

SEPT.
2017

TROPHé

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

Livrable n°4 : Retour d'expérience suite à l'application des outils et méthodes innovants mis en place dans le cadre du projet TROPHé sur un site pollué avec des contaminants organiques bioaccumulables

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 : Retour d'expérience suite à l'application des outils et méthodes innovants mis en place sur un site pollué avec des contaminants organiques bioaccumulables - Rapport. 78 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-17-138302-07880A

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

Projet de recherche coordonné par : Nicolas Pucheux - 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	11
1.	LE PROJET DE RECHERCHE TROPHE	11
2.	LE SITE ATELIER	11
3.	LES SUBSTANCES CONSIDEREES	12
4.	LES CAS D'ETUDES SUIVIS.....	12
5.	NOTIONS SUR LE TRANSFERT DES CONTAMINANTS.....	13
II	ETUDE DE LA SENSIBILITE DES PARAMETRES DE TRANSFERTS EN EVALUATION DES RISQUES POUR LES ECOSYSTEMES	15
III	L'EVALUATION DU RISQUE EN QUATRE PHASES SELON TERRASYS	16
1.	PHASE 1 : LES DONNEES D'ENTREE.....	16
2.	PHASE 2 : LA DEFINITION DU MODELE CONCEPTUEL DE L'ECOSYSTEME	17
3.	PHASE 3 : LA MODELISATION DES DONNEES.....	18
4.	PHASE 4 : L'INTERPRETATION DES RESULTATS.....	20
IV	PRESENTATION DES DIFFERENTS CAS D'ETUDE POUR LE PROJET.....	20
1.	ETUDE 1 LES FACTEURS DE BIOCONCENTRATION	20
2.	ETUDE 2 LA COMPLEXITE DU RESEAU TROPHIQUE	21
3.	ETUDE 3 LA DESCRIPTION DU MILIEU	22
4.	APPORT DE DONNEES ADDITIONNELLES : RESULTATS DES BIOESSAIS.....	22
V	LES DONNEES D'ENTREE	23
1.	ENSEMBLE DES DONNEES DISPONIBLES.....	23
2.	LES SUBSTANCES RETENUES.....	23
3.	DEFINITION DU MODELE DE REFERENCE	26
3.1	Zone d'étude	26
3.2	Caractérisation des milieux.....	27
3.2.1	Le sol.....	27
3.2.2	L'air.....	30
3.3	Définition du réseau trophique de référence	30
4.	LES BIOESSAIS	31
VI	ETUDE 1 : INFLUENCE DU PARAMETRE BCF SUR LES RESULTATS D'UNE ERE.....	32
1.	LES BCF MESURES	32
2.	L'EQUATION UTILISEE PAR TERRASYS.....	34
3.	RESULTATS DE LA MODELISATION DES CONCENTRATIONS D'EXPOSITION AVEC LE MODELE DE REFERENCE.....	36
4.	FAUT-IL TENIR COMPTE DES VALEURS PRESENTANT UNE FORTE INCERTITUDE POUR LE CALCUL DU BCF MOYEN ?.....	38
5.	LE CHOIX DU BCF, VALEUR MOYENNE OU VALEUR MAXIMUM ?	40
5.1	Comparaison des concentrations en substance transférée	40
5.2	Comparaison des ratios de transferts.....	40



5.3	Interprétation des résultats	42
VII	ETUDE 2 : INFLUENCE DE LA COMPLEXITE DU RESEAU TROPHIQUE SUR LES RESULTATS DE L'ERE	43
1.	DEFINITION DES DIFFERENTS MODELES CONCEPTUELS	43
1.1	Chaine trophique de référence.....	43
1.2	Chaine trophique étendue	43
1.3	Réseau trophique complexe.....	44
2.	RESULTATS DE LA MODELISATION DES CONCENTRATIONS D'EXPOSITION DU PREDATEUR 45	
3.	IMPACT DE LA LONGUEUR DE LA CHAINE TROPHIQUE SUR LES RESULTATS	47
4.	IMPACT DE LA COMPLEXITE DU RESEAU TROPHIQUE SUR LES RESULTATS	49
VIII	ETUDE 3 INFLUENCE DES PARAMETRES DU MILIEU SUR LES RESULTATS D'UNE ERE	51
1.	DEFINITIONS DES DIFFERENTS MODELES CONCEPTUELS	51
2.	RESULTATS DE LA MODELISATION DES CONCENTRATIONS D'EXPOSITION	55
3.	LA DESCRIPTION DE LA PARCELLE EST-ELLE UN PARAMETRE SENSIBLE DE L'EVALUATION DE L'EXPOSITION ?	57
IX	EVALUATION DU RISQUE D'APRES LES BIOTESTS ET EXAMEN APPROFONDI DES RESULTATS	58
1.	DESCRIPTION DE L'OUTIL	58
2.	LES DONNEES DISPONIBLES	59
2.1	Expositions sur les végétaux	59
2.2	Expositions sur les vers de terre	60
3.	RESULTATS	60
4.	LA FONCTION D'EXAMEN APPROFONDI DES RESULTATS	60
X	SYNTHESE DES RESULTATS	62
1.	LA SENSIBILITE DES PARAMETRES SUR LES RESULTATS DE L'EVALUATION DE L'EXPOSITION	62
2.	PERSPECTIVES	62
XI	REFERENCES	63
XII	ANNEXES	64

Table des Figures

FIGURE 1 : LOCALISATION DU SITE DE SAINT CYPRIEN	12
FIGURE 2: BIOCONCENTRATION, MODIFIE DEPUIS PROCTER & GAMBLE 2004.....	13
FIGURE 3: BIOACCUMULATION D'APRES PROCTER & GAMBLE 2004.....	13
FIGURE 4: EXEMPLE DE BIOAMPLIFICATION : LE CAS DU PCB.	14
FIGURE 5 INTERFACE DE LA DEFINITION DU MODELE CONCEPTUEL DANS TERRASYS.....	18
FIGURE 6: MODELISATION DES CONCENTRATIONS DANS LES DIVERS MILIEUX (SANEXEN 2002).	19
FIGURE 7: MODELISATION DU RISQUES POUR LES RECEPTEURS ECOLOGIQUES (SANEXEN 2002).	19
FIGURE 8 : EXEMPLE DU MODELE CONCEPTUEL DECRIVANT UN RESEAU TROPHIQUE COMPLEXE.....	21
FIGURE 9 LOCALISATION DES 4 MAILLES SELECTIONNEES SUR LE SITE DE SAINT-CYPRIEN.	26
FIGURE 10 : TERRASYS, INTERFACE DE SAISIE DES PROPRIETES DE LA SURFACE DU SOL.....	27
FIGURE 11: TERRASYS: PROPRIETES ATMOSPHERIQUES ET CLIMATOLOGIQUES.	30
FIGURE 12 : MODELE CONCEPTUEL DE REFERENCE.	31
FIGURE 13: SCHEMA SIMPLIFIE DU TRANSFERT SOL, VERS DE TERRE, PREDATEUR SELON TERRASYS.	32
FIGURE 14: FCM EN FONCTION DU LOGKOW	36
FIGURE 15: CONCENTRATION MODELISEE DANS LES HERISSONS EN $\mu\text{G}/\text{KG}$ DE POIDS FRAIS EN FONCTION DE LA METHODE DU CALCUL DU BCFMOYEN.	39
FIGURE 16: RATIO DE TRANSFERT DES CONTAMINANTS DU SOL AU HERISSON EN FONCTION DE LA METHODE DE CALCUL DU BCFMOYEN.	39
FIGURE 17: RAPPORT DU TRANSFERT SOL - HERISSON EN FONCTION DU BCF.	41
FIGURE 18: MODELE CONCEPTUEL COMPRENANT UN PREDATEUR SUPERIEUR.	44
FIGURE 19: MODELE CONCEPTUEL D'UN RESEAU TROPHIQUE COMPLEXE.	45
FIGURE 20 : RAPPORT DE CONCENTRATION EN AJOUTANT UN PREDATEUR SUPERIEUR [RENARD]/[HERISSON]	48
FIGURE 21 : RAPPORT ENTRE LA CONCENTRATION MODELISEE AVEC LE MODELE ETENDU PAR RAPPORT A CETTE CONCENTRATION MODELISEE AVEC LE MODELE COMPLEXE.	50
FIGURE 22 : IDENTIFICATION DU TYPE DE SOL AVEC LE LOGICIEL TERRASYS ET PROPOSITION DE VALEURS PAR DEFAUT.	52
FIGURE 23: MODELE CONCEPTUEL INCLUANT UN PREDATEUR QUI SE NOURRIT A LA FOIS DE VERS ET DE VEGETAUX POUR PRENDRE EN COMPTE LES DIFFERENTS POURCENTAGES DE COUVERTURE VEGETALE DE CHAQUE PARCELLE.....	53

Table des Tableaux

TABLEAU 1 : SUBSTANCES ORGANIQUES PERSISTANTES CONSIDEREES DURANT LE PROJET TROPHE	23
TABLEAU 2: LISTE DES PROPRIETES DE LA SUBSTANCE NECESSAIRES AU FONCTIONNEMENT DE TERRASYS	24
TABLEAU 3: BCF MOYENS OBTENUS LORS DES ESSAIS (INERIS 2017).....	25
TABLEAU 4 RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUE ET AGRONOMIQUE DU SOL (INERIS 2017).....	27
TABLEAU 5: CONCENTRATIONS DANS LES SOLS EN $\text{NG}/\text{KG MS SOL}$	29
TABLEAU 6: BCF DES VERS DE COMPOST.	33
TABLEAU 7: TABLEAU DES VALEURS DE FCM UTILISES PAR LE LOGICIEL TERRASYS	35
TABLEAU 8: MODELISATION DES CONCENTRATIONS MULTIMEDIAS EN MG/KG DE POIDS FRAIS AVEC DIFFERENTS BCF.	37
TABLEAU 9: CONCENTRATION D'EXPOSITION EN $\mu\text{G}/\text{KG}$ (POIDS FRAIS) DANS LA CHAIR DES PREDATEURS DES DIFFERENTS MODELES ELABORES SELON TERRASYS.....	46
TABLEAU 10: CATEGORIE DES SUBSTANCES D'APRES LEUR COMPORTEMENT LIE A LA LONGUEUR DE LA CHAINE ALIMENTAIRE, EN ROUGE [HERISSON]<[RENARD] ET EN BLEU [HERISSON]>[RENARD].....	49
TABLEAU 11 : DESCRIPTION DES 4 DIFFERENTES PARCELLES.....	51
TABLEAU 12: BCF MOYENS RETENUS.....	54
TABLEAU 13: CONCENTRATIONS MODELISEES DANS LA CAILLE DES BLES ($\text{MG}/\text{KG PF}$) EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES DES PARCELLES (MO = VALEUR GENERIQUE DE 0,1%)	55
TABLEAU 14 : CONCENTRATIONS MODELISEES DANS LA CAILLE DES BLES ($\text{MG}/\text{KG PF}$) EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES DES PARCELLES (MO = VALEURS MESUREES)	56
TABLEAU 15 : ENREGISTREMENT DES RESULTATS D'UN BIOTEST SOUS TERRASYS.....	59
TABLEAU 16 : POURCENTAGE D'EFFET SUR LA BIOMASSE A 14 JOURS.	60



Annexes

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

ANNEXE 2 : CALCUL DES INDICES DE RISQUES A PARTIR DE BIOTESTS.

ANNEXE 3 : CALCUL DES INDICES DE RISQUES A PARTIR DE LA MODELISATION MATHEMATIQUE POUR LE 2,3,7,8-TCDD.

ANNEXE 4 : EXTRAITS DU RAPPORT DE RISQUE INTEGRE (EXAMEN APPROFONDI DES RESULTATS).



Abréviations

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFSSA	Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (devenue ANSES)
BCF	Facteur de Bioconcentration
éRé	Évaluation des Risques pour les écosystèmes
IEM	Interprétation de l'Etat des Milieux
INERIS	Institut National de l'EnviRonnement Industriel et des risqueS
LQ	Limite de Quantification
PCBi	PolyChloroBiphényl indicateur
PCB-dl	PolyChloroBiphényl <i>dioxin-like</i>
PCDD	PolyChlorodibenzoDioxines
PCDF	PolyChlorodibenzoFurannes
PNEC	Concentration sans effet prévu (sur les écosystèmes)



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 4

Le livrable 4 porte sur l'évaluation des concentrations d'exposition dans le milieu naturel et l'évaluation du risque pour les écosystèmes, notamment l'étude de la sensibilité des paramètres qui interviennent pour modéliser le transfert de la substance depuis la matrice jusque l'organisme, via l'utilisation de l'outil de modélisation multimédia TerraSys. L'étude de sensibilité des paramètres se fait sur la base des données acquises expérimentalement au cours du projet et présentées dans les livrables 1 et 2 : concentrations en POPs (PCB et PCDD/F) dans les sols, BCFsols-végétaux potagers, BCFvers de terre.

L'objectif de ces travaux n'est pas de réaliser une nouvelle évaluation des risques du site de St-Cyprien mais bien d'apprécier la sensibilité des paramètres intervenant lors d'une évaluation des risques pour les écosystèmes pour répondre à des questions de recherche. Le rapport se découpe en 4 études portant sur différents paramètres intervenant dans la notion de transfert de substance chimique du sol à l'organisme.

Dans la première étude, l'influence du choix du BCF (facteur de bioconcentration) a été étudiée. Il a notamment été discuté de l'importance de sélectionner la moyenne ou la valeur maximum du BCF lorsque plusieurs valeurs sont disponibles. Il a aussi été discuté de l'intérêt d'écarter ou de conserver les BCF calculés depuis des données extrapolées au lieu de données mesurées (les concentrations mesurées en dessous des limites de quantification (LQ) des analyses chimiques sont considérées comme étant égale à $LQ/2$). Il a été déterminé que le BCF est un facteur déterminant et a un impact important sur les résultats. En conséquence, seules les valeurs de BCF avec un indice de confiance élevé (ce n'est pas le cas par exemple des valeurs calculées à partir de concentrations mesurées sous la limite de quantification) devraient être retenues. Enfin, la valeur maximale du BCF permet de ne pas sous-estimer le transfert de la substance aux maillons les plus élevés du réseau trophique.

Dans la deuxième étude, l'influence de la description du réseau trophique sur les résultats a été étudié. Le terme « trophique » se rapporte à ce qui est relatif à la nutrition d'un individu. La prise en compte de la complexité du réseau trophique est particulièrement pertinente dans les cas d'exposition d'un écosystème à des substances persistantes et bioaccumulables. Deux axes de réflexion ont été développés :

- La longueur de la chaîne trophique a-t-elle une influence sur les résultats de l'évaluation de l'exposition des prédateurs ?
- La description exhaustive de la diète du prédateur supérieur de l'écosystème entraîne-t-elle des résultats différents par rapport à la prise en compte de relations proies/prédateurs simplifiées ?

Les résultats indiquent qu'il est suffisamment protecteur de constituer un modèle conceptuel simplifié à la condition d'y intégrer des organismes situés à plusieurs niveaux de relations trophiques et de considérer le risque lié à l'empoisonnement secondaire à ces différents niveaux. Un premier prédateur suivi d'un prédateur supérieur constitue un minimum pour ne pas sous-estimer le transfert de ces contaminant dans l'écosystème.

Dans la troisième étude, il est évalué si une description plus précise du milieu a une influence sur l'expression des résultats de l'évaluation des risques pour les écosystèmes. Plusieurs paramètres ont été considérés : le pourcentage de couverture végétale, le taux de matière organique, la distribution granulométrique et ce sur les 4 mailles différentes du projet. Plusieurs scénarios sont donc envisagés : un scénario de référence qui prend une valeur moyenne pour ces paramètres, et 4 scénarios différents correspondant aux spécificités des 4 mailles du point de vue de ces paramètres. La description exhaustive (% sable, limon, argile, %MO et % couverture végétale) de ces différentes mailles, relativement homogènes n'a eu que très peu d'impact sur les résultats de la modélisation des concentrations d'exposition. Il est donc suffisant de regrouper les parcelles à peu près homogènes entre elles et de considérer pour ces paramètres la moyenne ou une valeur majorante.

La dernière étude diffère des précédentes dans le sens où elle ne fait pas varier un paramètre pour en éprouver la sensibilité sur les résultats. Elle propose d'explorer plus en avant la fonction de TerraSys qui prend en compte les résultats de bioessais effectués avec le sol des mailles sélectionnées dans le projet et de réaliser une estimation des risques à partir de ceux-ci. L'objet de cette étude est donc de voir comment ces résultats s'intègrent dans TerraSys et comment le logiciel les interprète conjointement avec les résultats de l'approche classique (opposant concentration d'exposition et seuil de référence sans danger) pour établir une conclusion sur le risque pour les écosystèmes.



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. Il porte sur les **T**ransferts et **R**isques des **O**rganiques **P**ersistants pour l'**H**omme et les **é**cosystèmes, en l'occurrence les dioxines/furannes (PCDD/F) et les polychlorobiphényles (PCB : PCBi et PCB-dl).

Le présent document correspond au Livrable n°4 et présente le retour d'expérience suite à l'utilisation du logiciel d'évaluation des risques pour les écosystèmes TERRASYS sur un site pollué par des contaminants organiques bioaccumulables. Il vise à apprécier la sensibilité des différents paramètres de la modélisation, notamment ceux concernant le transfert de contaminants dans le réseau trophique.

1. Le projet de recherche TROPHé

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 (enjeux sanitaires) et des réseaux trophiques (enjeux environnementaux), 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.

Afin de répondre au deuxième objectif du projet TROPHé, les résultats obtenus sur le site atelier et présentés dans les livrables précédents sont utilisés comme données d'entrée dans le logiciel TerraSys. Les différents paramètres qui sont sélectionnés par l'utilisateur du logiciel sont étudiés du point de vue de leur sensibilité sur les résultats de l'évaluation, en d'autres termes, il sera évalué l'incidence de la variabilité des mesures de terrain sur les données de sortie de l'évaluation des risques pour les écosystèmes. Une attention particulière a été portée aux paramètres de transfert dans les réseaux trophiques.

2. Le site atelier

Les données d'entrée du projet ont été obtenues à partir d'un ancien site industriel situé à Saint Cyprien, dans le département de la Loire (42), à environ 17 km au Nord-Ouest de Saint Etienne. Le centre-ville est situé au sud-est, à proximité de la Loire, à moins de 2 km du site. Ce site, à responsable défaillant, est actuellement géré par l'ADEME (Figure 1).

Il accueillait anciennement une usine de recyclage de transformateurs électriques, qui a généré une pollution des sols aux PCB ainsi qu'au cuivre. Dans les années 2000, le site était principalement entouré de parcelles agricoles dédiées au pâturage. De plus, des activités industrielles et tertiaires étaient et sont toujours présentes au sud et à l'est du site. La zone non concernée par les travaux de dépollution effectués sur le site a servi par la suite au stockage de palettes de bois provenant de chantier ou collectées dans les déchèteries. Le 22 août 2008, un incendie s'est déclaré sur ce point de stockage, au cours duquel 22 000 m³ de bois ont pris feu. Face à l'observation d'une mortalité de poissons dans les étangs proches recueillant les eaux d'extinction, l'utilisation de l'eau a été proscrite et le feu a été circonscrit par séparation des tas de bois et recouvrement de ces derniers par les terres du site. Le feu ne sera maîtrisé que fin novembre 2008.





(source Google Earth)

Figure 1 : localisation du site de Saint Cyprien

L'imprégnation des terres en PCB et leur mobilisation par l'incendie ont été à l'origine d'une contamination significative des sols et des végétaux en PCDD/F et PCB autour du site.

3. Les substances considérées

Les polluants suivis dans ce projet portent sur deux familles principales : les PolyChloroBiphényles ou PCB, et les polychlorodibenzo-dioxines /-furannes (PCDD/F). Ces substances organiques ont des propriétés de bioaccumulation et de persistance qui en font des candidats idéaux pour l'étude du transfert de polluants du sol à l'homme ou dans les réseaux trophiques. Leurs structures et leurs propriétés ont été décrites dans le livrable 2 concernant la phase expérimentale du projet TROPHé (INERIS 2017).

4. Les cas d'études suivis

L'objet du travail présenté dans ce rapport est d'étudier la sensibilité des paramètres qui interviennent lors d'une d'évaluation des risques pour les écosystèmes réalisée avec le logiciel TERRASYS, notamment ceux concernant le transfert de contaminants dans le réseau trophique. Les études ont été conduites sur les paramètres suivants :

- Le facteur de bioconcentration (BCF)
- La complexité du réseau trophique
- Les caractéristiques du milieu (matière organique, couverture végétale, distribution granulométrique)

En complément, les fonctions de TerraSys permettant d'intégrer les résultats de bioessais à l'évaluation du risque ont été étudiées.



5. Notions sur le transfert des contaminants

Le transfert des contaminants le long de la chaîne trophique peut être considéré comme l'action combinée de plusieurs phénomènes.

- La bioconcentration

La bioconcentration est le résultat net de l'absorption, distribution et excrétion d'une substance chimique dans un organisme vivant exposé uniquement via son milieu de vie (eau, sédiments, air, sol). Le facteur de bioconcentration (BCF) représente le ratio à l'équilibre entre la concentration dans l'organisme et la concentration dans le milieu (INERIS 2014).



Figure 2: bioconcentration, modifié depuis Procter & Gamble 2004

- La bioaccumulation

La bioaccumulation d'une substance chimique correspond à l'augmentation de sa concentration dans un organisme vivant par rapport à sa concentration dans le milieu environnant, en intégrant les apports via son milieu de vie (eau, sédiments, air, sol) et la nourriture (INERIS 2014). Le facteur de bioaccumulation (BAF) correspond donc au rapport entre l'organisme et la concentration dans le milieu où il trouve son alimentation.



Figure 3: Bioaccumulation d'après Procter & Gamble 2004.

