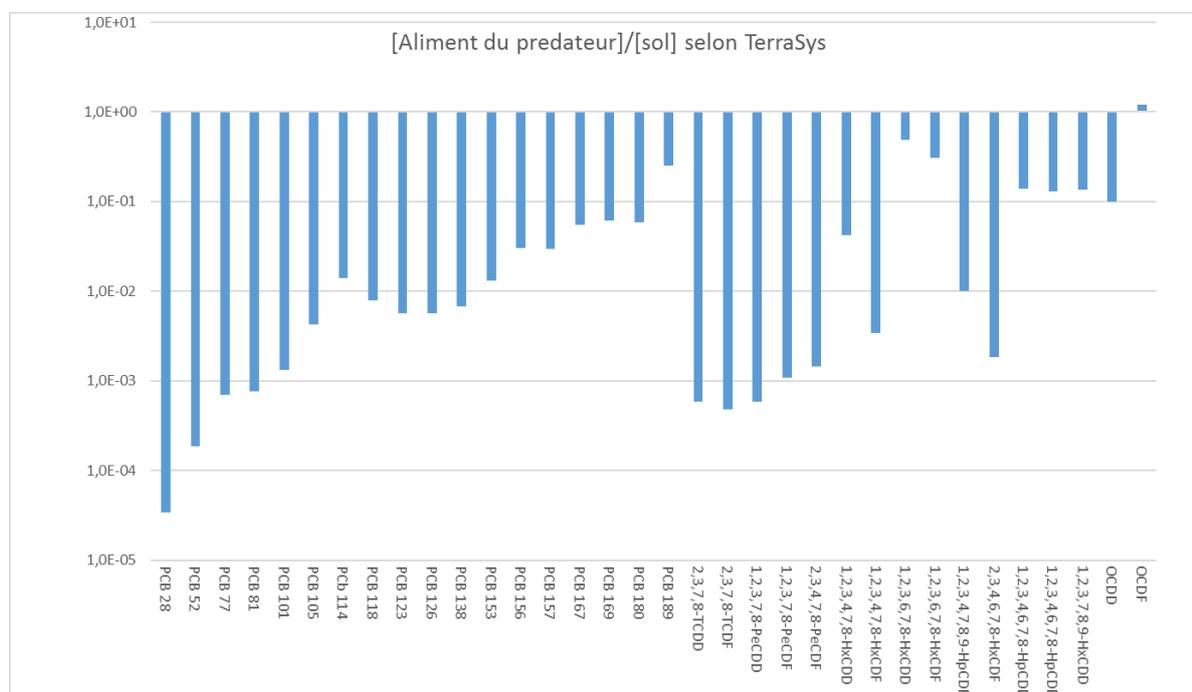


Figure 5 : Transfert de la substance du sol au prédateur selon TerraSys

Il a déjà été observé lors de mesures sur animaux sauvages (Bachour et al. 1998), que si les concentrations des PCB légers étaient plus élevées sur les herbivores (cerfs), les concentrations des PCB les plus lourds sont plus élevées dans la chair des prédateurs (renards). Les auteurs de l'article supposent que cette différence peut être reliée au fait que les PCB les plus légers, volatiles, pourraient s'accumuler à la surface des feuilles et donc être préférentiellement ingérées par les daims. Les résultats obtenus permettent également de supposer que le transfert de ces substances du sol à un prédateur de deuxième niveau est plus important pour les molécules les plus complexes, elles sont donc susceptibles d'être mesurées en plus grandes quantités chez un prédateur que chez un herbivore.

3.2 **Méthode générique**

La concentration calculée pour l'alimentation du prédateur supérieur est la même que celle calculée pour le premier consommateur. Elle tient compte de la fraction bioconcentrée dans la chair de la proie (ver de terre) et de la fraction de sol contaminé présente dans son tube digestif, mais elle ne tient pas compte d'une possible bioamplification.

Avec la méthode générique, le transfert est proche ou supérieur à 1 pour la plupart des PCB, c'est-à-dire qu'il est prévu que la concentration de tous les PCB dans le renard soit supérieure à celle du sol. C'est particulièrement le cas des plus légers même s'il est difficile d'observer une tendance nette. L'efficacité du transfert ne semble pas corrélée au nombre de chlore dans la molécule.