- La biomagnification/bioamplification

Enfin, la bioamplification (ou biomagnification selon le terme anglais) est définie comme l'accumulation de contaminants ainsi que son transfert le long des réseaux trophiques. Pour les substances bioamplifiées, plus on monte dans des niveaux supérieurs des réseaux alimentaires, plus la substance peut être présente en grande quantité dans les tissus des organismes (INERIS 2014). Le facteur de biomagnification (BMF) fait référence à ce phénomène, il représente le ratio à l'équilibre entre la concentration dans la chair du prédateur et celle de sa proie.

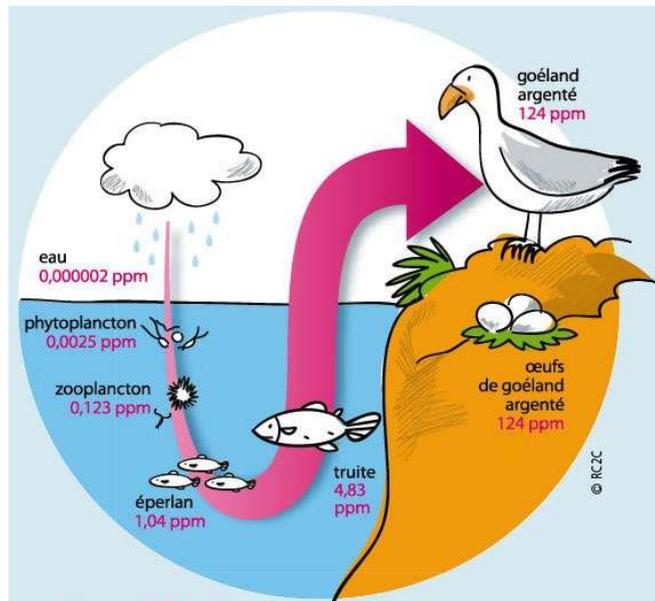


Figure 4: Exemple de bioamplification : le cas du PCB.



II Etude de la sensibilité des paramètres de transferts en évaluation des risques pour les écosystèmes

Le projet TROPHé vise à améliorer la connaissance des transferts de contaminants organiques bioaccumulables dans les organismes vivants mais aussi à apprécier la sensibilité des paramètres qui décrivent ce transfert dans les outils de modélisation du risque. Dans ce cadre, l'INERIS a entrepris d'utiliser les données issues d'un site pollué existant et de les intégrer dans le logiciel de modélisation des risques pour les écosystèmes TerraSys pour évaluer l'incidence de la variabilité de certains paramètres sur les résultats de l'évaluation des risques pour les écosystèmes et plus particulièrement l'évaluation des risques liés au transfert de substances persistantes et bioaccumulables.

Le recours à la modélisation du transfert est nécessaire lorsque l'évaluateur s'intéresse au risque auquel sont soumis les échelons supérieurs du réseau trophique d'un écosystème. En effet, les représentants de ces échelons sont souvent des vertébrés supérieurs protégés par la réglementation ce qui ne permet pas la mesure de l'imprégnation et des transferts sur des échantillons *in situ*.

L'impact des paramètres de transfert des contaminants dans le réseau trophique sur les résultats de l'évaluation est évalué en les faisant varier et en comparant les résultats obtenus. Il convient de souligner que l'objectif de ces travaux n'est pas de réaliser une nouvelle évaluation du risque du site mais bien d'apprécier la sensibilité des paramètres intervenant lors d'une évaluation de l'exposition pour les écosystèmes. C'est pourquoi certains paramètres ont été fixés pour pouvoir faciliter l'interprétation des résultats. Par exemple, dans la plupart des cas d'étude suivis dans ce document, les concentrations des substances dans les différentes mailles sont moyennées, la spatialisation de la pollution n'est donc pas prise en compte, ce qui aurait pu conduire à masquer la sensibilité des paramètres variables sur les résultats d'une évaluation. Le fait de fixer certains paramètres pour pouvoir observer l'influence de paramètres que l'on veut spécifiquement étudier a ainsi pour conséquence indirecte que les résultats obtenus ne doivent pas être considérés comme des résultats d'évaluation des risques sur ce site. D'autre part, une autre limite de l'étude est que dans la plupart des cas les calculs ne dépassent pas le stade de la modélisation des concentrations d'exposition, l'étude ne poursuit pas jusqu'à la quantification d'un indice de risque. Cette limite est liée au fait qu'il n'a pas été possible de renseigner une valeur de référence d'écotoxicité pour la plupart des PCB et PCDD/F. Cette dernière limite n'a *a priori* pas d'influence sur l'étude de la sensibilité des paramètres influant sur le transfert des substances.



III L'évaluation du risque en quatre phases selon TerraSys

Le logiciel TerraSys est un logiciel conçu et commercialisé par SANEXEN pour réaliser des analyses de risques écotoxicologiques telles que réalisées dans le contexte réglementaire canadien.

Pour estimer le risque dans un réseau trophique, TerraSys modélise des concentrations auxquelles sont exposés les organismes de plusieurs niveaux trophiques à partir des concentrations mesurées dans les milieux (dans le sol) et des paramètres (notamment de transfert) définissant le schéma conceptuel d'exposition

Ces valeurs d'exposition sont confrontées à des valeurs seuils, propres à chaque substance, visant à assurer la protection des écosystèmes. Elles sont estimées à partir des données obtenues lors d'essais en laboratoire. Cette méthode correspond à l'approche chimique (ou approche substance) et s'applique pour chacune des substances retenues pour l'évaluation. Elle est utilisée pour évaluer le risque lié aux rejets industriels et ses principes se retrouvent également dans les réglementations REACH (pour déterminer les PNEC – Predicted no Effect Concentration – l'exposition des milieux et l'indice de risque) et la DCE (pour déterminer les NQE – Normes de Qualité Environnementales).

TerraSys contient également un module « biotests » qui permet de faire intervenir des notions d'une autre approche d'évaluation du risque pour les écosystèmes : l'approche écotoxicologique. Cette dernière nécessite que des bioessais soient réalisés avec le sol contaminé. TerraSys est ensuite capable d'intégrer les informations complémentaires issues de ces différentes approches du risque.

Le manuel de référence du logiciel, outre la description du fonctionnement, fournit la plupart des équations utilisées (Sanexen 2002). Le logiciel fourni pour l'évaluation les descripteurs de nombreux récepteurs écologiques. De nombreux autres paramètres doivent être renseignés manuellement, bien que des options de calcul automatique soient disponibles pour certains d'entre eux.

Par ailleurs, une base de données des propriétés des substances les plus communes est mise à disposition.

Avec TerraSys, la réalisation de la modélisation du risque pour les écosystèmes se déroule en 4 phases. À l'usage, l'évaluateur prépare l'ensemble des données disponibles et décrit son cas d'étude lors des deux premières phases, les résultats sont obtenus puis interprétés pendant la troisième et la quatrième phase.

1. Phase 1 : Les données d'entrée

- *Le fond de carte de la zone d'étude*

TerraSys comprend des fonctions de cartographies et de géostatistiques. Une carte et un masque de la carte restreint à la zone d'étude doivent donc être renseignés.

- *Les données de caractérisation physico-chimique des sols*

Ces données sont nécessaires pour prévoir le comportement et calculer les concentrations des substances dans les différents milieux. Les différentes étapes expérimentales du projet TROPHé ont permis de caractériser les sols sélectionnés pour conduire cette étude. Ces paramètres obtenus par la mesure seront utilisés préférentiellement aux paramètres par défaut comme données d'entrée (voir V Les données d'entrée).

- *La caractérisation des contaminants*

Une base de données de 134 substances est intégrée dans la dernière version du logiciel (1.09 au moment de la rédaction de ce rapport). Si une substance est absente de cette base de données, elle peut y être ajoutée à condition de pouvoir renseigner les champs concernant les propriétés physicochimiques et toxicologiques nécessaires à l'évaluation. Pour toutes les substances considérées dans le projet TROPHé à l'exception de la 2,3,7,8-TCDD, il n'existe pas de valeur seuil toxicologique pour l'environnement (voir V Les données d'entrée). Toutefois, l'objectif de ce projet est d'ordre méthodologique et porte sur l'étude de la sensibilité des paramètres sur l'exposition des récepteurs écologiques et notamment sur le transfert des substances persistantes du sol au prédateur. L'absence de donnée de toxicité n'est donc pas pénalisante pour notre étude, il n'a été jugé nécessaire ni de déterminer les seuils manquants ni de conduire une évaluation des risques.

- *Les résultats de biotests ayant été conduits sur des échantillons du sol.*



L'utilisation de cette fonction est optionnelle, elle permet d'intégrer des résultats obtenus selon l'approche écotoxicologique (ou approche matrice) du risque pour les écosystèmes. Elle consiste à extrapoler les résultats depuis une batterie d'essai d'écotoxicité réalisés avec des sols prélevés sur sites. L'information issue de ces bioessais permet de prendre en compte de nouveaux paramètres comme la biodisponibilité et « l'effet mélange » qui intervient lorsque plusieurs substances sont présentes dans le milieu. Ces informations complémentaires permettent une interprétation plus fine du risque pour les écosystèmes. La base de données de TerraSys comporte la description de 52 bioessais. Parmi eux se trouvent des bioessais sur algues, sur plantes aquatiques, sur invertébrés d'eau douce et d'eau de mer, sur invertébrés benthiques, sur poisson d'eau douce, sur plantes terrestres et sur invertébrés terrestres. Il est également possible de remplir un formulaire pour renseigner un essai qui ne serait pas inclus dans la base de données.

2. Phase 2 : La définition du modèle conceptuel de l'écosystème

L'interface de TerraSys permet la définition d'un modèle conceptuel d'exposition de l'écosystème par l'utilisation de boîtes modulables. Ces boîtes représentent les différents compartiments environnementaux (sol, air, eau de surface) et les récepteurs écologiques qui ont été identifiés en amont de l'étude. Les compartiments environnementaux « air », « surface du sol » et « sol sous-surface » correspondent au minimum nécessaire pour permettre la modélisation. Les informations permettant de les décrire sont donc nécessaires. Il est possible d'en rajouter d'autres comme le compartiment « eaux de surface – lac ou étang » par exemple. Les récepteurs écologiques sont des populations animales ou végétales, identifiées dans le milieu naturel étudié et qui sont généralement soit des espèces protégées par la réglementation soit représentatives du bon état du milieu naturel. Sélectionnés en amont de l'étude d'impact, la protection de ces récepteurs écologiques, alors considérés comme les cibles de l'évaluation, doit garantir la sauvegarde de l'ensemble de l'écosystème. Ces récepteurs sont à sélectionner dans la base de données TerraSys, composée d'animaux (poissons, amphibiens, reptiles, mammifères, et oiseaux,...) et de végétaux (macrophytes aquatiques, ...) qu'il est possible de compléter ou de modifier. La construction du modèle conceptuel permet d'établir les relations attendues entre les cibles de l'évaluation et les sources de contamination possibles. Certaines relations comme la prédation/alimentation ou le contact relient automatiquement certains éléments, les autres sont ajoutées via un menu contextuel.



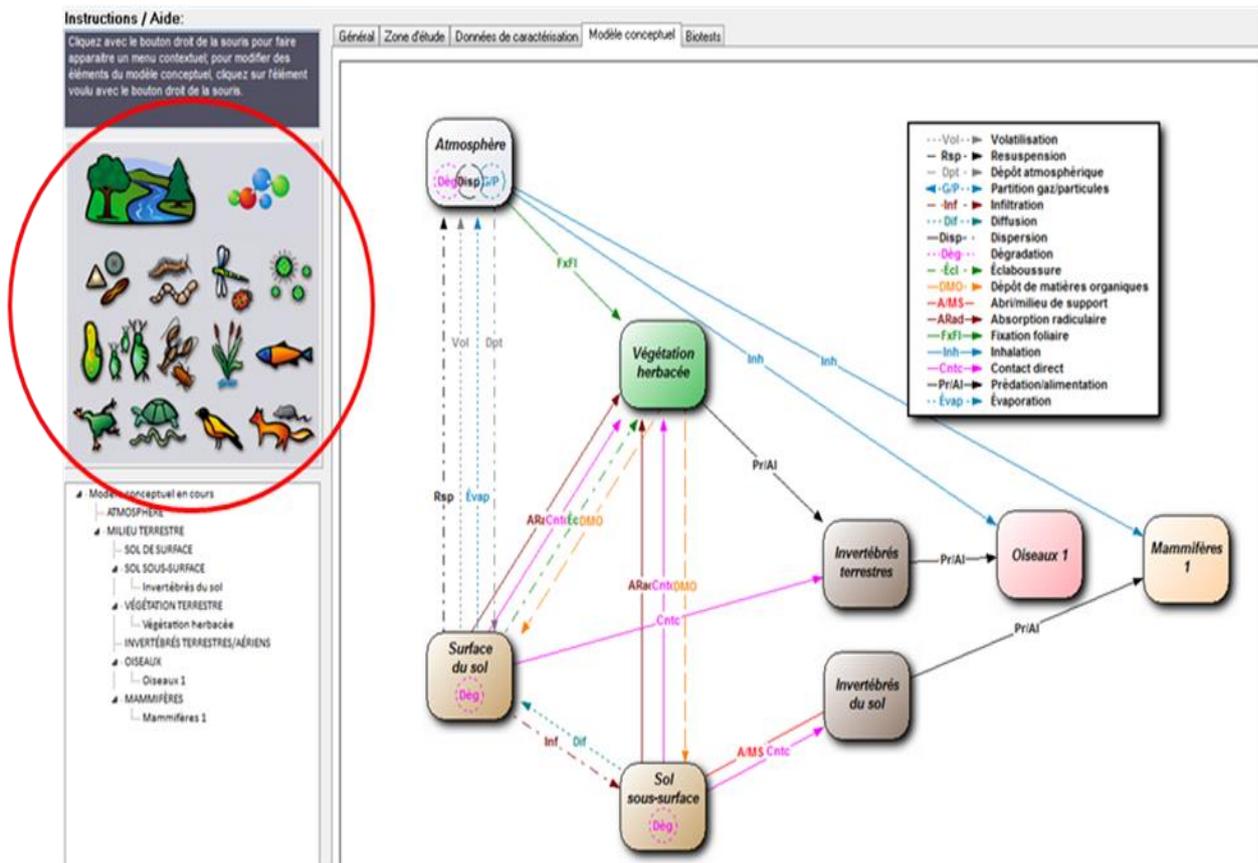


Figure 5 Interface de la définition du modèle conceptuel dans TerraSys,.

Les caractéristiques de ces compartiments et celles des récepteurs écologiques sont complétées lors de cette phase. Par exemple, c'est lors de cette phase que la distribution granulométrique et le taux de matière organique du sol sont renseignés.

3. Phase 3 : La modélisation des données

La modélisation des données se fait en deux étapes et est tributaire des informations acquises aux phases 1 et 2.

- *Etape 1 : la modélisation des concentrations dans les divers milieux.*

Les concentrations des substances chimiques dans les différents milieux sont calculées à partir des données de caractérisation des différents éléments du modèle conceptuel. Ces derniers correspondent aux concentrations initiales du sol, aux propriétés physico-chimiques et environnementales des substances et des milieux et enfin à l'organisation du modèle.



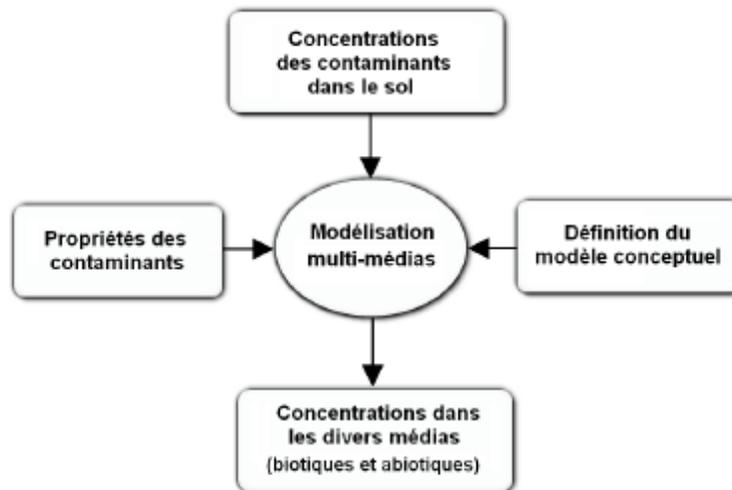


Figure 6: Modélisation des concentrations dans les divers milieux (Sanexen 2002).

- *Etape 2 : la modélisation de l'exposition et du risque pour les récepteurs écologiques.*

La modélisation se poursuit et calcule les concentrations auxquelles sont exposés les récepteurs écologiques sélectionnés pour l'étude. Le calcul du risque confronte les valeurs de référence écotoxicologiques propres à chaque substance aux concentrations d'exposition de ces récepteurs.

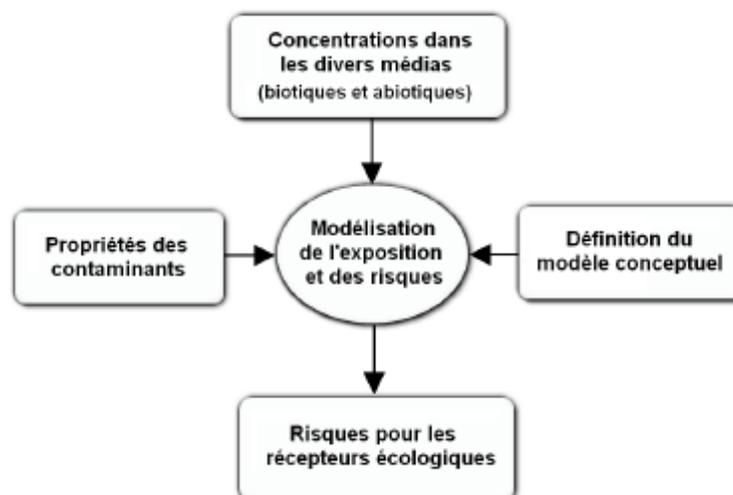


Figure 7: Modélisation du risques pour les récepteurs écologiques (Sanexen 2002).

4. Phase 4 : L'interprétation des résultats

Cette étape nécessite l'expertise professionnelle de la personne en charge de l'évaluation. Des fonctions limitées d'assistance à l'interprétation sont toutefois disponibles.

IV Présentation des différents cas d'étude pour le projet

Dans le cadre du projet TROPHé qui porte sur la modélisation des transferts, il est proposé de faire varier les paramètres qui peuvent avoir une influence sur les transferts de substances organiques bioaccumulables le long de la chaîne trophique au travers de 4 cas d'études. Le premier cas d'étude s'intéresse à la bioconcentration de la substance, c'est-à-dire au transfert de la substance contenue dans le milieu à l'organisme exposé. Le deuxième est axé sur le transfert de la substance d'un organisme à l'autre via les relations de prédateurs. Le troisième s'intéresse plus particulièrement à l'influence sur le transfert que peuvent avoir les caractéristiques qui définissent un sol. La quatrième étude propose d'évaluer comment agit la fonction bioessai du logiciel de modélisation sur les résultats de l'évaluation, elle ne traite donc pas directement de la sensibilité des paramètres sur la modélisation du transfert de substances dans le réseau trophique.

1. Etude 1 Les facteurs de bioconcentration

Le facteur de bioconcentration (BCF²) reflète la propriété d'une substance à être transférée depuis le milieu dans un organisme vivant puis à s'y accumuler. Il est calculé en faisant le rapport de la concentration dans l'organisme vivant et la concentration dans son milieu.

Comme l'ont illustré les résultats obtenus lors des travaux conduits précédemment et présentés dans le livrable n°2 du projet TROPHé (INERIS 2017), indépendamment de la substance, la variabilité obtenue à la mesure du BCF peut être importante. En évaluation des risques pour les écosystèmes se pose toujours la question « quel BCF utiliser ? ».

Plusieurs modélisations seront effectuées afin de vérifier si le fait d'utiliser le BCF maximum disponible pour se placer en hypothèse de travail conservatrice ou si utiliser un BCF moyenné pour être plus représentatif a un réel impact sur les résultats de l'évaluation.

Voie d'exposition

- Contact direct (bioconcentration)
- Ingestion de sol (bioconcentration)
- Inhalation (bioconcentration)
- Empoisonnement secondaire (bioaccumulation)

Concentrations dans le sol

- Moyenne des concentrations mesurées sur les 4 parcelles (P1, P2, P3, P4)

Cibles de l'évaluation

- Invertébrés du sol
- Prédateur

Variable de l'étude : le BCF

- BCF mesuré moyen pour chaque substance
- BCF moyen calculé en prenant en compte les concentrations non quantifiables
- BCF mesuré maximum pour chaque substance

² Le facteur de bioaccumulation (BAF) prend aussi en compte l'apport de substance dans l'organisme par la prise d'alimentation. La distinction entre le BCF et le BAF n'est pas faite dans ce rapport. « BCF » englobe donc la notion de transfert de la substance à l'organisme.



2. Etude 2 La complexité du réseau trophique

Le terme « trophique » se rapporte à ce qui est relatif à la nutrition d'un individu. Une relation trophique est le lien qui unit un prédateur à sa proie et le réseau trophique est formé par l'ensemble de ces interactions dans un écosystème. La prise en compte de la complexité du réseau trophique est particulièrement pertinente dans les cas d'exposition d'un écosystème à des substances persistantes et bioaccumulables, car ces caractéristiques tendent à rendre les effets sur les niveaux trophiques supérieurs prépondérant par rapport aux effets par contact direct.

La construction du modèle conceptuel permet de définir un réseau trophique plus ou moins complexe. Il est possible de transcrire un écosystème très simple de type source unique/récepteur unique ou de définir un écosystème très complexe faisant intervenir plusieurs sources de contamination et plusieurs niveaux de prédation comme dans l'exemple de la Figure 8.