En ce qui concerne les PCDD/F, le ratio de transfert est inférieur à 1 dans tous les cas. Il semble que le transfert devienne de moins en moins efficace avec l'augmentation du nombre de chlore.



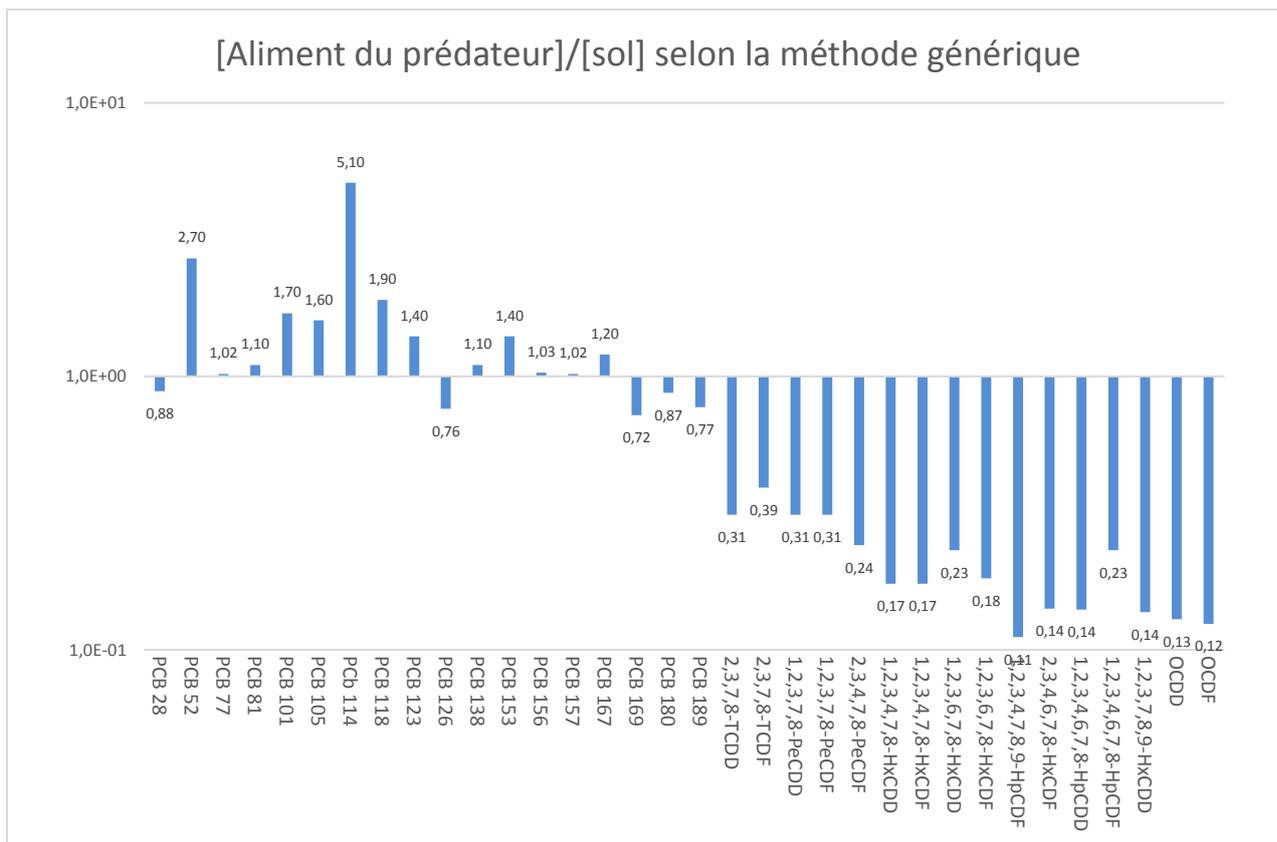


Figure 6 : Transfert de la substance du sol au prédateur selon la méthode générique

4. Synthèse de la comparaison des résultats

A partir de mêmes données d'entrées concernant la concentration des substances accumulées dans des vers de terre exposés à un sol contaminé aux PCB et aux PDD/F, la méthode classique d'évaluation du risque d'empoisonnement secondaire décrite dans les documents guide de l'ECHA a tendance à prévoir une bioaccumulation (ratio de transfert du sol au prédateur supérieur à 1) pour un plus grand nombre de substance qu'avec la méthode de calcul de TerraSys. Elle a aussi tendance à calculer des concentrations d'exposition pour le prédateur plus importantes, les différences étant particulièrement marquées pour les PCB et les PCDD/F les plus légers. Elle est donc globalement plus protectrice. Elle est pourtant moins protectrice pour trois des PCDD/F les plus lourds puisque pour le 1,2,3,6,7,8-HxCDD, le 1,2,3,6,7,8-HxCDF et l'OCDF, c'est la méthode de calcul de TerraSys qui prévoit les concentrations d'exposition les plus élevées.

Ces différences tiennent au fait que contrairement à la méthode classique, TerraSys considère que la fraction de contaminant transmise d'une proie à son prédateur dépend de sa position sur le réseau trophique et du logKow de la substance. Ainsi la concentration d'une substance dont le logKow est supérieur à 7,6 augmente en s'élevant dans le réseau trophique alors qu'elle diminue pour les autres substances. Cette augmentation peut aller jusqu'à dépasser la concentration d'exposition calculée selon l'approche généralement plus protectrice de la démarche générique.

En définitive, l'approche de la méthode générique est l'approche la plus protectrice de la modélisation de l'exposition des prédateurs dans la plupart des cas, l'approche de TerraSys devient plus protectrice dans le cas où la substance présente un log Kow particulièrement important et que les relations de prédatons se multiplient.

5. Recommandations pour l'utilisation de ces différents modèles

Même si les deux modèles utilisés dans ce document sont capables de calculer des concentrations d'exposition pour les prédateurs à partir de concentrations mesurées dans le sol, ils sont utilisés de façons différentes et cela se ressent dans les données d'entrée nécessaires et les résultats obtenus. La méthode générique décrite dans les documents de l'ECHA a été dimensionnée pour permettre



l'enregistrement de substances dans le cadre de la réglementation REACH. En ce sens, elle peut être déroulée sans contexte local particulier afin que les résultats obtenus puissent être appliqués indépendamment du site considéré. Elle se doit d'être très protectrice justement pour pouvoir correspondre à tous les contextes. La méthode employée par TerraSys en revanche a été prévue pour être utilisée sur un site sol pollué bien identifié, le contexte local doit être précisément décrit, les organismes récepteurs de la contamination doivent être connus et les résultats obtenus sont difficilement extrapolable sur un autre site, les résultats, globalement moins protecteurs, sont aussi censés être plus réalistes.

En ce qui concerne les BCF par défaut proposés par TerraSys (calculés depuis le Kow de la substance), les résultats dans le cadre de ce projet ont indiqué qu'ils pouvaient être sous-estimés par rapport à des BCF mesurés. Cette incertitude devrait être prise en compte au moment de l'interprétation des résultats de l'évaluation de risque liés à l'empoisonnement secondaire si ces valeurs par défaut sont utilisées.

En fonction des objectifs qu'un évaluateur souhaite atteindre et des informations dont il dispose, la pertinence d'une approche peut l'emporter sur l'autre. Les critères évoqués dans ce document sont rassemblés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Critères qui différentient l'utilisation des deux approches du point de vue de l'évaluateur

Modéliser l'exposition des milieux avec la méthode décrite dans les documents de l'ECHA	Modéliser l'exposition des milieux avec TerraSys
<p><u>Données d'entrée</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Les données nécessaires pour décrire le milieu récepteur sont peu nombreuses. • Le BCF (ver de terre) disponible a été obtenu depuis la concentration de substance dans l'eau interstitielle du sol. <p><u>Résultats</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • La méthode pour obtenir les résultats fait l'objet d'une reconnaissance des experts du domaine en Europe. • Les résultats sont applicables à l'ensemble du territoire européen. • Les résultats obtenus peuvent être utilisés comme première approche de l'évaluation sur un site pour identifier les points sensibles de l'évaluation. 	<p><u>Données d'entrée</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Il est possible de caractériser le milieu, les espèces présentes et les relations de prédation en place. • Le BCF (ver de terre) disponible a été obtenu depuis la concentration de substance totale dans le sol. <p><u>Résultats</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Plus protectrice pour les prédateurs en bout d'une longue chaîne de prédation si les substances ont un log Kow particulièrement important (au-dessus de 7,6). • Les résultats obtenus sont plus réalistes par rapport au contexte local de l'étude. • Les résultats s'expriment pour chaque espèce d'intérêt sélectionnée dans le modèle conceptuel (espèces protégées par exemple).