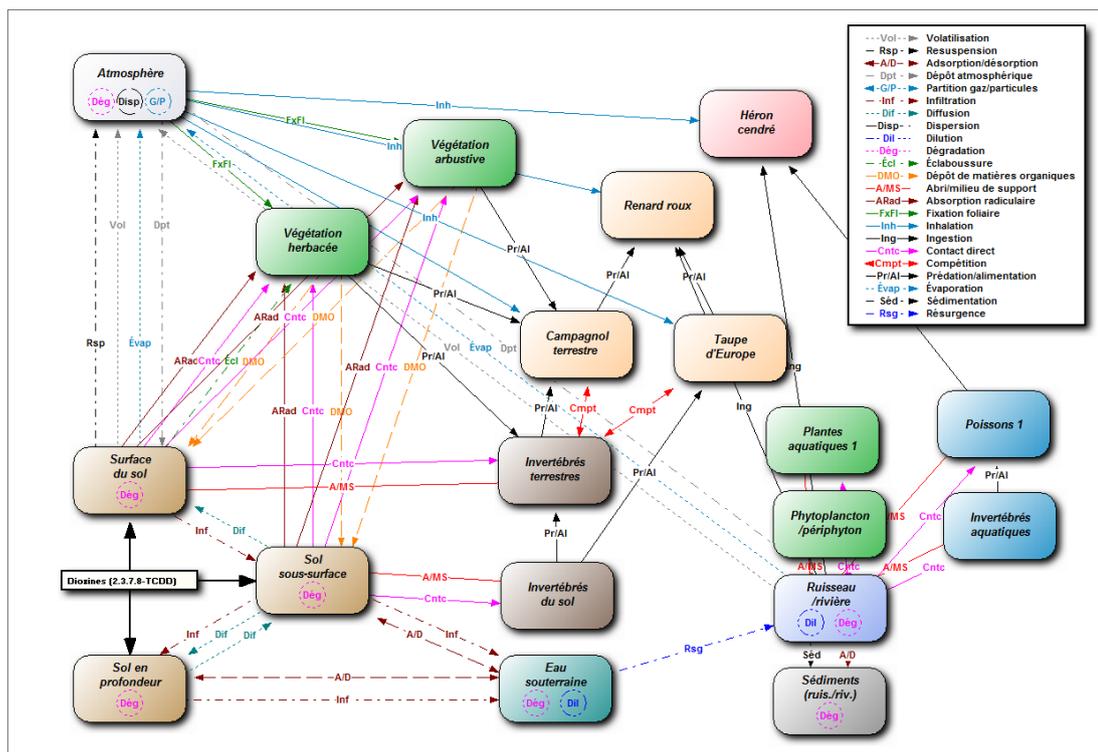


Figure 8 : Exemple du modèle conceptuel décrivant un réseau trophique complexe.

L'élaboration d'un modèle conceptuel comportant un réseau trophique complexe permettra de préciser comment TerraSys modélise le transfert des substances dans un écosystème dont la description est plus détaillée.

Deux types de modulation sont envisagés :

- Dans la chaîne alimentaire étendue, un prédateur supplémentaire est ajouté en bout de chaîne alimentaire. Il sera observé si l'accumulation de substances organiques persistantes y est sensiblement supérieure à celle qui est calculée dans le premier prédateur de la chaîne simplifiée.
- Dans le réseau trophique complexe, la description de l'environnement sera plus détaillée et fera intervenir plus d'espèces ainsi que de relation proie/prédateur. Il sera observé si la description d'une diète diversifiée fait varier la quantité de substance transférée et accumulée dans la chair du prédateur supérieur.

Voies d'exposition

- Ingestion de sol (bioaccumulation)
- Ingestion de végétation herbacée (bioaccumulation)
- Inhalation (bioconcentration)
- Empoisonnement secondaire (bioaccumulation)



Concentrations dans le sol

- Moyenne des concentrations mesurées sur les 4 parcelles

Cibles de l'évaluation

- Prédateur

Variable de l'étude : la complexité du réseau trophique

- Chaîne alimentaire simplifiée (modèle de référence voir Figure 12)
- Chaîne alimentaire allongée comprenant un prédateur supérieur
- Réseau trophique complexe

3. Etude 3 La description du milieu

D'autres facteurs peuvent avoir un effet sur la quantité de substance transmise aux organismes. Le pourcentage de couverture végétale de la zone étudiée a une influence sur la stabilité du sol et la quantité de polluant transféré aux plantes. La topographie de la zone d'étude peut indiquer si des dépressions à la surface du sol vont provoquer une accumulation localisée des contaminants. Enfin, la distribution granulométrique du sol et son taux de matière organique ont une influence sur la biodisponibilité des composés organiques persistants considérés.

Plusieurs scénarios sont donc envisagés : un scénario de référence qui prend une valeur moyenne pour ces paramètres, et des scénarios différents correspondant aux spécificités des 4 parcelles retenues afin de voir si une description plus précise de la topographie de ces dernières peut avoir un réel impact sur l'expression des résultats de l'évaluation des risques pour les écosystèmes.

Voie d'exposition

- Ingestion de sol (bioaccumulation)
- Ingestion de végétation herbacée (bioaccumulation)
- Inhalation (bioconcentration)
- Empoisonnement secondaire (bioaccumulation)

Concentrations dans le sol

- Moyenne des concentrations mesurées sur les 4 parcelles (P1, P2, P3, P4)

Cibles de l'évaluation

- Prédateur

Variable de l'étude : la description du milieu

- 1 modélisation avec les paramètres moyennés pour les 4 parcelles (distribution granulométrique, % de couverture végétale, topographie, taux de matière organique)
- 4 modélisations, chacune des 4 parcelles est considérée individuellement, les paramètres utilisés correspondent à celles des parcelles.

4. Apport de données additionnelles : résultats des bioessais.

Une évaluation du risque pour les écosystèmes peut se concevoir selon plusieurs approches. L'approche substance (ou approche chimique) est l'approche suivie dans les différents cas d'étude de ce rapport, elle consiste à opposer substance par substance une concentration d'exposition et une concentration sans effet attendu. Il est également possible de suivre des indicateurs écologiques (approche écologique) ou de réaliser une batterie de biotests avec le sol pollué (approche matrice ou écotoxicologique), le mieux étant de combiner ces différentes approches.

TerraSys propose d'intégrer les résultats obtenus selon l'approche substance et selon l'approche écotoxicologique au travers de son module « bioessais ». Ce quatrième point n'étudie pas la sensibilité des paramètres d'entrée vis-à-vis des résultats du modèle comme les trois premiers, mais propose d'évaluer comment agit la fonction bioessais du logiciel de modélisation sur les résultats de l'évaluation. Les données obtenues lors des essais d'écotoxicité réalisés sur des échantillons de sol par un partenaire extérieur à TROPHÉ : APESA seront utilisés pour cette évaluation.



V Les données d'entrée

1. Ensemble des données disponibles

L'incidence de la variabilité des données mesurées sur les résultats peut être évaluée en modifiant les variables de façon aléatoires. Toutefois, de nombreuses données ont été rassemblées sur le site pollué de Saint-Cyprien pendant les précédents travaux du projet TROPHé. Ces résultats constituent une opportunité d'utiliser des données réelles provenant d'un site bien documenté pour éprouver la sensibilité des paramètres sur l'évaluation des risques, sur les limites du logiciel, tout en considérant des variables qui restent réalistes.

En conséquence, les données qui sont utilisées sont issues de la littérature scientifique mais surtout des travaux issus du projet TROPHé. Par exemple, les valeurs mesurées des BCF obtenus lors des essais réalisés sur plantes et vers de terre (INERIS 2017) et les résultats des essais d'écotoxicité qui ont été réalisés avec les échantillons du site (LASCOURREGES 2015) seront utilisées lors des modélisations.

2. Les substances retenues

Le projet TROPHé a suivi 35 substances organiques persistantes (PCB, PCDD/F). La liste est rappelée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Substances organiques persistantes considérées durant le projet TROPHé

PCB	PCDD/F
PCB 28	2,3,7,8-TCDD
PCB 52	1,2,3,7,8-PeCDD
PCB 77	1,2,3,4,7,8-HxCDD
PCB 81	1,2,3,6,7,8-HxCDD
PCB 101	1,2,3,7,8,9-HxCDD
PCB 105	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD
PCB 114	OCDD
PCB 118	2,3,7,8-TCDF
PCB 123	1,2,3,7,8-PeCDF
PCB 126	2,3,4,7,8-PeCDF
PCB 138	1,2,3,4,7,8-HxCDF
PCB 153	1,2,3,6,7,8-HxCDF
PCB 156	1,2,3,7,8,9-HxCDF
PCB 157	2,3,4,6,7,8-HxCDF
PCB 167	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF
PCB 169	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF
PCB 180	OCDF
PCB 189	

TerraSys propose une base de données qui regroupe un total de 134 substances. Malheureusement parmi les substances considérées dans le cadre du projet, seule la 2,3,7,8-TCDD en fait partie. Un travail de collecte de données a donc été nécessaire pour pouvoir compléter la base de données TerraSys avec les propriétés des 34 autres substances. Pour cela, il est possible de différencier deux types de propriétés : les propriétés absolument indispensables pour que la modélisation soit possible et celles qui peuvent être obtenues par le calcul ou par les extrapolations proposées dans le logiciel (Tableau 2). Il est aussi possible de renseigner ces dernières avec des données expérimentales, lorsqu'elles sont disponibles.



Tableau 2: Liste des propriétés de la substance nécessaires au fonctionnement de TerraSys

Propriétés indispensables	Propriétés qui peuvent être calculées
Kow ou Koc ³	Kow ou Koc
Poids moléculaire	Kd sol
Point de fusion	Kd MES
Pression de vapeur	Kd sédiment
Solubilité	BCF vers de terre
	BCF plante
	BCF sol-racine
	BCF poisson

De nombreux paramètres sont calculés automatiquement par le logiciel, mais certains ont dû être calculés à part, puis ajoutés dans le fichier.

Les Kd_sol, Kd_mes et Kd_sed (les coefficients de partition dans les milieux sol, matière en suspension et sédiment) ont été calculés à l'aide des formules disponibles dans le manuel de TerraSys qui utilisent les Koc des substances (coefficient de partition normalisé par rapport au carbone organique). Ces Koc ont par ailleurs été transférés depuis la base de données de MODUL'ERS (constituée depuis une recherche bibliographique - INERIS 2015), logiciel utilisé dans le livrable 3 du projet TROPHé. Lorsqu'une fourchette de valeurs est disponible, la valeur la plus faible est choisie, pour simuler un risque de transfert plus important, qui va de pair avec une moindre fraction retenue et accumulée dans le sol. A ce propos, pour certaines substances (PCB 118, PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 118, PCB 138, PCB 153) des fourchettes de valeurs étaient disponibles dans la littérature scientifique pour les Kd_mes et Kd_sed. Les valeurs retenues pour cette étude, obtenues par le calcul à partir des Koc issus de MODUL'ERS, sont toutes très en dessous ou proches de la valeur minimale de ces fourchettes de valeurs, à l'exception de la valeur calculée pour le PCB 153 qui elle est très au-dessus.

Les valeurs par défaut de certains paramètres ont par ailleurs été modifiées manuellement. Ainsi, les fractions absorbées par voie orale (Amphibiens/Reptiles/Oiseaux/Mammifères) et le ratio de concentrations dans les parties reproductrices des plantes/parties végétatives⁴ ont une valeur par défaut de 0.00. Cette valeur a été corrigée pour correspondre à la même valeur générique (1.00) que les autres substances organiques de la base de données.

Les BCF (Facteurs de bioconcentration) utilisés pour cette étude correspondent à ceux obtenus lors des phases précédentes du projet TROPHé. Les valeurs moyennes sont retenues pour la définition par défaut des substances:

- BCF_vers : les BCF correspondent à la moyenne des BCF obtenus pour les 4 parcelles.
- BCF_plante : la végétation des parcelles considérées est essentiellement composée d'herbe, de gaillet et de ronces. Les BCF disponibles les plus pertinents correspondent donc à la moyenne des BCF obtenus sur les graminées cultivées sur les 4 parcelles.

Toutefois, le BCF étant un paramètre important du point de vue des transferts dans le réseau trophique, il est prévu d'étudier l'incidence de ce choix sur les résultant en utilisant les autres BCF obtenus (BCF maximum par exemple) lors de l'Etude 1 (IV. 1).

Ces valeurs sont présentées dans le tableau suivant :

³ Il est à noter que le Koc lui-même peut être calculé depuis le Kow ou le Kow depuis le Koc selon la relation : $\log Koc = 0,983(\log Kow) + 0,0002$ proposée en p238 du manuel de Référence TerraSys (Sanexen (2002). Manuel de référence TerraSys, Sanexen: 424.); une seule des deux valeurs est donc nécessaire.

⁴ Le « ratio de concentrations dans les parties reproductrices des plantes / parties végétatives » correspond à la distribution de la substance dans les différents organes de la plante. Il ne s'agit pas de la même mesure que le ratio de concentration du contaminant entre le sol et la plante, Ce dernier est le BCF_plante obtenu pendant la phase expérimentale et ne correspond pas à ce paramètre.



Tableau 3: BCF moyens obtenus lors des essais (INERIS 2017).

Substance	BCFvers	BCFplante	Concentration moyenne sur les 4 parcelles (ng/kg MS) ⁵
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,04	0,015	126,1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,13	0,04	98,4
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01	0,002	360,7
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,07	0,01	6,9
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,08	0,02	140,8
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,07	0,005	15,1
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,08	0,023	73,2
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,04	0,009	9,2
1,2,3,7,8-PeCDD	0,15	0,012	5,3
1,2,3,7,8-PeCDF	0,21	0,054	87,9
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,04	0,011	85,3
2,3,4,7,8-PeCDF	0,14	0,031	84
2,3,7,8-TCDD	0,21	0,016	1,4
2,3,7,8-TCDF	0,29	0,095	108,4
OCDD	0,03	0,006	283,5
OCDF	0,02	0,006	479,2
PCB 101	1,62	3,7	1309,2
PCB 105	1,49	1,9	507,6
PCb 114	1,07	4,2	18,8
PCB 118	1,79	2,6	1310
PCB 123	1,31	0,74	38,7
PCB 126	0,66	0,063	121,5
PCB 138	1,05	0,29	6671,9
PCB 153	1,27	0,32	7860,4
PCB 156	0,93	0,17	558,4
PCB 157	0,93	0,13	125
PCB 167	1,06	0,14	393,7
PCB 169	0,49	0,039	20,9
PCB 180	0,77	0,075	5200,8
PCB 189	0,67	0,019	133,9
PCB 28	0,86	4	92,4
PCB 52	1,39	6,8	171,4
PCB 77	0,92	0,82	117,6
PCB 81	0,52	0,084	12,7

Les informations nécessaires ont pu être rassemblées pour toutes les substances à l'exception de la 1,2,3,7,8,9-HxCDF. En effet, le BCFvers et le BCFplante n'ont pas pu être obtenus pendant les phases expérimentales du projet TROPHé car il n'a pas été possible d'en mesurer les concentrations ni dans le sol ni dans les organismes. Il aurait été possible de le calculer avec une formule et son Koc mais étant donné sa faible présence dans le milieu pollué, l'impossibilité d'évaluer les variations du paramètre BCF et enfin le

⁵ Concentration dans les sols, voir 3.2.1.



fait qu'il constitue une exception dans un jeu de donnée déjà conséquent, il a été décidé de ne pas intégrer la 1,2,3,7,8,9-HxCDF pour la suite de l'étude.

3. Définition du modèle de référence

Afin de pouvoir estimer les transferts des substances organiques persistantes dans un réseau trophique, un modèle conceptuel de complexité minimale a été élaboré avec TerraSys. Il comprend une unique source de contamination, le sol, et un récepteur écologique final de la contamination. Notons qu'il est possible d'ajouter d'autres sources de contamination comme l'ingestion d'eau par les organismes terrestres par exemple mais le modèle de référence doit rester simple pour pouvoir servir de référence de comparaison dans chacune des études.

3.1 Zone d'étude

Les modélisations réalisées dans ce rapport reposent sur l'utilisation de données réelles obtenues sur les parcelles sélectionnées dans le projet Trophé et qui présentent un sol fortement contaminé en PCB et PCDD/F. Au cours de travaux réalisés par URS en Octobre 2014, des prélèvements de sol ont été réalisés sur les multiples mailles qui découpent l'ensemble du terrain d'étude (Figure 9), les analyses chimiques ont permis de dresser une cartographie de la contamination en PCB et PCDD/F. Quatre mailles ont été retenues pour avoir un gradient de concentration, ce sont les parcelles 131-2, 144-2, 100-5 et 102-3 autrement appelées P1, P2, P3, et P4.

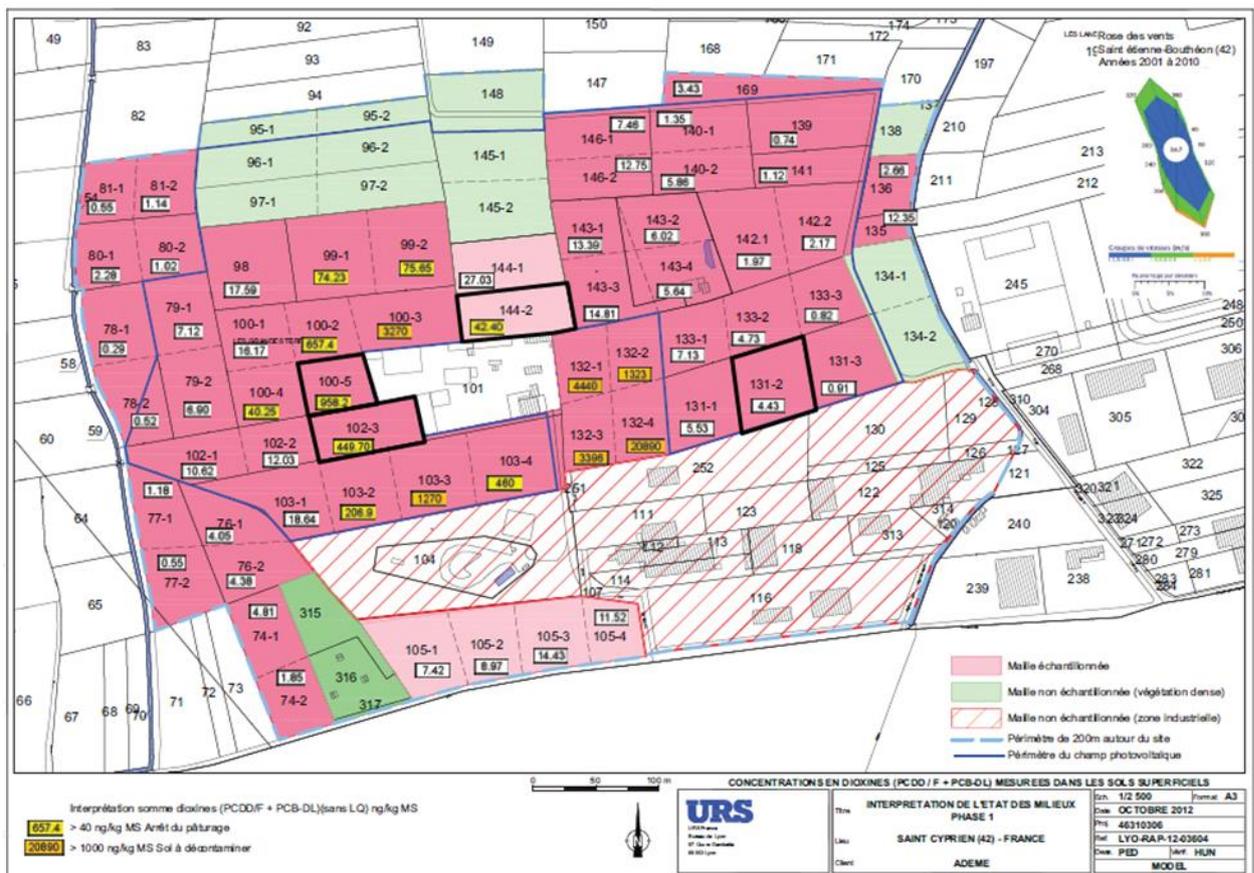


Figure 9 Localisation des 4 mailles sélectionnées sur le site de Saint-Cyprien.

La carte présentée ci-dessus correspond au fichier utilisé pour la modélisation dans TerraSys. Après avoir renseigné l'échelle, le logiciel calcule la superficie totale de la zone considérée dans la suite des travaux (13 200 m²).



3.2 Caractérisation des milieux

Afin de pouvoir poursuivre la modélisation, les caractéristiques des différents milieux doivent être renseignées dans les menus correspondants.

3.2.1 Le sol

- Caractéristiques physiques du sol

Dans un contexte de site ayant subi une pollution historique, la première voie d'exposition des milieux provient des sols. La modélisation des transferts impose que les propriétés des couches superficielles du sol soient renseignées. Ces propriétés incluent en particulier *a minima* la surface de la zone d'étude et la distribution granulométrique des composants du sol.

Propriétés de la surface du sol

Mode de la distribution granulométrique
Indiquez le mode statistique de la distribution granulométrique des sols de surface selon l'une ou l'autre des méthodes suivantes:
1. Sélectionnez le type de sol le plus représentatif du sol de surface
2. Indiquez les pourcentages d'argile, de limon et de sable du sol
3. Introduisez directement une valeur

Argile: 6 %
Limon: 12 %
Sable: 80 %

N.B.: La différence entre 100 % et la somme des teneurs d'argile, de limon et de sable est présumée être du gravier (2 %)

Mode de la distribution granulométrique : 2.93 mm

Surface du terrain (zone d'étude): 13200 m²
Nombre moyen de perturbations de la surface érodable du sol de surface: 0.00 /mois

Types d'occupation du sol

Zone	%Surf.	IR	Vgt	%Nu	Pente	OCC	Dpr
P1	25	33	90	0	0	20	0
P2	25	32	90	0	0	20	0
P3	25	32	60	20	0	20	0
P4	25	32	50	25	0	20	0

Zone (Désignation de la zone)

Type de milieu où se situe le terrain contaminé :

- Région isolée
- Environnement rural
- Environnement semi-urbain
- Environnement urbain
- Environnement urbain avec autoroutes
- Environnement industriel

Annuler OK

Figure 10 : TerraSys, interface de saisie des propriétés de la surface du sol.