III Références

Bachour, G., K. Failing, S. Georgii, I. Elmadfa and H. Brunn (1998). "Species and organ dependence of PCB contamination in fish, foxes, roe deer, and humans." Archives of Environmental Contamination and Toxicology **35**(4): 666-673.

Corsolini, S., L. Burrini, S. Focardi and S. Lovari (2000). "How can we use the red fox as a bioindicator of organochlorines?" Archives of Environmental Contamination and Toxicology **39**(4): 547-556.

ECHA (2008). Chapter R.10: Characterisation of dose [concentration]-response for environment. Guidance on information requirements and chemical safety assessment., European Chemicals Agency: 65.

ECHA (2010). Chapter R.16: Environmental exposure estimation. Guidance on information requirements and chemical safety assessment., European Chemicals Agency: 138.

Georgii, S., G. Bachour, K. Failing, U. Eskens, I. Elmadfa and H. Brunn (1994). "POLYCHLORINATED BIPHENYL CONGENERS IN FOXES IN GERMANY FROM 1983 TO 1991." Archives of Environmental Contamination and Toxicology **26**(1): 1-6.

INERIS (2017). Synthèse des travaux expérimentaux menés sur le transfert des POPs dans les végétaux et les vers de compost (Livrables n°1 et 2). Projet TROPHE Transferts et Risques des Organiques Persistants pour l'Homme et les écosystèmes., INERIS: 233.

Moermond, C. T. and E. M. Verbruggen (2013). "An evaluation of bioaccumulation data for hexachlorobenzene to derive water quality standards according to the EU-WFD methodology." Integr Environ Assess Manag **9**(1): 87-97.

Norheim, G. (1978). "COMPOSITION AND DISTRIBUTION OF PCB IN ARCTIC FOX (ALOPEX-LAGOPUS) CAUGHT NEAR LONGYEARBYEN ON SVALBARD." Acta Pharmacologica Et Toxicologica **42**(1): 7-13.

Sanexen (2002). Manuel de référence TerraSys, Sanexen: 424.

Wangandersen, G., J. U. Skaare, P. Prestrud and E. Steinnes (1993). "LEVELS AND CONGENER PATTERN OF PCBs IN ARCTIC FOX, ALOPEX-LAGOPUS, IN SVALBARD." Environmental Pollution **82**(3): 269-275.



Annexe 1

DESCRIPTION DE LA DIETE ET DES RELATIONS TROPHIQUES DANS LE RESEAU TROPHIQUE COMPLEXE

ANNEXE 1

Inclusion of trophic network variability in regulatory environmental risk assessment

INERIS

Maîtriser le risque
Pour un développement durable

PUCHEUX Nicolas¹, GUIOT Mireille¹, ANDRÉS Sandrine¹

1. INERIS - unité « Expertise en Toxicologie et Ecotoxicologie des Substances chimiques », Parc Technologique Alata, 60550 Verneuil en Halatte, FRANCE

INTRODUCTION

Ecosystems can be defined as complex networks implying trophic relationships between species and environmental compartments interactions. The anthropic use of chemicals induces substance releases in the environment that can harm ecosystems.

The main environmental regulations have identified a specific potential risk associated to the bioaccumulation. Each of them (industrial chemicals, biocides, plant protection products) provides in their guidance document a methodology to assess the risk of secondary poisoning. In these guidances, different scenario are defined based on a certain number of hypotheses, which may lead to different conclusions.

Our work:

We selected 3 international methodologies used in a regulatory context to assess secondary poisoning: EUSES 2.1.2 for EU industrial chemicals, biocides, plant protection products and Terrasys 1.09 used in Canada for on-site risk assessment. Additionally, Berisp (spatial planning tool) was considered. These models rely either on an undefined/simple trophic network or more elaborated scenarii where species are defined.

In order to compare the outcome of these methodologies, these assessments are applied to a theoretical case study involving the terrestrial food chain.