S'il est possible de différencier les différentes parcelles du point de vue des paramètres d'occupation du sol (indice de rugosité, couverture végétale, pourcentage de sol à nu, pente, type d'occupation et dépressions), dans TerraSys, la distribution granulométrique est définie pour l'ensemble de la zone étudiée. Or, les données récoltées précisent que bien que la zone soit globalement homogène, les 4 parcelles présentent des différences. Ces différences toutefois ne conduisent pas à classer les 4 mailles dans des types de sol différents, elles sont de type « sable loameux ».

Tableau 4 Récapitulatif des caractéristiques pédologique et agronomique du sol (INERIS 2017).

Analyses	Granulométrie			MO (%)	pHeau	C/N
	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)			
P1 (131-2)	82,3	11	5,1	1,6	5,9	8,5
P2 (144-2)	79,4	12,8	6,3	1,5	6,2	9,0
P3 (100-5)	78,7	12,4	5,9	3,0	4,6	9,2
P4 (102-3)	83	8,8	5,3	2,9	5,9	10,9

Pour la définition du modèle conceptuel de référence, la distribution granulométrique de la zone d'étude est caractérisée d'après les moyennes en sables, limon et argile des 4 parcelles. La sensibilité de ces paramètres sera par la suite évaluée dans l'étude 3 en différenciant chaque parcelle et en réalisant une modélisation pour chacune.

- Concentrations retenues dans le sol

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

Les concentrations mesurées durant la phase expérimentale (échantillons prélevés pour les cultures de 2015, soit les 4 derniers tableaux de l'annexe 4a du livrable 2) sont utilisées pour définir les concentrations dans le sol du modèle de référence. Ces concentrations, sont rappelées dans le Tableau 5 ci-après.



Tableau 5: Concentrations dans les sols en ng/kg MS sol

	P1	P2	P3	P4	Moyenne
PCB indicateurs (6 ou 7 congénères)					
PCB 28	85	91,7	85	107,8	92,4
PCB 52	63	172,4	112,2	338,1	171,4
PCB 101	200	1985,6	682,3	2368,9	1309,2
PCB 118	136	1733,3	1074,9	2296,3	1310
PCB 138	1232	12125,6	4037,8	9292,2	6671,9
PCB 153	1516	14255,6	4541,1	11128,9	7860,4
PCB 180	870	9540	2228,9	8164,4	5200,8
Dioxines et furanes PCDD/F (17 congénères)					
2,3,7,8-TCDD	0,2	0,4	1,1	4,0	1,4
1,2,3,7,8-PeCDD	0,3	1,4	3,6	16,1	5,3
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,5	1,8	4,3	20,8	6,9
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,5	4,1	9,7	46,2	15,1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,5	2,5	5,9	28,0	9,2
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	4,3	42,2	76,3	381,9	126,1
OCDD	19,7	148,0	164,8	801,6	283,5
2,3,7,8-TCDF	2,9	37,2	135,8	257,9	108,4
1,2,3,7,8-PeCDF	1,6	25,4	90,2	234,3	87,9
2,3,4,7,8-PeCDF	1,8	25,5	76,2	232,3	84
1,2,3,4,7,8-HxCDF	2,8	46,4	130,1	383,9	140,8
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1,3	21,5	59,1	210,9	73,2
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,4	5,1	17,0	51,3	18,5
2,3,4,6,7,8-HxCDF	1,3	18,8	48,2	272,9	85,3
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	6,0	95,6	229,7	1111,7	360,7
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1,8	30,0	87,0	275,0	98,4
OCDF	9,8	167,3	403,9	1335,8	479,2
PCB-dl (12 congénères)					
PCB 77	9,6	93,0	115,3	252,6	117,6
PCB 81	0,8	3,0	11,3	35,5	12,7
PCB 105	62,4	627,4	416,2	924,4	507,6
PCB 114	1,0	11,1	19,1	44,1	18,8
PCB 118	135,7	1733,3	1074,9	2296,3	1310
PCB 123	4,6	49,7	28,2	72,2	38,7
PCB 126	11,4	139,9	80,7	254,1	121,5
PCB 156	77,4	935,8	351,2	869,1	558,4
PCB 157	15,9	185,1	83,6	215,3	125
PCB 167	55,3	668,6	242,9	608,0	393,7
PCB 169	2,5	17,6	13,0	50,6	20,9
PCB 189	15,6	215,6	77,1	227,6	133,9



TerraSys considère pour ses calculs la moyenne des concentrations des 4 parcelles, le détail des concentrations est utilisé avec sa fonction de cartographie que ce soit pour simplement placer les points de prélèvements sur la carte ou pour réaliser des simulations géostatistiques. Ces fonctions avancées de cartographie n'ont pas été explorées plus en avant dans le cadre de cette étude.

L'utilisation des moyennes de concentration dans le sol plutôt qu'une concentration maximale ou minimale est sans incidence sur les objectifs de l'étude puisqu'il s'agit d'évaluer la sensibilité des paramètres proposés par TerraSys sur les résultats d'une éRé, avec un intérêt particulier sur les paramètres ayant trait au transfert dans la chaîne trophique.

3.2.2 L'air

Pour pouvoir modéliser les concentrations dans le compartiment atmosphérique, TerraSys a besoin de connaître certains paramètres météorologiques propres au site étudié. Ces informations ne sont pas toujours disponibles et bien que le site de Saint Cyprien soit bien approvisionné en données, il n'a pas été possible de renseigner tous les champs.

Localisation géographique
 Hémisphère Nord Hémisphère Sud

Fichier de données météorologiques horaires (facultatif):

Latitude: 0 ° Nord Altitude au-dessus de la mer: 29 mètres Hauteur de l'anémomètre: 5.00 mètres

Indiquez les valeurs mensuelles applicables au terrain à l'étude:

Paramètre	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Température moyenne (°C):	10.80	9.50	12.70	14.60	17.40	22.20	24.40	22.20	21.30	18.30	14.30	11.50
Vitesse moyenne du vent (m/sec):	12.50	12.50	12.50	9.40	12.50	6.60	4.10	4.10	4.10	4.10	12.50	4.10
Vitesse maximale du vent (m/sec):	12.50	12.50	12.50	9.40	12.50	6.60	4.10	4.10	4.10	4.10	12.50	4.10
Précipitation moyenne (cm):	2.10	2.70	7.50	5.00	2.10	2.50	1.70	2.00	5.10	4.10	10.90	1.40
Nombre de jours avec précipitations:	15.00	17.00	16.00	15.00	14.00	11.00	11.00	11.00	15.00	15.00	15.00	14.00
Durée moy. des précipitations (hres):	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Humidité relative type (%):	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00

Fraction moyenne du temps à chaque classe de stabilité atmosphérique:

Classe de stabilité	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
A : Très instable	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B : Instable	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C : Légèrement instable	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D : Neutre	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
E : Stable	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F : Très stable	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figure 11: TerraSys: Propriétés atmosphériques et climatologiques.

Pour contourner ce problème, des valeurs arbitraires, bien que réalistes, ont été utilisées pour remplacer les informations manquantes. Ainsi, des données non mesurées ont été entrées pour les paramètres suivants : la vitesse maximale du vent, la durée moyenne des précipitations (en heures) l'humidité relative type (%), la fraction moyenne du temps à chaque classe de stabilité et les valeurs mensuelles de fréquences des directions du vent.

3.3 Définition du réseau trophique de référence

Pour permettre une interprétation des résultats efficace, il a été décidé de définir un modèle conceptuel de référence le plus simple possible. Il a donc été établi que le sol est l'unique source de contamination et que le transfert de la substance aux organismes est représenté par une chaîne alimentaire rudimentaire : les invertébrés terrestres qui vivent dans le sol constituent 100% de la diète de l'unique prédateur considéré : le hérisson d'Europe.

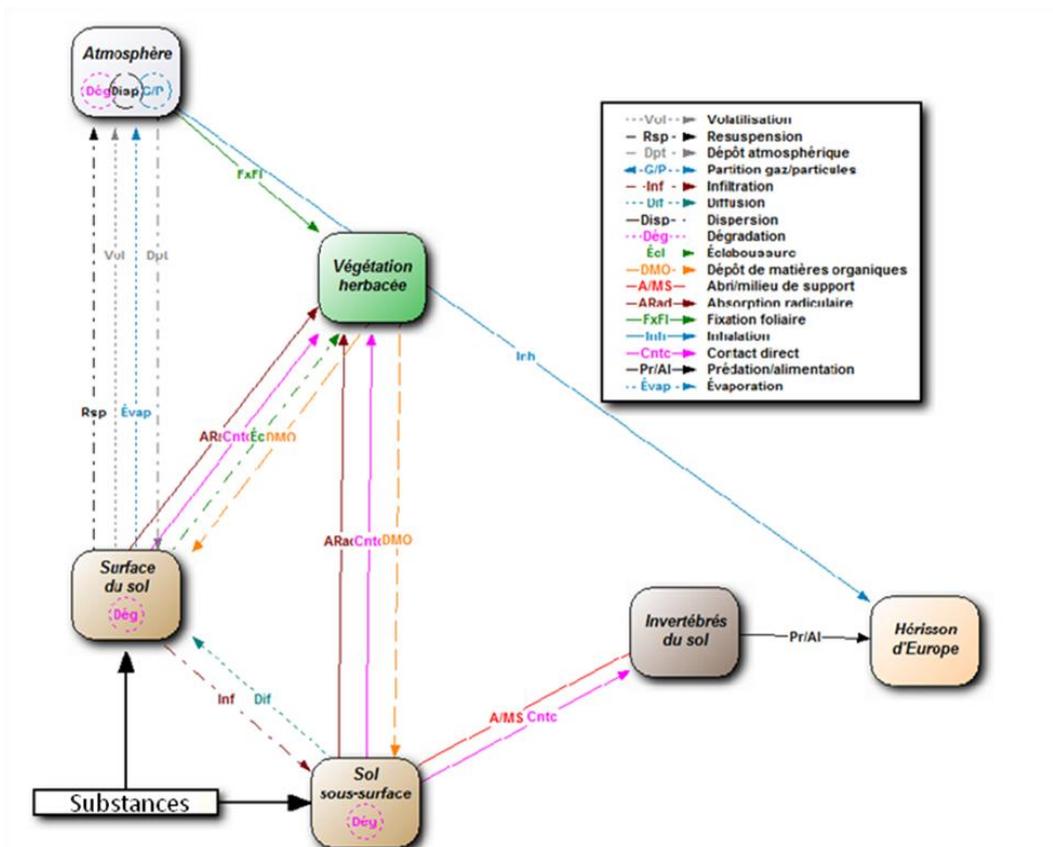


Figure 12 : Modèle conceptuel de référence.

4. Les bioessais

Des bioessais avec le sol du site de Saint Cyprien ont été réalisés par APESA (LASCOURREGES 2015). Les échantillons ayant été prélevés au plus proche de ceux réalisés par l'INERIS (pour les essais de transferts vers la plante et le ver de terre), les résultats obtenus peuvent être intégrés dans la fonction « Biotests » que propose TerraSys. Les essais suivants ont été réalisés :

- Essais ISO 11269-1 et 11269-2 : croissance de 6 espèces végétales (biomasse) et élongation des tiges et racines.
- Essai de toxicité aiguë ISO 11268-1 sur vers de terre *Eisenia fetida*.
- Test microtox.

Ces trois essais sont référencés dans la base de données « Biotest » de TerraSys.



VI Etude 1 : Influence du paramètre BCF sur les résultats d'une éRé

Dans le cadre du transfert de contaminants contenus dans le sol, TerraSys s'intéresse dans un premier temps au transfert du sol au vers de terre ou/et aux plantes (BCFvdt et BCFvgt).



Figure 13: Schéma simplifié du transfert sol, vers de terre, prédateur selon TerraSys.

Le BCF ou facteur de bioconcentration correspond au rapport entre la concentration d'un polluant dans un organisme et la concentration dans le milieu. Plus le BCF est important et plus le transfert du milieu à l'organisme est important. C'est le premier coefficient de transfert qui intervient, il traduit l'intégralité du transfert du sol au vers de terre.

Il n'y a qu'aux échelons supérieurs du réseau trophique qu'intervient le facteur rendant compte de l'exposition via la consommation de proies contaminées. Dans le cadre de l'utilisation de Terrasys, le transfert aux niveaux trophiques supérieurs fait intervenir le facteur de biotransfert (FBT) et le facteur multiplicatif de niveau trophique (FCM) (voir chapitre VI.2).

Dans cette étude 1, le BCF est le seul paramètre que l'on fait varier. En effet, le BCF étant une valeur qui se calcule depuis des concentrations mesurées, la variabilité des mesures de concentration influe sur le calcul et plusieurs BCF sont généralement disponibles pour une même substance. L'évaluateur est souvent amené à choisir un BCF, généralement la moyenne des BCF disponibles ou la valeur maximum dont il dispose.

L'utilisation de différents BCF dans le cas d'étude que permet le projet TROPHÉ va permettre de déterminer si choisir un BCF moyen ou maximal a un impact sur le calcul des quantités transférées dans le réseau trophique, et si c'est le cas, quelle valeur est la plus pertinente.

1. Les BCF mesurés

Le modèle conceptuel de référence considère un transfert via le ver de terre (sol -> ver de terre -> hérisson), les BCF expérimentaux obtenus sur ver de terre dans le cadre de ce projet sont utilisés. Ils ont été mesurés en triplicat sur chacune des 4 parcelles, ce qui fait au maximum 12 BCF par substance.

Parce qu'il n'a pas été possible de quantifier certaines substances dans les sols des parcelles ou dans les vers qui y ont été exposés, deux types de moyennes ont été calculées :

- Une moyenne qui prend en compte les 12 mesures : lorsqu'une substance est détectée dans un milieu mais que la concentration mesurée est inférieure aux limites de quantification de la technique analytique, il est considéré que la concentration est égale à cette limite divisée par 2 (LQ/2). Il est probable que cette pratique mène à surestimer le BCF moyen des substances concernées (INERIS 2017).
- L'autre moyenne ne prend en compte que les valeurs obtenues au-dessus des limites de quantification.

Les résultats des tableaux 20 et 21 du rapport (INERIS 2017) présentent les BCF calculés, ils sont repris dans le Tableau 6.



Tableau 6: BCF des vers de compost.

Substance	Moyenne des BCF calculés avec des concentrations quantifiables	Moyenne de tous les BCF ⁶	BCF maximum ⁷
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,04	0,04	0,08
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,13	0,13	0,23
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01	0,01	0,02
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,07	0,07	0,12
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,08	0,07	0,12
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,07	0,13	0,29
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,08	0,08	0,13
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,04	0,04	0,06
1,2,3,7,8,9-HxCDF	-	-	-
1,2,3,7,8-PeCDD	0,15	0,21	0,4
1,2,3,7,8-PeCDF	0,21	0,21	0,29
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,04	0,04	0,06
2,3,4,7,8-PeCDF	0,14	0,14	0,2
2,3,7,8-TCDD	0,21	0,21	0,38
2,3,7,8-TCDF	0,29	0,29	0,41
OCDD	0,03	0,03	0,05
OCDF	0,02	0,02	0,04
PCB 101	1,62	1,60	2,86
PCB 105	1,49	1,50	3,59
PCB 114	1,07	5,00	16,66
PCB 118	1,79	1,80	4,4
PCB 123	1,31	1,30	1,91
PCB 126	0,66	0,66	1,01
PCB 138	1,05	1,00	1,35
PCB 153	1,27	1,30	1,55
PCB 156	0,93	0,93	1,41
PCB 157	0,93	0,92	1,36
PCB 167	1,06	1,10	1,43
PCB 169	0,49	0,62	1,01
PCB 180	0,77	0,77	0,93
PCB 189	0,67	0,67	0,91
PCB 28	0,86	0,78	0,87
PCB 52	1,39	2,60	6,28
PCB 77	0,92	0,92	2,54
PCB 81	0,52	1,00	2,42

En gras : les substances pour lesquelles certains BCF ont été calculés depuis des concentrations exprimées avec LQ/2.

Comme évoqué en p23, il n'a pas été possible de mesurer des concentrations pour le 1,2,3,7,8,9-HxCDF, son BCF n'a pas pu être calculé et la substance a été exclue de l'étude.

⁶ BCF dans le livrable 2 (INERIS (2017). Synthèse des travaux expérimentaux menés sur le transfert des POPs dans les végétaux et les vers de compost (Livrable n°2). Projet TROPHE Transferts et Risques des Organiques Persistants pour l'Homme et les écosystèmes., INERIS: 233.)

⁷ BCFmax dans le livrable 2 (ibid.)



2. L'équation utilisée par TerraSys

TerraSys calcule la concentration pour le prédateur du système en ajoutant les concentrations provenant des différentes voies d'exposition possibles : contact, alimentation, inhalation. Les paramètres étudiés dans le contexte du projet TROPHé concernent la voie d'exposition par alimentation. Le manuel de référence du logiciel décrit les équations utilisées, celle concernant les mammifères est rapportée ci-après :

La concentration d'exposition pour une substance du prédateur 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 _{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
Calim :	concentration dans l'alimentation du mammifère en mg/kg (obtenu selon l'équation BCFvers x [sol])
Falim(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 $\log\text{FBT}_{\text{mam}} = -7,6 + \log K_{\text{ow}}$)
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 7)
FCM _μ :	facteur multiplicatif de niveau trophique moyen pour l'alimentation du mammifère
K _{met-mam} :	coefficient de métabolisme du contaminant par les mammifères (par défaut, 1)
F _{hab} :	facteur d'ajustement pour l'aire d'alimentation.

Une fois fixé le paramètre de la concentration dans le sol et ceux relatifs à la substance ou la diète de l'organisme, les paramètres qui ont une influence sur C_{mam-alim} sont le BCF (qui sert à calculer Calim) et le FCM (qui définit la place du prédateur dans le réseau trophique). Par exemple, dans le modèle de référence, lorsque TerraSys modélise l'exposition des milieux il considère le FCM3 de la substance pour le hérisson. Le FCM4 est utilisé si un prédateur qui se nourrit de hérisson est ajouté, comme c'est le cas dans le modèle conceptuel de l'étude n°2 (voir **Figure 18**).



Tableau 7: 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)

Les FCM des groupes 3 et 4 augmentent en même temps que le log Kow des substances jusqu'à atteindre une valeur maximale pour un log Kow d'environ 7. Les FCM 3 et 4 décroissent par la suite (**Figure 14**). Cette tendance est cohérente avec le fait qu'il est considéré qu'une fois atteint une certaine taille, les grosses molécules se bioconcentrent relativement moins bien du fait de leur encombrement.



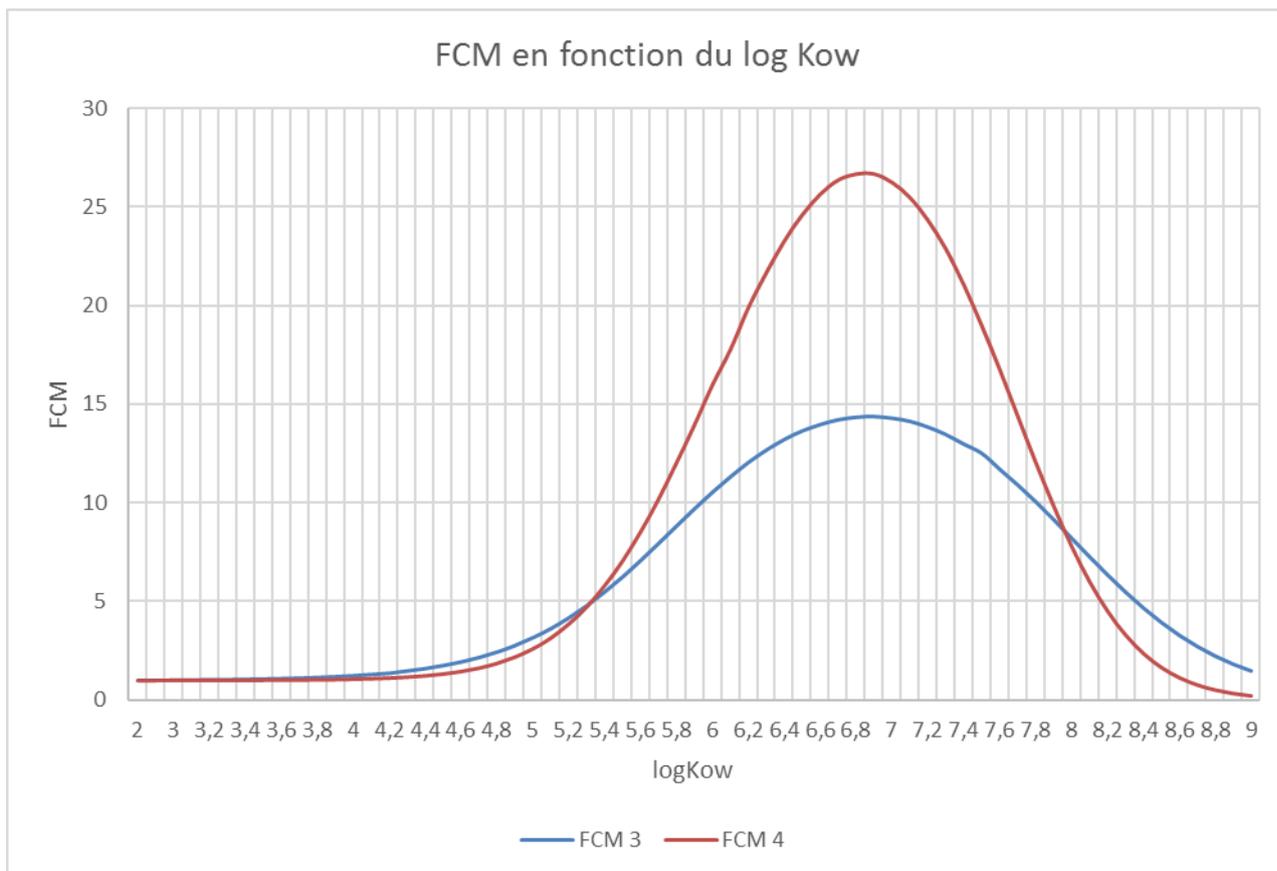


Figure 14: FCM en fonction du logKow

Les données de l'US EPA (1998) prévoient également un transfert globalement plus efficace en augmentant de niveau trophique, c'est-à-dire en passant du FCM 3 au FCM 4, puisque ce FCM est un facteur multiplicatif dans l'équation exposée plus haut.