METHOD

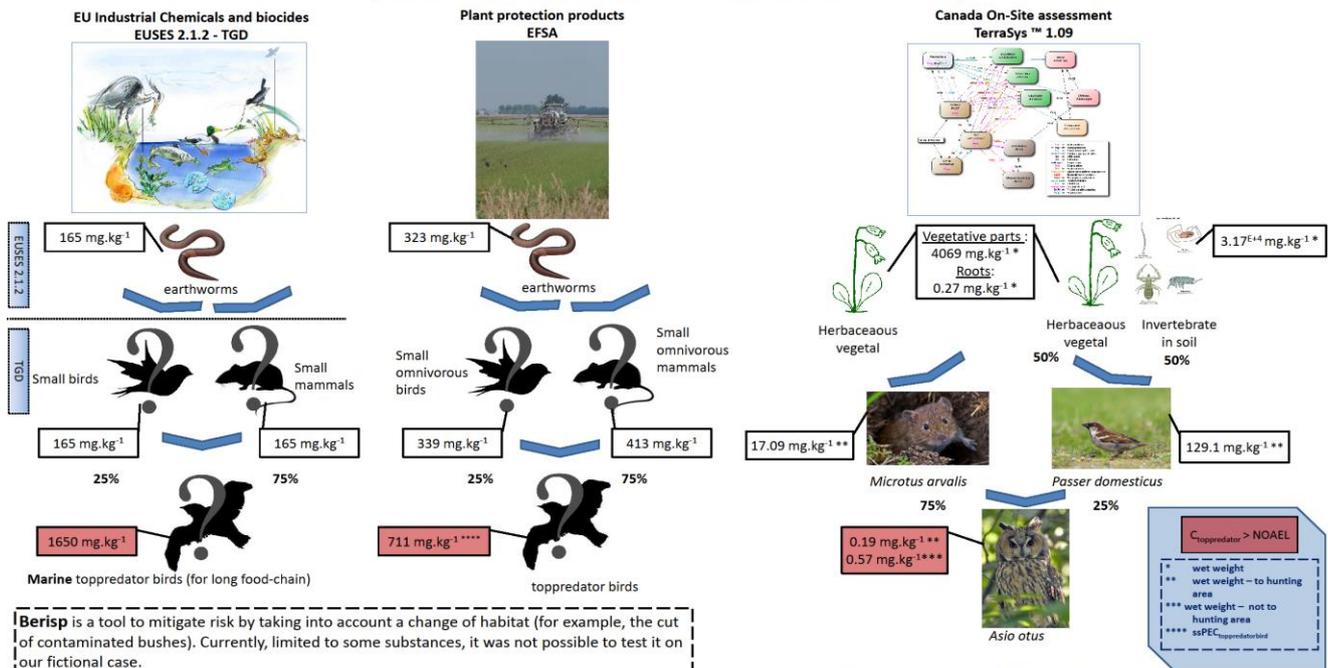
	Euses 2.1.2 Technical Guidance Document (TGD) based model	Risk assessment guidance for birds and mammals in plant protection product area Efsa-European Food Safety Authority	TerraSys™ 1.09 Professional software established on algorithm	Berisp (Beaking Ecotoxicological Restraints in Spatial Planning) New approach to soil contamination
Consideration of Bioaccumulation	X	X	X	X
Consideration of degradation since measurement			X	
Consideration of predation's area			X	X
Defined species		X	X	

A theoretical case:

- A grassland exposed to DDT 10 years ago,
- 10 mg.kg⁻¹ of DDT were measured in soil,
- 10 days passed before the assessment is performed.

DDT (dichlorodiphenyltrichloroethane) is an organochlorine insecticide used mainly to control mosquito-borne malaria. DDT use on crops was banned because its persistence in the environment and its accumulation in faty tissues. DDT was chosen for this theoretical case because of its well-known bioaccumulative properties in trophic network.

RESULTS: PREDICTED ENVIRONMENTAL CONCENTRATIONS IN TROPIC LEVELS



Berisp is a tool to mitigate risk by taking into account a change of habitat (for example, the cut of contaminated bushes). Currently, limited to some substances, it was not possible to test it on our fictional case.