Dans le contexte du projet TROPHé, toutes les molécules ont un Kow supérieur à 5,6, 11 des 34 substances ont un Kow entre 6,75 et 7,25 (et présentent donc des FCM très importants) et enfin 5 d'entre elles ont un logKow supérieur à 8 (1,2,3,4,6,7,8-HpCDD, OCDD, 1,2,3,6,7,8-HxCDD, 1,2,3,7,8,9-HxCDD et OCDF). Pour ces dernières seulement, FCM3>FCM4. Toutefois, la façon dont le transfert des substances est modélisé ne sera examinée que dans l'Etude 2 qui s'intéresse justement à la longueur de la chaîne trophique et au nombre de prédateurs dans le modèle conceptuel. Seule la variation du BCF a une influence sur le résultat dans l'étude en cours.

3. Résultats de la modélisation des concentrations d'exposition avec le modèle de référence

Une modélisation des concentrations multimédia a été réalisée avec TerraSys pour chacun des BCF retenus. Les résultats obtenus dans le ver et son prédateur sont reportés dans le Tableau 8.



Tableau 8: Modélisation des concentrations multimédias en mg/kg de poids frais avec différents BCF.

Substance	Sol (ms) mg/kg	Moyenne des BCF _{vers} mesurés seulement	Moyenne de tous les BCF _{vers}			BCF _{max} _{vers}				
			Vers	Hérisson	Vers	Hérisson	Vers	Hérisson		
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	1,26E-04	0,04	4,91E-06	8,20E-06	0,04	4,91E-06	8,20E-06	0,08	1,01E-05	1,68E-05
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	9,84E-05	0,13	1,28E-05	1,12E-05	0,13	1,28E-05	1,12E-05	0,23	2,26E-05	1,99E-05
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	3,60E-04	0,01	3,60E-06	3,17E-06	0,01	3,60E-06	3,17E-06	0,02	7,20E-06	6,33E-06
1,2,3,4,7,8-HxCDD	6,85E-06	0,07	4,66E-07	3,11E-07	0,07	5,00E-07	3,34E-07	0,12	8,22E-07	5,49E-07
1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,41E-04	0,08	1,17E-05	2,21E-06	0,07	1,03E-05	1,95E-06	0,12	1,69E-05	3,20E-06
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1,51E-05	0,07	1,06E-06	1,81E-06	0,13	1,96E-06	3,36E-06	0,29	4,38E-06	7,49E-06
1,2,3,6,7,8-HxCDF	7,32E-05	0,08	5,93E-06	1,01E-05	0,08	5,93E-06	1,01E-05	0,13	9,52E-06	1,63E-05
1,2,3,7,8,9-HxCDD	9,20E-06	0,04	3,31E-07	5,67E-07	0,04	3,31E-07	5,67E-07	0,06	5,52E-07	9,44E-07
1,2,3,7,8-PeCDD	5,33E-06	0,15	7,78E-07	3,60E-08	0,21	1,12E-06	5,17E-08	0,40	2,13E-06	9,85E-08
1,2,3,7,8-PeCDF	8,78E-05	0,21	1,85E-05	1,17E-06	0,21	1,84E-05	1,16E-06	0,29	2,55E-05	1,60E-06
2,3,4,6,7,8-HxCDF	8,53E-05	0,04	3,41E-06	6,45E-07	0,04	3,41E-06	6,45E-07	0,06	5,12E-06	9,68E-07
2,3,4,7,8-PeCDF	8,39E-05	0,14	1,20E-05	1,06E-06	0,14	1,17E-05	1,04E-06	0,20	1,68E-05	1,48E-06
2,3,7,8-TCDD	1,43E-06	0,21	3,05E-07	1,41E-08	0,21	3,00E-07	1,39E-08	0,38	5,43E-07	2,51E-08
2,3,7,8-TCDF	1,09E-04	0,29	3,20E-05	1,14E-06	0,29	3,16E-05	1,13E-06	0,41	4,47E-05	1,60E-06
OCDD	2,84E-04	0,03	7,95E-06	1,33E-05	0,03	7,95E-06	1,33E-05	0,05	1,42E-05	2,37E-05
OCDF	4,80E-04	0,02	1,10E-05	7,03E-05	0,02	1,10E-05	7,03E-05	0,04	1,92E-05	1,22E-04
PCB 101	1,30E-03	1,62	2,10E-03	5,30E-05	1,60	2,10E-03	5,24E-05	2,86	3,70E-03	9,37E-05
PCB 105	5,07E-04	1,49	7,55E-04	3,49E-05	1,50	7,60E-04	3,51E-05	3,59	1,80E-03	8,41E-05
PCb 114	1,88E-05	1,07	2,01E-05	9,28E-07	5,00	9,40E-05	4,34E-06	16,66	3,13E-04	1,45E-05
PCB 118	1,30E-03	1,79	2,30E-03	1,37E-04	1,80	2,30E-03	1,38E-04	4,40	5,70E-03	3,36E-04
PCB 123	3,87E-05	1,31	5,07E-05	2,98E-06	1,30	5,03E-05	2,96E-06	1,91	7,39E-05	4,35E-06
PCB 126	1,22E-04	0,66	8,09E-05	6,46E-06	0,66	8,05E-05	6,43E-06	1,01	1,23E-04	9,83E-06
PCB 138	6,70E-03	1,05	7,00E-03	5,02E-04	1,00	6,70E-03	4,78E-04	1,35	9,00E-03	6,46E-04
PCB 153	7,90E-03	1,27	1,00E-02	8,82E-04	1,30	1,00E-02	9,06E-04	1,55	1,20E-02	1,10E-03
PCB 156	5,58E-04	0,93	5,21E-04	8,31E-05	0,93	5,19E-04	8,28E-05	1,41	7,87E-04	1,26E-04
PCB 157	1,25E-04	0,93	1,16E-04	1,85E-05	0,92	1,15E-04	1,84E-05	1,36	1,70E-04	2,71E-05
PCB 167	3,94E-04	1,06	4,18E-04	8,24E-05	1,10	4,33E-04	8,56E-05	1,43	5,63E-04	1,11E-04
PCB 169	2,09E-05	0,49	1,02E-05	2,83E-06	0,62	1,30E-05	3,59E-06	1,01	2,11E-05	5,85E-06
PCB 180	5,20E-03	0,77	4,00E-03	9,69E-04	0,77	4,00E-03	9,75E-04	0,93	4,80E-03	1,20E-03
PCB 189	1,34E-04	0,67	9,02E-05	4,89E-05	0,67	8,98E-05	4,86E-05	0,91	1,22E-04	6,61E-05
PCB 28	9,24E-05	0,86	7,98E-05	4,03E-07	0,78	7,21E-05	3,63E-07	0,87	8,04E-05	4,05E-07
PCB 52	1,71E-04	1,39	2,37E-04	1,70E-06	2,60	4,45E-04	3,17E-06	6,28	1,10E-03	7,67E-06
PCB 77	1,18E-04	0,92	1,08E-04	2,64E-06	0,92	1,09E-04	2,64E-06	2,54	3,00E-04	7,30E-06
PCB 81	1,27E-05	0,52	6,60E-06	1,61E-07	1,00	1,27E-05	3,09E-07	2,42	3,07E-05	7,49E-07

Les observations suivantes peuvent être formulées :

- Si la moyenne des BCF est utilisée ; la concentration dans les vers est supérieure à la concentration dans le sol (phénomène de bioconcentration) pour 8 des PCBi et PCB-dl si la moyenne des BCF est calculée en prenant en compte les LQ/2 pour les concentrations non-quantifiables et pour 9 des PCBi et PCB-dl si seules les données au-dessus de la LQ sont prises en compte.
- Si c'est le BCF maximum qui est pris en compte dans la modélisation ; la concentration dans les vers est plus importante que celle dans le sol pour 15 des PCBi et PCB-dl.
- Les concentrations modélisées sont plus importantes lorsque le BCF maximum est sélectionné, entre 2 et 3,3 fois plus importants pour 9 des substances.
- La concentration dans le prédateur (hérisson) est supérieure à celle dans les vers pour 6 des PCDD-F quel que soit le BCF choisi (1,2,3,4,6,7,8-HpCDD – 1,2,3,6,7,8-HxCDD – 1,2,3,6,7,8-HxCDF – 1,2,3,7,8,9-HxCDD – OCDD et OCDF).
- La concentration dans le prédateur hérisson est inférieure à celle du sol quel que soit le BCF choisi.

4. Faut-il tenir compte des valeurs présentant une forte incertitude pour le calcul du BCF moyen ?

Lors du calcul des BCF, plusieurs concentrations ont été mesurées en dessous des limites de quantification des méthodes d'analyses (INERIS 2017). La problématique des concentrations d'expositions situées en dessous des limites de quantification n'est pas propre au PCB et aux PCDD et se rencontre fréquemment lors des évaluations de risque pour les écosystèmes. L'approche généralement suivie est alors de considérer que si la substance est détectée mais ne peut pas être quantifiée, elle est supposée être égale à la moitié de la limite de quantification (LQ/2). Cela conduit à une surestimation ou une sous-estimation des concentrations réelles. En considérant les autres données obtenues, il semblerait que pour notre étude la prise en compte de ces données non quantifiables mène plutôt à une surestimation des concentrations d'exposition et donc à une surestimation des BCF moyen (INERIS 2017).

Se pose alors la question suivante : Est-ce que surestimer la moyenne des BCF en prenant en compte les concentrations non quantifiables est de nature à modifier les résultats d'une évaluation des risques ?

Le Tableau 8 présente les résultats de la modélisation si ces concentrations non quantifiables sont prises en compte dans le calcul du BCF moyen (colonnes bleues) et si elles sont omises du jeu de données (colonnes oranges). Ces différences concernent 10 des 34 substances. La Figure 15 est une représentation graphique de l'évolution des concentrations modélisées pour ces 10 substances en fonction de la méthode de calcul du BCF moyen choisie et la Figure 16 présente leurs ratios de transfert (calculé en divisant la concentration dans le hérisson par la concentration dans le sol).



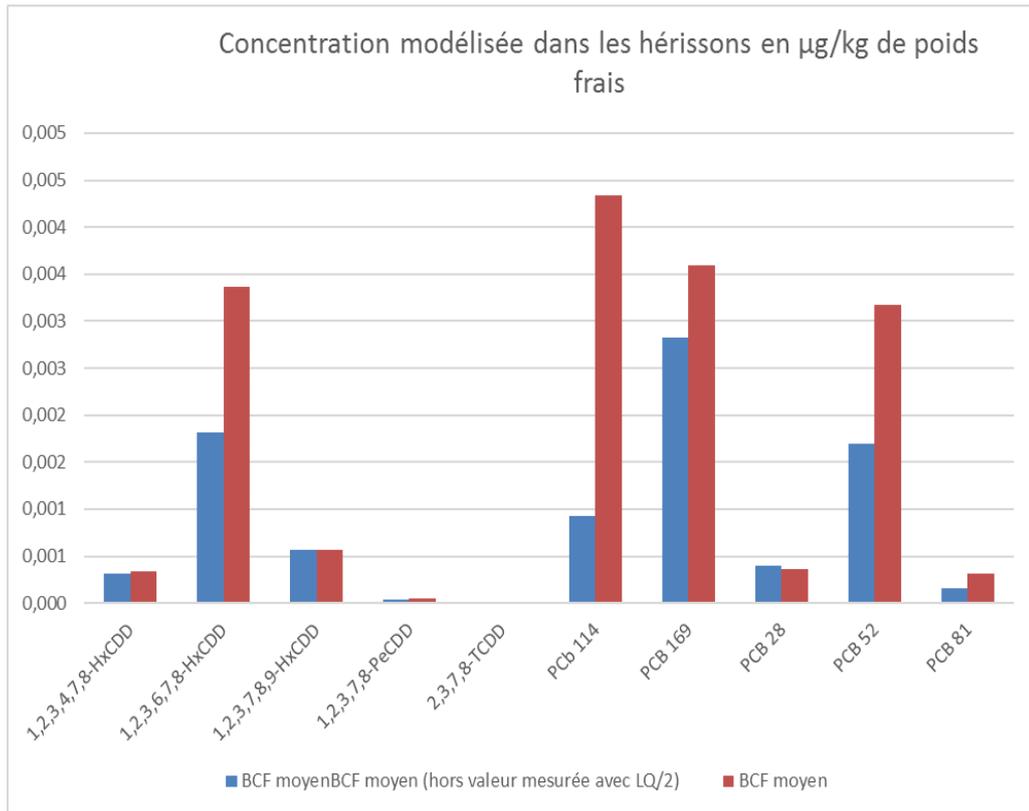


Figure 15: Concentration modélisée dans les hérissons en µg/kg de poids frais en fonction de la méthode du calcul du BCFmoyen.

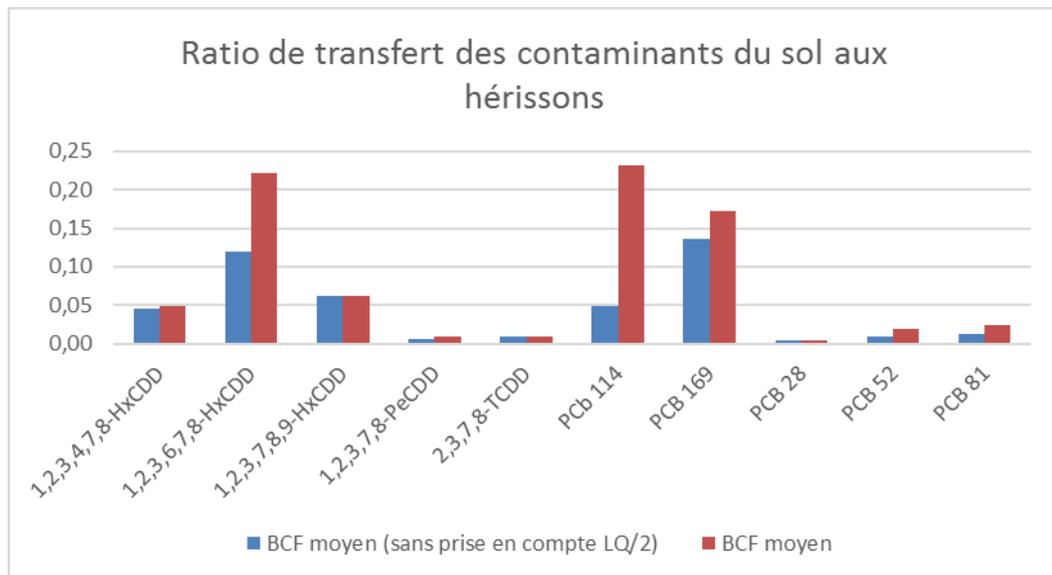


Figure 16: Ratio de transfert des contaminants du sol au hérisson en fonction de la méthode de calcul du BCFmoyen.

Ces figures illustrent bien le fait qu'utiliser un BCF moyen prenant en compte les concentrations extrapolées depuis la LQ/2 mènent à modéliser des concentrations dans le prédateur et des ratios de transfert plus élevés. Le ratio de transfert de la substance et la concentration d'exposition modélisée sont en effet 4,7 fois plus élevés si le BCF est surestimé pour le PCB 114 ; entre 1,27 et 1,92 pour le 1,2,3,6,7,8-HxCDD, 1,2,3,7,8-PeCDD, le PCB 27, le PCB 52 et le PCB 81 ; par contre la différence est négligeable pour les 4 autres substances.

Pourtant, ces impacts sont très relatifs : les concentrations rapportées dans la Figure 15 sont de l'ordre du ng/kg. Dans le cas du PCB 114, contaminant le plus impacté par la méthode de calcul du BCF moyen, la concentration d'exposition dans le prédateur varie donc d'environ 3,3 ng/kg de poids frais. Il est très peu probable qu'une différence de cet ordre puisse modifier les conclusions de l'évaluation des risques pour les écosystèmes. En fait, cette observation n'a rien d'étonnant, les substances concernées sont celles dont les concentrations sont en dessous des limites de quantification, il est normal que la fraction transférée au prédateur soit très faible.

Si la question de la prise en compte des BCF calculés avec des concentrations non quantifiables vaut scientifiquement parlant, il n'est pas attendu que ce paramètre ait un impact sur les conclusions d'une évaluation des risques sur les écosystèmes. En définitive, il semble plus simple et pertinent de ne pas retenir ces BCF.

5. Le choix du BCF, valeur moyenne ou valeur maximum ?

Au cours d'une évaluation des risques pour les écosystèmes, l'évaluateur est souvent amené à sélectionner des données en fonction de leur représentativité ou de leur pertinence. Le BCF d'une substance fait partie de ces variables souvent présentées sous la forme d'une fourchette de valeurs dans les bases de données. Si choisir le BCF moyen revient à sélectionner une valeur représentative des différents résultats de la littérature scientifique, sélectionner le BCF maximum est généralement considéré comme une démarche plus protectrice puisqu'un BCF plus élevé traduit un transfert plus important dans les organismes.

Note : Dans ce rapport, les BCF maximum sont pour la plupart les BCF calculés depuis des concentrations non quantifiables. Ils sont probablement surestimés mais servent très bien l'objectif de cette première étude qui est de voir si prendre un BCF dont la valeur est largement supérieure à celle des autres BCF disponibles pour la même substance plutôt que la moyenne aura un impact sur les résultats.

Pour vérifier la sensibilité de ce paramètre sur les résultats d'une éRé, il faut comparer les concentrations d'exposition modélisées avec un BCF représentatif (BCF moyen) et un BCF protecteur (BCF maximum). Le BCF le plus représentatif sélectionné correspond à la moyenne des BCF mesurés seulement (les BCF calculés avec des LQ/2 ne sont pas pris en compte). La valeur la plus protectrice correspond au BCF maximum tenant compte également des concentrations sous la LQ. En plus de comparer les concentrations modélisées, il est intéressant de comparer les ratios de transfert du sol à l'hérissou, plus représentatifs de l'efficacité du transfert et indépendants de la quantité de substance présente.

5.1 Comparaison des concentrations en substance transférée

Comme le démontrent les résultats des modélisations présentées dans le Tableau 8, l'augmentation du BCF se traduit par une augmentation de la concentration d'exposition dans l'organisme pour toutes les substances, quel que soit son niveau trophique. Le BCF est plus important, donc le transfert des contaminants est plus efficace.

5.2 Comparaison des ratios de transferts

Le ratio de transfert est calculé en divisant la concentration dans la cible du transfert par la concentration dans la source. Par exemple :

$$\text{Ratio vers/sol} = [\text{prédateur}]/[\text{sol}]$$

Le rapport entre les deux ratios a également été calculé pour visualiser quelles sont les substances pour lesquelles le choix de BCF a le plus d'impact. L'ensemble des résultats est présenté dans la Figure 17. Les substances dont les BCF max correspondent à des valeurs calculées avec des concentrations situés sous la LQ sont précédés d'un symbole « * ».



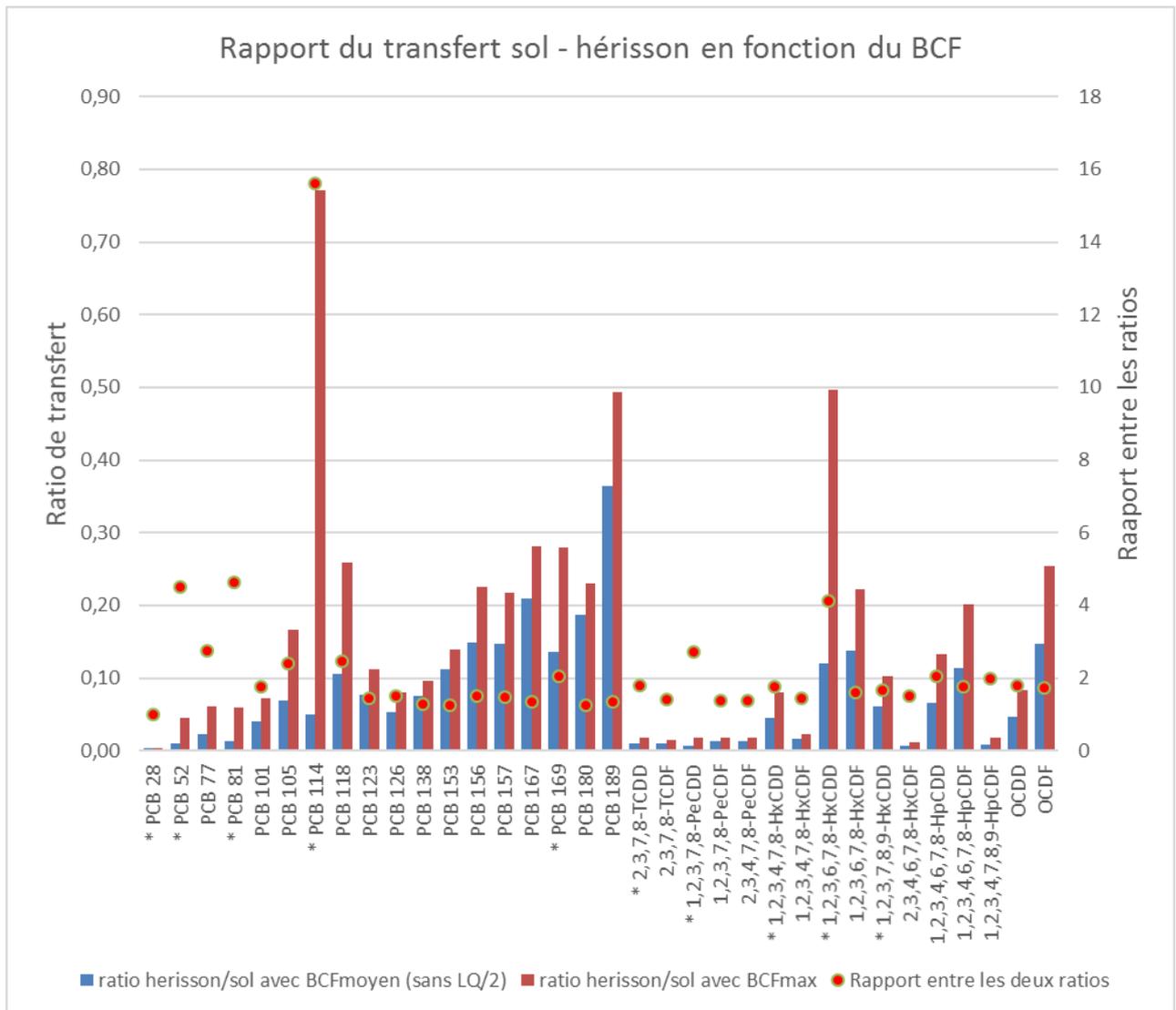


Figure 17: Rapport du transfert sol - hérisson en fonction du BCF.

Le ratio de transfert le plus élevé est de 0,77 et est calculé pour le PCB 114 avec son BCF max de 16,66. C'est aussi la substance pour laquelle la différence de ratio est la plus importante en fonction du BCF choisi. Il est 15 fois moins important si le BCF moyen de 1,07 est utilisé pour le calcul. La valeur de 16,66 a été obtenue avec des concentrations mesurées sous la LQ, c'est pourquoi la différence entre les deux BCF est si importante.

Comparer les ratios de transfert permet de s'affranchir des différences de concentrations entre les substances. Il est observé une variabilité importante du rapport entre les ratios de transfert plus marquée sur les PCB légers que chez les PCB plus lourds, par contre il n'y a pas de différence notable de ce point de vue entre les rapports de ratio obtenus sur les PCB et sur les PCDD/F. En définitive, les substances pour lesquelles le rapport entre les deux ratios de transfert est le plus important sont aussi les substances pour lesquelles la différence entre le BCF moyen et le BCF max est le plus important. Ainsi, les substances pour lesquelles le choix du BCF montre le plus d'impact ont les rapports entre les ratios de transfert les plus importants : elles sont le PCB 114 (15,6), le PCB 81 (4,6), le PCB 52 (4,5) et le 1,2,3,6,7,8-HxCDD (4,1). La substance suivante est le PCB 77 dont le rapport entre les ratios est relativement moindre puisqu'égal à 2,7. C'est aussi la première substance de ce « top 5 » dont le BCF max n'a pas été obtenu depuis une concentration mesurée sous la LQ. Choisir le BCF maximum va doubler et jusque multiplier par 15 (ou 5 si on ne tient pas compte du PCB 114) la fraction transmise depuis le sol au prédateur pour 11 des 34 substances. De plus, les BCF de 5 de ces substances ont été calculés depuis des concentrations supérieures à la LQ : la variation normale du BCF calculé pour une même substance a donc un effet non négligeable sur le résultat de la modélisation du transfert du sol au prédateur.

5.3 **Interprétation des résultats**

Le choix du BCF moyen ou BCF maximum aura bien un impact sur les résultats d'une éRé puisqu'une concentration d'exposition doublée ou quintuplée peut après coup dépasser une concentration seuil sans effet de type PNEC (Predicted No Effect Concentration pour concentration sans effet prévus). L'approche protectrice consiste donc à privilégier le choix du BCF maximum, mais au vu des conclusions du chapitre 4, il est souhaitable de retirer d'abord du jeu de données les BCF calculés depuis des concentrations sous la LQ.

En ce qui concerne cette étude, ce constat doit être modulé en rappelant que les concentrations d'exposition calculées dans le hérisson restent très faibles dans les deux cas (Tableau 8) : de l'ordre de 1 µg/kg pour les deux substances les plus concentrées du jeu de données (respectivement 1,2 et 1,1 µg/kg pour le PCB180 et le PCB153), et inférieures ou égales à 0,12 µg/kg pour 30 substances. La concentration calculée dans le hérisson de la substance la plus concentrée (le PCB 180) varie ainsi de 0,1 à 0,3 µg/kg. C'est trois fois plus mais ces valeurs sont proches. Le PCB 114, qui présente la différence de ratio de transfert la plus importante, avec un BCFmax record de 16 calculé depuis une concentration non quantifiable, voit sa concentration d'exposition modélisée passer de 0,001 à 0,015 µg/kg. C'est 15 fois plus important mais les deux concentrations calculées sont finalement très proches. Il faut alors rappeler que les BCF rapportés proviennent d'expérimentations de terrain et non pas d'essais de laboratoire ayant pour objet de définir les propriétés des substances pour l'évaluation des risques pour les écosystèmes. Cela a déjà été évoqué mais les BCF obtenus dans le cadre des expérimentations de INERIS 2017 n'ont de valeur que pour les évaluations sur le site de Saint Cyprien et dans le cadre du projet TROPHé. Il est probable qu'en l'absence de phénomènes de compétition du transfert des nombreux contaminants présents et qu'en considérant la concentration dans l'eau interstitielle du sol au lieu de la concentration totale, les BCF calculés puissent être plus importants et conduire à modéliser des concentrations dans les organismes prédateurs plus élevées.

Au vu des différences observées dans les transferts de substances en fonction du BCF sélectionné, il est recommandé de sélectionner le BCF maximum plutôt que le BCF moyen en éRé. Des exceptions sont envisageables : par exemple, le BCF moyen peut être plus pertinent s'il est issu d'un jeu de données dont l'écart type est négligeable, ou encore il pourrait être décidé de ne pas tenir compte de la valeur de BCF maximum s'il est calculé depuis des concentrations inférieures à la LQ (voir chapitre 4).



VII Etude 2 : Influence de la complexité du réseau trophique sur les résultats de l'ÉRÉ.

Le réseau trophique est constitué de l'ensemble des relations trophiques qui existent dans un écosystème et ces dernières peuvent être définies comme une séquence où chaque maillon sert de source d'alimentation au maillon suivant. La problématique des substances persistantes et bioaccumulables se pose surtout pour les prédateurs supérieurs d'un écosystème, le prédateur qui se situe en bout de chaîne trophique. Ces substances transitent en effet le long de ces chaînes pour s'accumuler dans les organismes jusqu'à atteindre parfois des concentrations néfastes.

Les évaluations du risque pour les écosystèmes sont tenues de prendre en compte l'impact des substances sur ces prédateurs supérieurs et les scénarios d'exposition doivent donc intégrer ces relations trophiques. Pourtant, la complexité des relations qui lient l'ensemble des populations animales et végétales dans un milieu est pratiquement impossible à décrire dans le détail, et des chaînes trophiques simplifiées mais supposément protectrices sont généralement utilisées en première approche.

Afin d'appréhender l'impact que peut avoir la complexité décrite d'un réseau trophique sur les résultats d'une évaluation, plusieurs modèles conceptuels sont élaborés et les concentrations modélisées sont comparées.

1. Définition des différents modèles conceptuels

1.1 Chaîne trophique de référence

Le modèle de référence (modèle simple défini en V.3.3) consiste en une chaîne trophique très simplifiée de type :

Source de contaminant => proie => prédateur.

Ce scénario d'exposition n'est pas représentatif de l'ensemble de ce qu'il se passe dans l'environnement mais il a le mérite d'être plus protecteur qu'un scénario plus réaliste puisque 100% de l'alimentation du prédateur du système (le hérisson) est constitué d'un organisme (le vers de terre) en contact direct avec la source de pollution. Le BCF_{vers} utilisé dans ce modèle (la moyenne des résultats obtenus durant la phase expérimentale, voir p26) est également utilisé dans les modèles « chaîne trophique étendue » et « réseau trophique complexe ».

1.2 Chaîne trophique étendue

Dans un premier temps, il est intéressant de vérifier si l'exposition modélisée pour un prédateur supérieur est différente de celle modélisée pour un prédateur de premier niveau. L'équation présentée en VI.2 indique en effet qu'en augmentant de niveau dans le réseau trophique, et donc en augmentant la valeur du FCM, le transfert deviendrait plus efficace. Il suffit pour cela d'ajouter un niveau trophique au modèle. Les résultats des calculs du modèle de référence (modèle simple) seront donc comparés aux résultats d'une modélisation réalisée sur le même modèle auquel un prédateur du hérisson, un renard, a été ajouté (voir Figure 18). Le renard constitue un bon exemple de prédateur supérieur : il possède une alimentation carnivore composée de plusieurs proies et ses prédateurs sont plutôt rares. Ils sont le loup, l'ours, l'aigle royal, parfois les chiens, le renardeau peut aussi être la proie du hibou grand-duc ou du lynx.



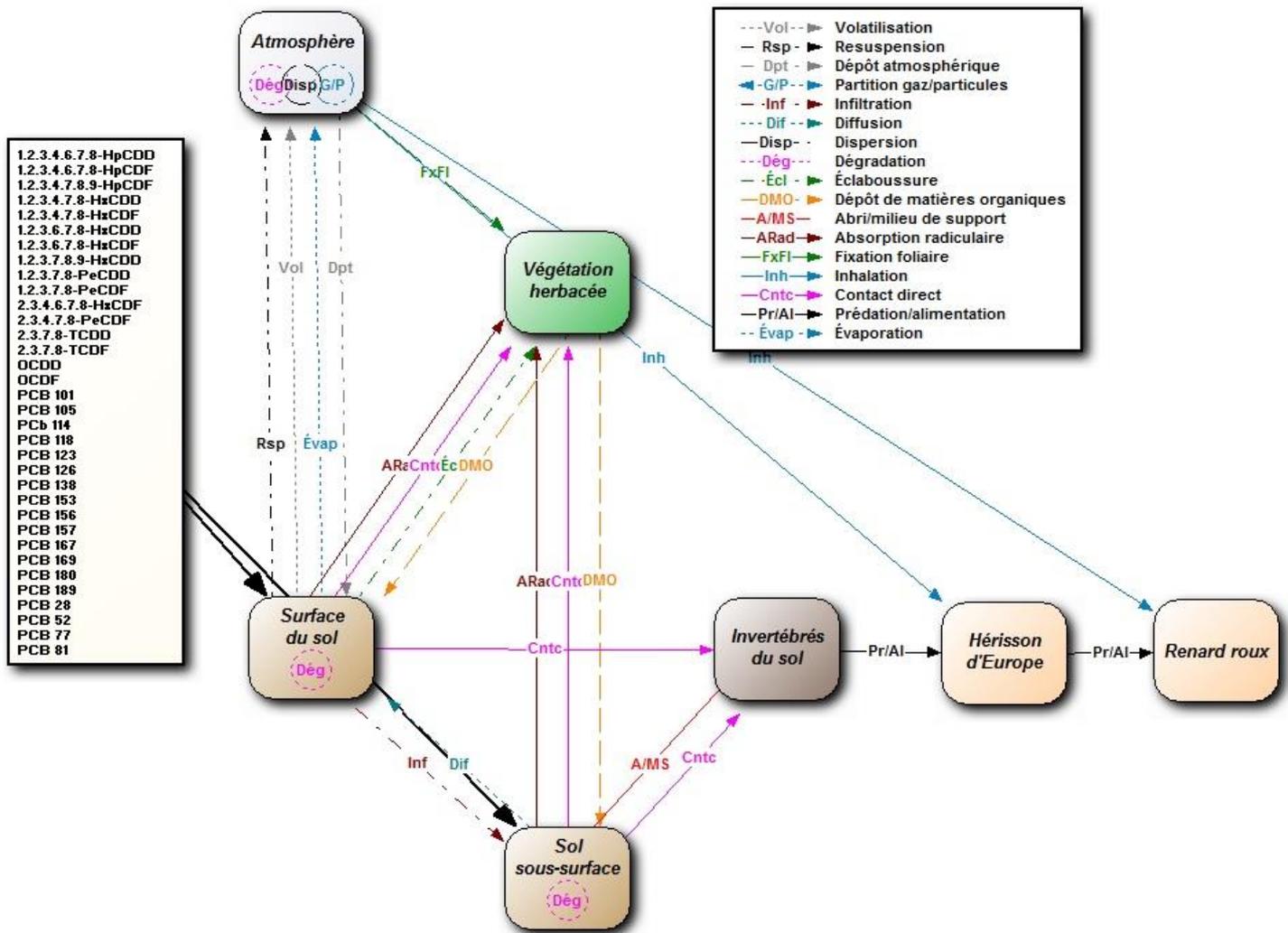


Figure 18: Modèle conceptuel comprenant un prédateur supérieur.

Dans ce modèle, le renard se nourrit exclusivement de hérisson et le hérisson ne se nourrit que de vers de terre, on considère donc que l'ensemble de la nourriture consommée par le prédateur supérieur du système a été contaminée. Les aires d'alimentation du hérisson et du renard sont restreintes à la zone contaminée puisque cette dernière est plus importante que la somme des aires des 4 parcelles et que cette restriction, majorante, facilitera la comparaison des résultats obtenus.

1.3 Réseau trophique complexe

L'objectif de cette étude est surtout de vérifier si la complexification du modèle conceptuel en ajoutant des niveaux au réseau trophique, en caractérisant des échanges, des relations de compétition entre deux types de prédateurs et en diversifiant leurs sources de nourriture a un impact notable du point de vue des résultats de la modélisation de l'exposition.

Dès lors, la définition du réseau trophique complexe devrait comporter :

- Plusieurs prédateurs primaires et plusieurs prédateurs secondaires (ou prédateurs supérieurs).
- Des situations où le prédateur est en compétition avec un autre prédateur pour une même ressource.
- Plusieurs sources de contamination simulées par des cibles ayant des régimes alimentaires différents.

Le modèle conceptuel de la Figure 19 a été élaboré pour répondre à ces besoins. Les résultats de la concentration d'exposition des prédateurs les plus élevés dans les réseaux trophiques décrits, pour cet exercice : le hérisson pour le modèle de référence, le renard pour les deux autres modèles seront comparés.

Pour ce modèle également, les aires de chasse des organismes sont réduites à l'intérieur de la zone d'étude pour maximiser le transfert vers le prédateur supérieur et faciliter la comparaison des résultats.

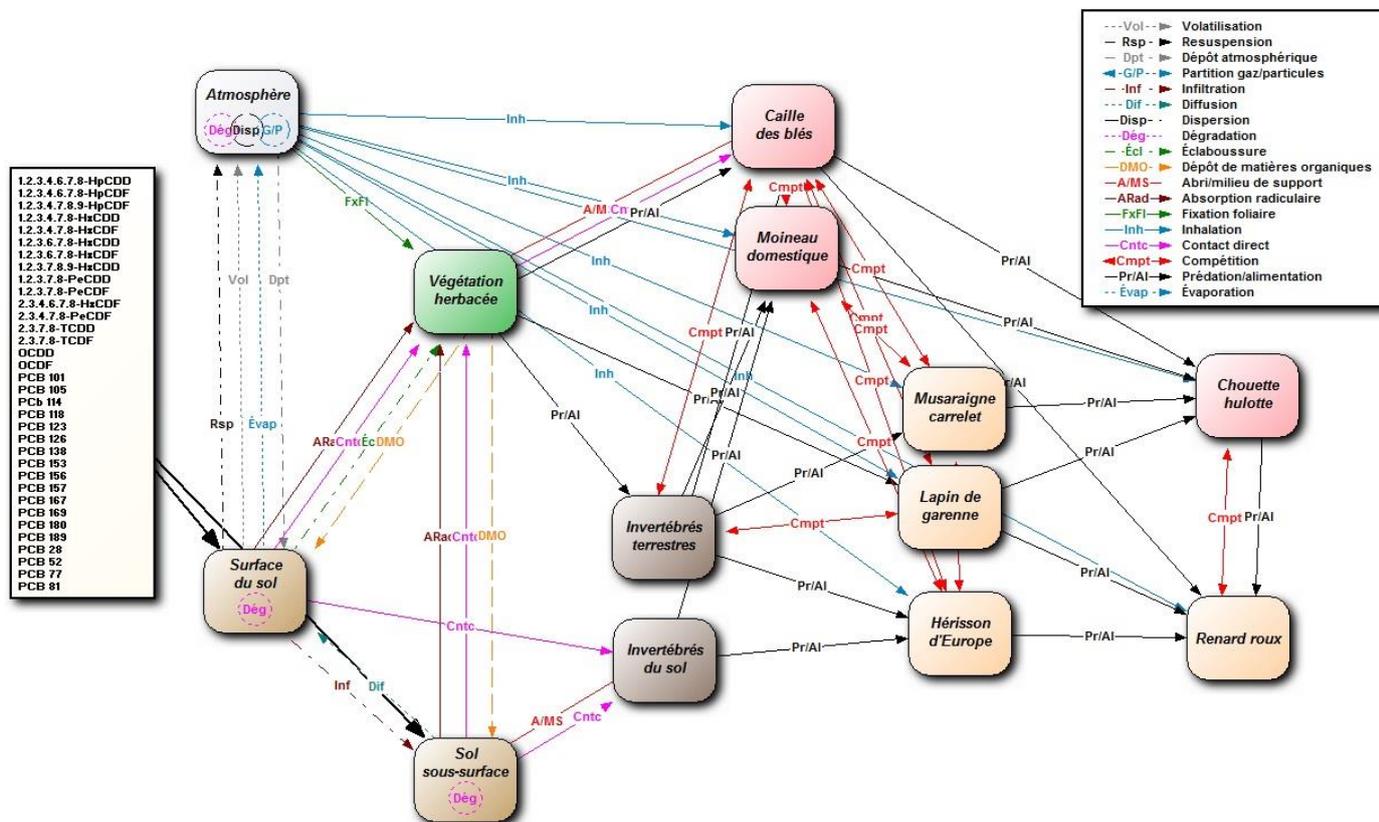


Figure 19: Modèle conceptuel d'un réseau trophique complexe.

L'annexe 1, extraite du rapport TerraSys, présente les relations trophiques qui relient les organismes ainsi que les composants de leur diète comme caractérisée lors de l'élaboration du modèle conceptuel complexe. Il y est par exemple explicité que la diète du premier prédateur (le hérisson) est modifiée par rapport aux autres modèles puisqu'il se nourrit de 50% de vers de terre et de 50% d'invertébrés terrestres au lieu de se nourrir de 100% de vers de terre.

2. Résultats de la modélisation des concentrations d'exposition du prédateur

Les concentrations d'exposition dans le hérisson et le renard après les différentes modélisations sont rassemblés dans le Tableau 9.

Tableau 9: Concentration d'exposition en µg/kg (poids frais) dans la chair des prédateurs des différents modèles élaborés selon TerraSys.