CONCLUSION AND DISCUSSION

	Pros	Cons
EUSES 2.1.2	<ul style="list-style-type: none"> • Free to download • Simple scenario • User friendly 	<ul style="list-style-type: none"> • Target species are unspecific • No built-in databases of chemicals substances are available
EFSA	<ul style="list-style-type: none"> • Different tiers risk assessment are available. The first approach considers undefined target species. In advanced approach, diet of proposed specific target species are available • Databases on values are available 	<ul style="list-style-type: none"> • Refinement step is not easy to conduct. A choice of refined step is propose but sometimes complementary search data on literature is needed.
TerraSys™ 1.09	<ul style="list-style-type: none"> • Data on 134 chemicals are available. It is possible to add chemical substances in the database • Specific species can be chosen. • Aquatic or soil contamination 	<ul style="list-style-type: none"> • The execution of the risk assessment using the software requires a lot of informations on meteorology • Not free of charge
Berisp	<ul style="list-style-type: none"> • Free to download • A demo is available to show how to use it 	<ul style="list-style-type: none"> • Only soil contamination • Special configuration of contamination map, area map are requires • Few chemicals and species are available at the moment

EUSES software and EFSA's guide provide methodologies for secondary poisoning risk assessment in a virtual EU environment whereas Berisp or TerraSys™ are meant for local environment where a knowledge of a specific trophic network might be available.

In this fictional case, exposition concentrations tend to be much lower when the level of refinement increases, i.e. when the scenario allows for a precise definition of the predator species. This is consistent with the basic hypothesis which aim to protect in one hand "a virtual EU environment" with a high level of uncertainty, or on the other hand, a specific local environment in which the species actually present are identified.

Undefined model as a first tier assessment seems to be more protective. The later is considered as more relevant. However, this method implies additional investigations in order to identify the species present (faunistic inventory), the gathering of toxicological data on these species, in order to ensure that the most critically species at risk has been identified. Otherwise, species not covered by defined model could be affected.

Acknowledgments: MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, ET DE L'ÉNERGIE

Contact: nicolas.pucheu@ineris.fr

References

- European Food Safety Authority; Guidance Document on Risk Assessment for Birds & Mammals on request from EFSA. EFSA Journal 2009; 7(12):1438. doi:10.2903/j.efsa.2009.1438. Available online: www.efsa.europa.eu
- TerraSys™. www.sarens.com
- EUSES (2012) http://hpc.jrc.ec.europa.eu/our_activities/public_health/risk_assessment_of_Biocides/euses
- Berisp <http://www.berisp.org/>

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°5 -

Approche graduée exemplifiée pour l'évaluation de l'empoisonnement secondaire

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. Le livrable 5 a pour objet d'exemplifier l'évaluation du risque pour les écosystèmes du point de vue de l'empoisonnement secondaire par l'utilisation de deux méthodes différentes : la méthode suivie dans les documents guides de l'ECHA (Agence européenne des produits chimiques) et celle suivie par le logiciel d'évaluation du risque TerraSys.

La démarche suivie par ces deux modèles est similaire en théorie (calculer la fraction transférée à chaque étape du réseau trophique pour modéliser l'empoisonnement secondaire des vertébrés supérieurs) et le risque est estimé pour une chaîne alimentaire modèle simple de type milieu/proie/prédateur. Cependant, alors que la méthode décrite dans les documents de l'ECHA considère un prédateur indéterminé, décrit par des paramètres génériques, la méthode TerraSys, plutôt adaptée à un contexte local, considère des espèces bien définies.

La méthode décrite dans les documents de l'ECHA présente des concentrations d'exposition du prédateur presque systématiquement supérieures à celles calculées avec le logiciel TerraSys. L'inverse n'est observé que pour trois des substances PCDD/F parmi les plus lourdes. Les valeurs de facteur de bioconcentration (BCF) obtenues expérimentalement (livrables 1 et 2) sont situées entre celles des deux modèles.

De plus, la méthode décrite dans les documents de l'ECHA prévoit des concentrations dans les organismes vivants égales ou supérieures à celles du sol pour 13 des 34 substances étudiées, contre une seule si la modélisation est réalisée avec TerraSys.

Essentiel à retenir

Les deux méthodes retenues pour évaluer l'empoisonnement secondaire reposent sur deux équations distinctes tenant compte du coefficient de partage octanol-eau (Kow), et conduisant à des différences de plusieurs ordres de grandeur. Les valeurs de facteurs de bioconcentration (BCF) obtenues par expérimentation se situent entre les valeurs obtenues par le calcul avec ces deux méthodes.

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