Contaminant	Modèle de Référence (modèle simple) Hérisson	Modèle étendu		Modèle complexe	
		Hérisson	Renard	Hérisson	Renard
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	8,20E-03	8,20E-03	2,44E-02	3,69E-03	4,92E-03
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1,12E-02	1,12E-02	1,76E-02	5,02E-03	3,05E-03
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	3,17E-03	3,17E-03	4,99E-03	1,52E-03	2,31E-03
1,2,3,4,7,8-HxCDD	3,34E-04	3,34E-04	3,99E-04	1,49E-04	6,90E-05
1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,95E-03	1,95E-03	6,60E-04	8,80E-04	1,48E-04
1,2,3,6,7,8-HxCDD	3,36E-03	3,36E-03	1,02E-02	1,50E-03	1,80E-03
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1,01E-02	1,01E-02	3,10E-02	4,67E-03	9,35E-03
1,2,3,7,8,9-HxCDD	5,67E-04	5,67E-04	1,73E-03	2,60E-04	5,03E-04
1,2,3,7,8-PeCDD	5,17E-05	5,17E-05	4,32E-06	2,32E-05	8,44E-07
1,2,3,7,8-PeCDF	1,16E-03	1,16E-03	1,32E-04	5,34E-04	3,89E-05
2,3,4,6,7,8-HxCDF	6,45E-04	6,45E-04	2,19E-04	2,96E-04	6,13E-05
2,3,4,7,8-PeCDF	1,04E-03	1,04E-03	1,65E-04	4,74E-04	4,58E-05
2,3,7,8-TCDD	1,39E-05	1,39E-05	1,15E-06	6,24E-06	2,32E-07
2,3,7,8-TCDF	1,13E-03	1,13E-03	7,29E-05	5,09E-04	1,60E-05
OCDD	1,33E-02	1,33E-02	3,95E-02	5,95E-03	7,46E-03
OCDF	7,03E-02	7,03E-02	7,99E-01	3,18E-02	1,84E-01
PCB 101	5,24E-02	5,24E-02	2,38E-03	2,41E-02	7,00E-04
PCB 105	3,51E-02	3,51E-02	2,91E-03	1,59E-02	6,59E-04
PCb 114	4,34E-03	4,34E-03	3,59E-04	1,95E-03	6,85E-05
PCB 118	1,38E-01	1,38E-01	1,45E-02	6,24E-02	3,37E-03
PCB 123	2,96E-03	2,96E-03	3,11E-04	1,32E-03	5,60E-05
PCB 126	6,43E-03	6,43E-03	9,19E-04	2,89E-03	1,83E-04
PCB 138	4,78E-01	4,78E-01	6,11E-02	2,13E-01	9,87E-03
PCB 153	9,06E-01	9,06E-01	1,43E-01	4,03E-01	2,24E-02
PCB 156	8,28E-02	8,28E-02	2,36E-02	3,69E-02	3,66E-03
PCB 157	1,84E-02	1,84E-02	5,23E-03	8,17E-03	8,14E-04
PCB 167	8,56E-02	8,56E-02	3,02E-02	3,80E-02	4,56E-03
PCB 169	3,59E-03	3,59E-03	1,78E-03	1,60E-03	2,65E-04
PCB 180	9,75E-01	9,75E-01	4,24E-01	4,57E-01	1,58E-01
PCB 189	4,86E-02	4,86E-02	4,71E-02	2,17E-02	7,69E-03
PCB 28	3,63E-04	3,63E-04	4,09E-06	1,76E-04	2,53E-06
PCB 52	3,17E-03	3,17E-03	4,21E-05	1,47E-03	1,42E-05
PCB 77	2,64E-03	2,64E-03	1,16E-04	1,28E-03	6,02E-05
PCB 81	3,09E-04	3,09E-04	1,36E-05	1,38E-04	2,30E-06

Les concentrations estimées dans le hérisson selon le modèle complexe sont environ deux fois moins élevées (entre 2,05 et 2,25 fois moins élevées) que dans les autres modèles quelle que soit la substance. La seule différence entre les modèles au niveau du hérisson provient de la diète. Comme il est indiqué dans l'Annexe 1, le hérisson bénéficie d'une diète diversifiée dans le modèle complexe, composée à 50% de vers et à 50% d'invertébrés terrestres alors que dans les autres modèles, sa diète est uniquement composée de vers de terre. Or, le détail des résultats présente des concentrations modélisées 3 à 5 fois plus élevées



dans les vers que dans les invertébrés terrestres. Le hérisson du modèle complexe a un régime alimentaire moins contaminé puisque les invertébrés « non spécifiés » qui composent 50% de sa diète sont moins contaminés que les vers de terre ce qui entraîne une concentration d'exposition moindre. Les concentrations d'expositions calculées pour le renard avec le modèle complexe sont toujours inférieures à celles calculées avec le modèle étendu.

3. Impact de la longueur de la chaîne trophique sur les résultats

Le modèle de référence (modèle simple défini en V.3.3) propose d'étudier le transfert de contaminants issus du sol dans les organismes qui y vivent puis dans les organismes qui les consomment. La problématique de l'empoisonnement secondaire se pose plutôt sur les organismes en bout de chaîne alimentaire plus longue. La question se pose alors de savoir si la longueur de cette chaîne alimentaire, et donc la position du prédateur dans l'écosystème, a un impact sur les résultats d'une éRé. Comparer les résultats de la modélisation de l'exposition des prédateurs en bout de chaîne alimentaire des deux premiers modèles devrait permettre de dégager des informations.

Le prédateur supérieur du modèle de référence est le hérisson, c'est le seul prédateur du système décrit. Dans le modèle de référence étendu, ce même hérisson devient la proie du renard, prédateur supérieur de l'écosystème.

La première observation qui peut être faite c'est que l'efficacité du transfert d'un prédateur à un autre ne se fait pas dans les mêmes proportions pour toutes les substances. Il y a des substances pour lesquelles les concentrations augmentent depuis le hérisson vers le renard alors qu'elle diminue pour les autres. La Figure 20 représente le rapport de concentration entre les deux prédateurs ultimes des deux modèles considérés.



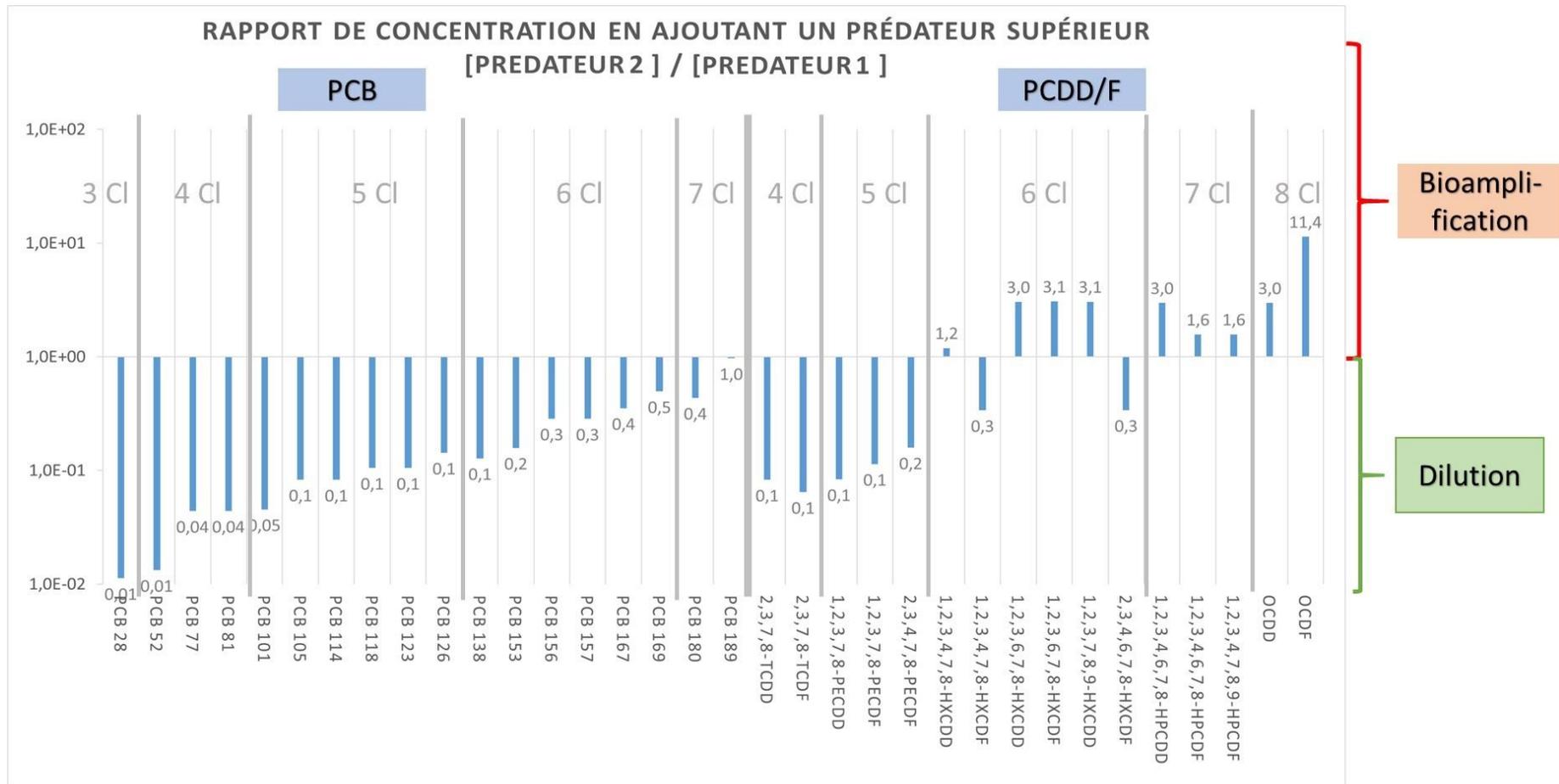


Figure 20 : Rapport de concentration en ajoutant un prédateur supérieur [renard]/[hérisson]



Pour les PCB comme pour les PCDD/F, les résultats indiquent que la quantité de substance qui est transmise au niveau trophique supplémentaire du modèle « chaîne trophique étendue » est corrélé au nombre d'atome de chlore. En ce qui concerne les PCB, la concentration calculée dans le prédateur final décroît si on ajoute un échelon trophique au scénario mais cette diminution est beaucoup moins importante pour les PCB lourds (environ deux fois moins importante, voire égale pour le PCB 189) que pour les PCB légers (jusqu'à environ 90 fois moins important pour le PCB 28). Pour les PCDD/F la même tendance est observée mais considérer une chaîne trophique plus longue n'entraîne plus forcément une diminution de la concentration calculée dans le prédateur supérieur. L'effet sur les résultats est un accroissement des concentrations calculées pour les PCDD/F les plus lourds. A partir de 6 atomes de chlore, la modélisation prévoit en effet pour 9/11 molécules une concentration plus importante dans le prédateur que dans la proie. Toutes les substances qui ont des Kow supérieurs à 8 font partie de ces 9/11 molécules (voir VI.2). Par ailleurs, mis à part le cas du PCB 189 pour lequel les concentrations d'exposition sont quasiment identiques quel que soit le niveau du prédateur dans la chaîne trophique, les concentrations dans les prédateurs supérieurs des différents modèles sont différentes voire très différentes pour toutes les substances. 3 catégories peuvent être caractérisées selon le ratio calculé précédemment (voir Tableau 10).

Tableau 10: catégorie des substances d'après leur comportement lié à la longueur de la chaîne alimentaire, en rouge [hérisson]<[renard] et en bleu [hérisson]>[renard].

Substances pour lesquelles ajouter un maillon à la chaîne a un effet relativement limité (ratio de 1 à 3,5)	Substances pour lesquelles ajouter un maillon à la chaîne a un effet important (ratio de 6,3 à 15,5)	Substances pour lesquelles ajouter un maillon à la chaîne a un effet très important (ratio de 22 à 88,8)
<p>1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF 1,2,3,4,7,8-HxCDD 1,2,3,4,7,8-HxCDF 1,2,3,6,7,8-HxCDD 1,2,3,6,7,8-HxCDF 1,2,3,7,8,9-HxCDD 2,3,4,6,7,8-HxCDF OCDD PCB 156 PCB 157 PCB 167 PCB 169 PCB 180 PCB 189</p>	<p>1,2,3,7,8-PeCDD 1,2,3,7,8-PeCDF 2,3,4,7,8-PeCDF 2,3,7,8-TCDD 2,3,7,8-TCDF OCDF PCB 105 PCB 114 PCB 118 PCB 123 PCB 126 PCB 138 PCB 153</p>	<p>PCB 101 PCB 28 PCB 52 PCB 77 PCB 81</p>

En définitive, mis à part pour le PCB 189, la longueur de la chaîne alimentaire a toujours un impact qu'il soit positif ou négatif, sur les concentrations d'exposition du prédateur supérieur de l'écosystème.

La longueur de la chaîne alimentaire constitue un paramètre sensible du processus de l'évaluation du risque pour les écosystèmes et ne considérer que le premier prédateur rencontré n'est pas suffisant. Il a été remarqué que les concentrations d'exposition modélisées peuvent être jusque 80 fois plus importantes pour deux tiers des substances dans le premier prédateur par rapport au prédateur suivant et jusque 10 fois plus importantes dans le prédateur supérieur par rapport au premier pour le dernier tiers des substances. Pour être suffisamment protecteur, il faudrait donc identifier des organismes comme objectif de protection de l'évaluation à différents niveaux trophiques.

4. Impact de la complexité du réseau trophique sur les résultats

La description d'un réseau trophique complexe est un processus chronophage qui nécessite une connaissance approfondie des écosystèmes étudiés.

Le modèle conceptuel de la Figure 19 est encore loin de la complexité attendue dans un écosystème moyen mais est déjà beaucoup plus détaillé que les autres modèles conceptuels utilisés dans cette étude. Pour savoir si détailler les relations qui interviennent dans un écosystème est susceptible de modifier les

résultats d'une éRé, la modélisation des concentrations d'exposition de TerraSys est effectuée selon ce modèle complexe puis comparée aux résultats obtenus selon le modèle étendu de la Figure 18. Le prédateur en bout de chaîne alimentaire est le même dans les deux modèles : le renard. La diète de ce prédateur supérieur dans le modèle complexe est disponible dans l'annexe 1 et les résultats sont présentés dans le Tableau 9.

Comme déjà observé en p45, diversifier la diète du prédateur en introduisant d'autres proies que les vers de terre conduit à une diminution de la concentration d'exposition modélisée dans le prédateur. Par contre, cette fois la variation de concentration est très hétérogène en fonction de la substance considérée (pour rappel, la concentration d'exposition modélisée diminue de moitié pour toutes les substances en composant la diète du hérisson de 50% de vers et 50% d'invertébrés terrestres). Elle varie de façon parfois importante, la Figure 21 illustre le ratio de concentration modélisée dans le prédateur supérieur (renard) observé entre les résultats obtenus selon le modèle étendu et le modèle complexe.

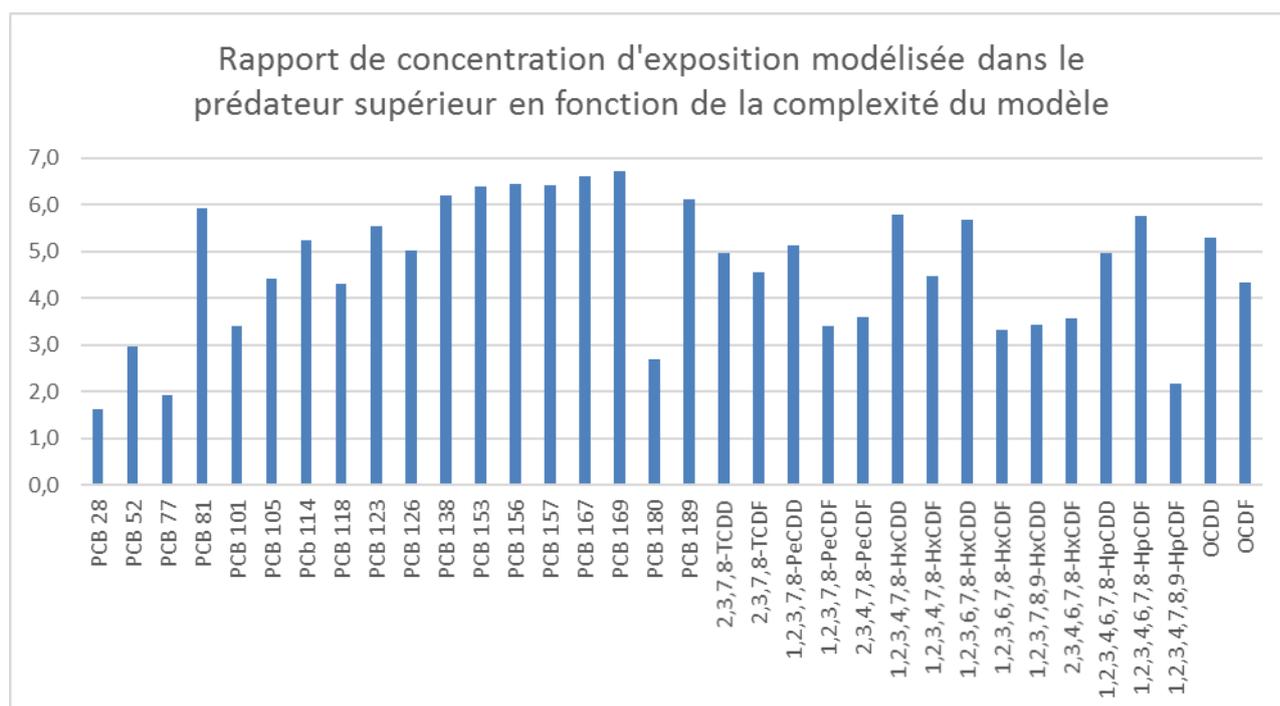


Figure 21 : Rapport entre la concentration modélisée avec le modèle étendu par rapport à cette concentration modélisée avec le modèle complexe.

Les concentrations modélisées diminuent donc de 1,6 à 6,7 fois si les interactions intervenant dans l'écosystème sont décrites plus précisément. Cette diminution est de plus en plus marquée pour les PCB au fur et à mesure que le nombre de chlore dans la molécule considérée augmente mais la même tendance n'est pas observée pour les PCDD/F. L'impact sur les résultats de la modélisation reste inférieur par rapport à celui observé quand un niveau trophique est ajouté à la chaîne alimentaire (les différences de concentrations pour une substance pouvaient alors être jusque 10 fois supérieures ou 80 fois inférieures selon la substance, voir chapitre précédent).

La description exhaustive du réseau trophique est un paramètre qui a un impact sur les résultats d'une éRé. Il semble qu'en première approche, un modèle conceptuel simplifié et protecteur comportant un premier prédateur, un prédateur supérieur et un nombre restreint de voies d'exposition permette à l'éRé d'atteindre son objectif. C'est une approche majorante qui peut convenir pour la plupart des éRé. De façon plus situationnelle, il peut être nécessaire de consacrer plus d'effort à décrire l'écosystème via le modèle conceptuel si une éRé aux résultats plus réalistes, plus proches d'un contexte local particulier est attendue.

VIII Etude 3 Influence des paramètres du milieu sur les résultats d'une éRé

D'autres facteurs peuvent avoir un effet sur la quantité de substance qui est transférée dans l'organisme. Le pourcentage de couverture végétale de la zone a une influence du point de vue de la stabilité du sol et de la quantité de polluant transféré aux plantes. La topographie de la zone d'étude peut indiquer si les dépressions à la surface du sol vont provoquer une accumulation localisée des contaminants. Enfin, le mode de distribution granulométrique du sol et son taux de matière organique ont une influence sur la biodisponibilité des composés organiques persistants considérés.

Quatre situations sont envisagées, chacune d'entre elles décrit les spécificités des 4 parcelles retenues. Cette étude permet d'évaluer si une description plus précise du sol peut avoir une réelle influence sur l'expression des résultats de l'évaluation des risques pour les écosystèmes.

1. Définitions des différents modèles conceptuels

Les variables développées dans cette étude sont le % de couverture végétale, la présence de dépressions sur la maille, le % de matière organique et la distribution granulométrique du sol. Les quatre parcelles sont relativement homogènes du point de vue de ces caractéristiques mais il existe quand même des différences, cela permet de vérifier si le paramètre « description du milieu » est vraiment sensible ou si une description générale du milieu est suffisante. Si la zone avait été très hétérogène, la méthodologie aurait de toute façon recommandé de la diviser en parcelles homogènes.

Les caractéristiques des parcelles retenues pour l'étude sont présentées dans le Tableau 11. Les données en bleu sont issues des mesures réalisées sur le terrain et des notes sur les fiches signalétiques de prélèvement de sol. Les données en noir sont des valeurs par défaut ou calculées par TerraSys. Une première série de modélisation sera effectuée avec le % de MO proposé par TerraSys pour ce type de sol (0,1%) puis une seconde avec les valeurs de MO du Tableau 11.

Tableau 11 : Description des 4 différentes parcelles.

	P1	P2	P3	P4
% argile	5	6	6	5
% limon	11	14	12	9
% sable	81	79	79	83
Indice de rugosité de surface	33*	33*	33*	33*
% Végétation	90	90	60	50
% sol nu	0	0	20	25
Pente	0	0	0	0
Type d'occupation	20*	20*	20*	20*
Dépressions	0	0	0	0
Mode de la distribution granulométrique	3,25	2,61	3,19	3,31
Porosité totale	0,41	0,41	0,41	0,41
pH	5.9	6.2	4.6	5.9
Densité totale (g/cm ³)	1,57	1,57	1,57	1,57
Densité particulaire (g/cm ³)	2,66	2,66	2,66	2,66
Contenu en carbone organique	0,016	0,015	0,03	0,029
Contenu en argile	0,064	0,064	0,064	0,064
Contenu en sable	0,81	0,81	0,81	0,81

* : La valeur 33 correspond à une surface gazonnée, la valeur 20 correspond à une zone d'occupation « aire naturelle »



Les fiches signalétiques qui ont été réalisées pendant les prélèvements de sol indiquent quel type de végétation est présente sur les parcelles et leur densité. Les informations sont difficiles à interpréter en termes de % de végétation, mais pour cet exercice ce niveau d'information est suffisant. Par contre, ces fiches n'indiquent pas d'information relative à la pente ou aux nombres de dépressions des parcelles, toute la zone sera donc considérée avec une pente nulle et privée de dépressions.

Les informations sur la composition du sol comme le % d'argile, de limon et de sable sont disponibles pour les 4 mailles dans le livrable 2 (INERIS 2017). Le logiciel TerraSys identifie d'après ces % le type de sol puis propose des valeurs par défaut pour les caractéristiques qui seraient manquantes. Ainsi les 4 parcelles seraient selon la classification proposée de TerraSys, un sol de type « sable loameux » comme indiqué dans la Figure 22.

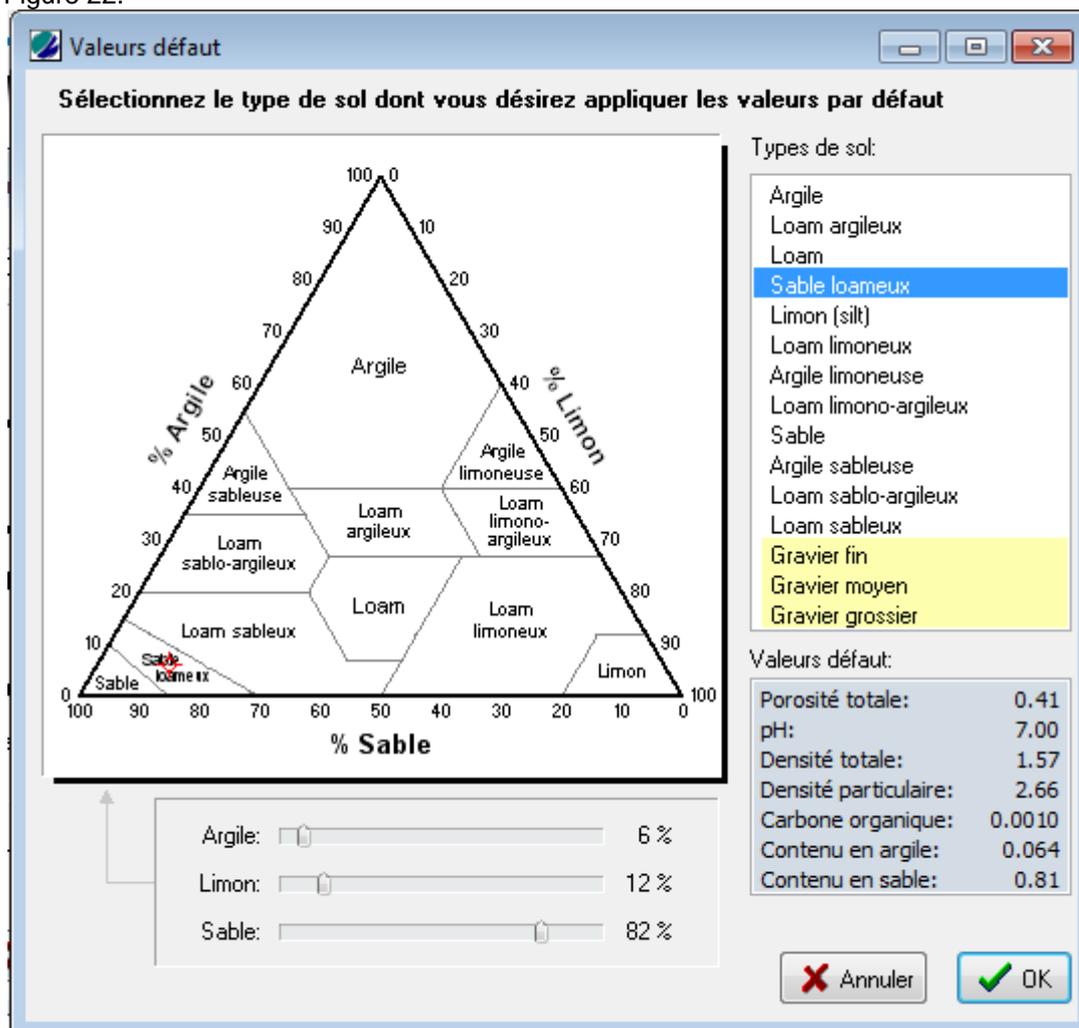


Figure 22 : Identification du type de sol avec le logiciel TerraSys et proposition de valeurs par défaut.

A noter que les taux de matières organiques rapportés dans le rapport INERIS 2017 sont très supérieurs au contenu en carbone organique générique de la base de donnée TerraSys correspondant au type de sol « sable loameux », la valeur générique étant jusque 30 fois inférieure à celle mesurée pendant la phase expérimentale du projet TROPHé.

En ce qui concerne le pH, les valeurs mesurées sur chaque parcelle sont disponibles mais n'influencent pas sur les résultats. En effet, TerraSys propose pour chaque coefficient de partage (Koc, Kow, BCF, ...) de renseigner une valeur pour chaque valeur de pH du milieu afin de faire ensuite la correspondance pendant l'évaluation. Dans le cas de notre étude, le pH n'est pas une variable puisque les informations utilisées ont été mesurées directement dans le sol, et donc correspondant au pH réel du sol.

Afin de permettre une comparaison des résultats modifiés seulement par la variation des paramètres du Tableau 11, il a été décidé d'utiliser la même concentration pour chaque parcelle, la concentration de chaque substance ne varie donc pas d'une parcelle à l'autre.

Enfin, étant donné que le % de couverture végétale fait partie des paramètres évalués dans cette étude, la chaîne trophique du modèle de référence doit être modifiée. En effet, dans ce dernier une seule voie de transfert de contaminant : sol => vers de terre => hérisson est prévue. Un prédateur au régime alimentaire plus diversifié et consommant de la végétation en plus des vers doit donc être sélectionné. C'est selon ces critères qu'a été retenue la caille des blés : elle se nourrit d'invertébrés et de graminées. Son régime alimentaire varie en fonction de la saison, mais pour simplifier le modèle il sera considéré que la caille des blés consomme 50% d'invertébrés (ici, les vers de terre) et 50% de végétaux toute l'année.

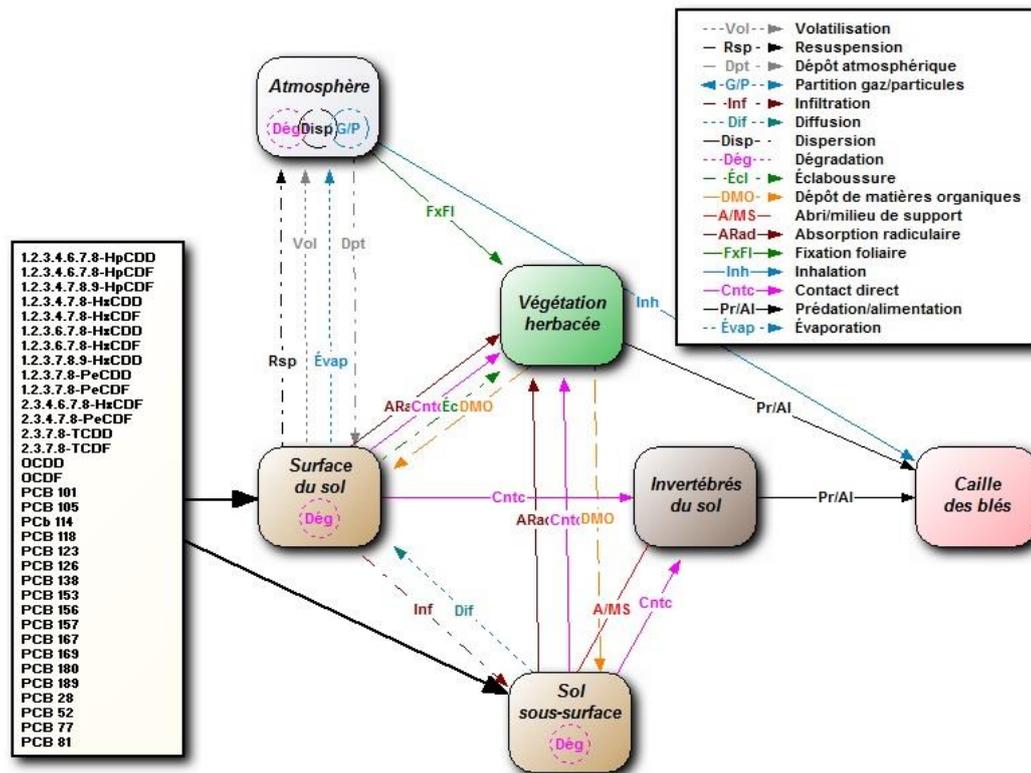


Figure 23: Modèle conceptuel incluant un prédateur qui se nourrit à la fois de vers et de végétaux pour prendre en compte les différents pourcentages de couverture végétale de chaque parcelle

Afin de permettre une comparaison des résultats modifiés seulement par la variation des paramètres du Tableau 11, il a été décidé de ne pas faire varier les BCF utilisés en fonction des parcelles. Les BCF vers de terre correspondent donc au BCF moyens utilisés dans le modèle de référence et les BCF plantes correspondent aux BCF moyens obtenus pendant la phase expérimentale de 2015 sur les graminées sur les 4 parcelles. La spatialisation n'est donc pas prise en compte et les résultats obtenus ne doivent pas être considérés comme applicables au site, nous sommes dans le cadre d'une étude de sensibilité des paramètres sur l'éRé.

Ces valeurs sont rappelées dans le tableau suivant :

Tableau 12: BCF moyens retenus

	BCFvers	BCFgraminés
PCB 28	0,78*	4
PCB 52	2,6*	6,8
PCB 77	0,92	0,82
PCB 81	1*	0,084
PCB 101	1,6	3,7
PCB 105	1,5	1,9
PCb 114	5*	4,2
PCB 118	1,8	2,6
PCB 123	1,3	0,74
PCB 126	0,66	0,063
PCB 138	1	0,29
PCB 153	1,3	0,32
PCB 156	0,93	0,17
PCB 157	0,92	0,13
PCB 167	1,1	0,14
PCB 169	0,62*	0,039*
PCB 180	0,77	0,075
PCB 189	0,67	0,019
2.3.7.8-TCDD	0,08*	0,016*
2.3.7.8-TCDF	0,29	0,095
1.2.3.7.8-PeCDD	0,21*	0,012
1.2.3.7.8-PeCDF	0,21	0,054
2.3.4.7.8-PeCDF	0,14	0,031
1.2.3.4.7.8-HxCDD	0,073*	0,01*
1.2.3.4.7.8-HxCDF	0,073	0,02
1.2.3.6.7.8-HxCDD	0,13*	0,0051*
1.2.3.6.7.8-HxCDF	0,081	0,023
1.2.3.7.8.9-HxCDD	0,036*	0,0086*
2.3.4.6.7.8-HxCDF	0,04	0,011
1.2.3.4.6.7.8-HpCDD	0,039	0,015
1.2.3.4.6.7.8-HpCDF	0,13	0,04
1.2.3.4.7.8.9-HpCDF	0,01	0,0019
OCDD	0,028	0,0059*
OCDF	0,023	0,006

* : Ces BCF ont été établis en utilisant une ou plusieurs valeurs sous la limite de quantification



2. Résultats de la modélisation des concentrations d'exposition

Les résultats des différentes modélisations des concentrations d'exposition dans la caille des blés prenant en compte les différentes caractéristiques des parcelles et la valeur générique de matière organique (0,1%) sont présentées dans le Tableau 13.

Tableau 13: Concentrations modélisées dans la caille des blés (mg/kg pf) en fonction des caractéristiques des parcelles (MO = valeur générique de 0,1%)

Contaminant	P1	P2	P3	P4
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	4,7E-07	4,7E-07	4,8E-07	4,8E-07
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	6,6E-07	6,6E-07	6,6E-07	6,6E-07
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	2,1E-07	2,1E-07	2,2E-07	2,2E-07
1,2,3,4,7,8-HxCDD	2,0E-08	2,0E-08	2,0E-08	2,0E-08
1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,2E-07	1,2E-07	1,2E-07	1,2E-07
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1,9E-07	1,9E-07	1,9E-07	1,9E-07
1,2,3,6,7,8-HxCDF	6,4E-07	6,4E-07	6,4E-07	6,4E-07
1,2,3,7,8,9-HxCDD	3,4E-08	3,4E-08	3,5E-08	3,5E-08
1,2,3,7,8-PeCDD	3,2E-09	3,2E-09	3,2E-09	3,2E-09
1,2,3,7,8-PeCDF	7,3E-08	7,3E-08	7,3E-08	7,3E-08
2,3,4,6,7,8-HxCDF	4,0E-08	4,0E-08	4,1E-08	4,1E-08
2,3,4,7,8-PeCDF	6,6E-08	6,6E-08	6,6E-08	6,6E-08
2,3,7,8-TCDD	8,5E-10	8,5E-10	8,5E-10	8,5E-10
2,3,7,8-TCDF	6,9E-08	6,9E-08	7,0E-08	7,0E-08
OCDD	7,6E-07	7,6E-07	7,7E-07	7,7E-07
OCDF	3,6E-06	3,6E-06	3,7E-06	3,7E-06
PCB 101	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06
PCB 105	2,2E-06	2,2E-06	2,2E-06	2,2E-06
PCB 114	2,7E-07	2,7E-07	2,7E-07	2,7E-07
PCB 118	8,3E-06	8,3E-06	8,3E-06	8,3E-06
PCB 123	1,8E-07	1,8E-07	1,8E-07	1,8E-07
PCB 126	4,2E-07	4,2E-07	4,2E-07	4,2E-07
PCB 138	3,0E-05	3,0E-05	3,0E-05	3,0E-05
PCB 153	5,6E-05	5,6E-05	5,6E-05	5,6E-05
PCB 156	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06
PCB 157	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06
PCB 167	5,1E-06	5,1E-06	5,1E-06	5,1E-06
PCB 169	2,2E-07	2,2E-07	2,2E-07	2,2E-07
PCB 180	6,2E-05	6,2E-05	6,2E-05	6,2E-05
PCB 189	2,9E-06	2,9E-06	2,9E-06	2,9E-06
PCB 28	2,3E-08	2,3E-08	2,3E-08	2,3E-08
PCB 52	2,0E-07	2,0E-07	2,0E-07	2,0E-07
PCB 77	1,8E-07	1,8E-07	1,8E-07	1,8E-07
PCB 81	1,9E-08	1,9E-08	1,9E-08	1,9E-08



Les concentrations obtenues sont très proches les unes des autres quelle que soit la substance. Elles ne sont toutefois pas identiques : les concentrations sont légèrement plus élevées sur la parcelle P3 et P4, mais il est difficile de dire que cette différence est significative. Les différentes parcelles ont des caractéristiques finalement très proches mis à part la couverture végétale qui est inférieure sur P3 et P4.

Les résultats des différentes modélisations des concentrations d'exposition dans la caille prenant en compte les différentes caractéristiques des parcelles et les valeurs mesurées de matière organique sont présentées dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Concentrations modélisées dans la caille des blés (mg/kg pf) en fonction des caractéristiques des parcelles (MO = valeurs mesurées)

Contaminant	P1 (MO= 1,6%)	P2 (MO= 1,5%)	P3 (MO= 3%)	P4 (MO= 2,9%)
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	4,7E-07	4,7E-07	4,7E-07	4,7E-07
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	6,6E-07	6,6E-07	6,6E-07	6,6E-07
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1,9E-07	1,9E-07	1,9E-07	1,9E-07
1,2,3,4,7,8-HxCDD	2,0E-08	2,0E-08	2,0E-08	2,0E-08
1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,2E-07	1,2E-07	1,2E-07	1,2E-07
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1,9E-07	1,9E-07	1,9E-07	1,9E-07
1,2,3,6,7,8-HxCDF	6,2E-07	6,2E-07	6,2E-07	6,2E-07
1,2,3,7,8,9-HxCDD	3,2E-08	3,2E-08	3,2E-08	3,3E-08
1,2,3,7,8-PeCDD	3,1E-09	3,1E-09	3,1E-09	3,1E-09
1,2,3,7,8-PeCDF	7,1E-08	7,1E-08	7,1E-08	7,1E-08
2,3,4,6,7,8-HxCDF	3,9E-08	3,9E-08	3,9E-08	3,9E-08
2,3,4,7,8-PeCDF	6,4E-08	6,4E-08	6,4E-08	6,4E-08
2,3,7,8-TCDD	8,4E-10	8,4E-10	8,4E-10	8,4E-10
2,3,7,8-TCDF	6,9E-08	6,9E-08	6,9E-08	6,9E-08
OCDD	7,5E-07	7,5E-07	7,5E-07	7,5E-07
OCDF	3,3E-06	3,3E-06	3,3E-06	3,3E-06
PCB 101	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06	3,2E-06
PCB 105	2,2E-06	2,2E-06	2,2E-06	2,2E-06
PCB 114	2,7E-07	2,7E-07	2,7E-07	2,7E-07
PCB 118	8,3E-06	8,3E-06	8,3E-06	8,3E-06
PCB 123	1,8E-07	1,8E-07	1,8E-07	1,8E-07
PCB 126	4,1E-07	4,1E-07	4,1E-07	4,1E-07
PCB 138	3,0E-05	3,0E-05	3,0E-05	3,0E-05
PCB 153	5,6E-05	5,6E-05	5,6E-05	5,6E-05
PCB 156	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06	5,0E-06
PCB 157	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06	1,1E-06
PCB 167	5,1E-06	5,1E-06	5,1E-06	5,1E-06
PCB 169	2,2E-07	2,2E-07	2,2E-07	2,2E-07
PCB 180	5,9E-05	5,9E-05	5,9E-05	5,9E-05
PCB 189	2,9E-06	2,9E-06	2,9E-06	2,9E-06
PCB 28	2,2E-08	2,2E-08	2,2E-08	2,2E-08
PCB 52	2,0E-07	2,0E-07	2,0E-07	2,0E-07
PCB 77	1,6E-07	1,6E-07	1,6E-07	1,6E-07
PCB 81	1,9E-08	1,9E-08	1,9E-08	1,9E-08



Les concentrations modélisées sont légèrement inférieures si les valeurs de carbone organique mesurées sur le terrain sont utilisées. C'est un résultat attendu puisque la matière organique du sol a tendance à fixer les substances organiques dans le sol, réduisant ainsi leur biodisponibilité et le transfert dans la chaîne alimentaire. En revanche, l'écart de différence des concentrations est plutôt réduit comparé à la différence qui existe entre le % MO générique et ceux qui sont mesurés. Les % MO mesurés sont au moins 10 fois supérieurs au % MO générique mais n'introduisent pourtant qu'une variation peu significative sur la concentration d'exposition du prédateur calculée (comparaison Tableau 9 et 10). En ce qui concerne l'impact des autres paramètres, la concentration d'exposition modélisée dans la caille des blés varie encore une fois très peu d'une parcelle à une autre.

3. La description de la parcelle est-elle un paramètre sensible de l'évaluation de l'exposition ?

Les parcelles étudiées sont assez proches en termes de caractéristiques physicochimiques. Modifier les valeurs de MO, de % de couverture végétale et la composition du sol en termes de limon sable et argile n'a finalement qu'un impact limité sur les résultats de la modélisation des concentrations d'exposition du prédateur de l'écosystème. En conclusion, utiliser la moyenne comme la valeur maximum pour ces paramètres paraît une démarche suffisante tant que les parcelles sont à peu près homogènes.

La description d'une parcelle fait intervenir plusieurs caractéristiques comme par exemple la teneur en matière organique, le % de couverture végétal et la composition du sol en termes de limon, sable et argile. Les résultats obtenus sur une parcelle homogène ne varient pas de façon significative selon que les valeurs moyennes ou maximum de ces paramètres soient choisis pour modéliser le transfert des substances du sol au prédateur. En conséquence il est recommandé :

- D'utiliser la moyenne des valeurs pour ces paramètres sur une parcelle plus ou moins homogène.
- De fractionner une zone hétérogène en parcelles plus ou moins homogènes avant de réaliser l'étude.



IX Evaluation du risque d'après les biotests et examen approfondi des résultats

Une évaluation du risque pour les écosystèmes peut se concevoir selon plusieurs approches. Celle qui a été suivie jusqu'ici et qui consiste à opposer substance par substance une concentration d'exposition et une concentration sans effet attendu (PEC/PNEC) s'appelle l'approche substance (ou approche chimique). Il est également possible de suivre des indicateurs écologiques (approche écologique) ou de réaliser une batterie de biotests avec le sol pollué (approche matrice ou écotoxicologique). Le mieux étant de combiner ces différentes approches comme le recommande par exemple la norme ISO 19204 pour l'évaluation des risques sur sol contaminé – approche TRIAD (ISO 2014).

TerraSys propose un outil pour enregistrer les résultats issus d'une batterie de biotests puis de réaliser une estimation des risques à partir de ceux -ci. Comme évoqué en p31, des biotests ont été conduits avec des échantillons prélevés sur les parcelles. L'objet de ce chapitre est donc de voir comment ces résultats s'intègrent dans TerraSys et comment le logiciel les interprète pour établir un rapport de risque.

1. Description de l'outil

Le manuel de TerraSys présente cet outil comme optionnel dans l'évaluation du risque pour les écosystèmes mais recommande toutefois de l'utiliser si des données sont disponibles pour les informations particulières que ces dernières peuvent apporter et qui peuvent combler les incertitudes liées à « l'approche conventionnelle de modélisations mathématiques » (Sanexen 2002).

Pour remplir le tableau de données de TerraSys, il faut compléter un formulaire (voir Tableau 15) pour chacune des données.



Tableau 15 : Enregistrement des résultats d'un biotest sous TerraSys.

La première information demandée correspond au type d'essai qui a été conduit, le menu déroulant présente de nombreux essais dont les caractéristiques ont été enregistrées et il est possible d'en créer de nouveaux. Les deux biotests qui ont été réalisés par APESA se trouvent dans la liste des biotests disponibles. Le formulaire est toujours le même quelle que soit la nature de l'essai.

2. Les données disponibles

La batterie de biotests qui a été réalisée avec le sol prélevé sur le site contaminé renseigne la toxicité de celui-ci pour les végétaux et les invertébrés du sol. Les résultats ont été transmis sous la forme du rapport scientifique : Projet P4 « tests écotoxicologiques » premiers résultats sur le site de Saint-Cyprien (42) (LASCOURREGES 2015).

2.1 Expositions sur les végétaux

La méthodologie suivie est inspirée des normes ISO 11269-1 et 11269-2 : croissance après 14 jours de 6 espèces végétales et élongation des tiges et racines, le contrôle interne d'exposition est un terreau horticole. Les résultats sont exprimés sous la forme de boxplot et révèlent que les résultats sont très dispersés et que la toxicité des 4 parcelles, supérieure au témoin, est comparable entre elles. Dans le détail, la biomasse est impactée sur toutes les parcelles et particulièrement sur P4. En ce qui concerne la longueur des tiges, la parcelle P3 aurait l'effet le plus toxique et les plantes exposées à P1 et P4 présentent des tiges plus courtes. En ce qui concerne la longueur racinaire, les données sont très dispersées et la parcelle CY5, non retenue dans ce rapport, est la plus toxique.



Tableau 16 : Pourcentage d'effet sur la biomasse à 14 jours.

% d'effet						
	Blé	Cresson	Laitue	Moutarde	Sorgho	Tomate
P1	39	29	33	62	1	40
P2	33	21	15	62	9	44
P3	48	88	1	70	53	28
P4	47	45	41	64	14	59
Témoïn	0	0	0	0	0	0

2.2 Expositions sur les vers de terre

Le protocole est adapté de la norme ISO 11268-1 : Détermination de la toxicité aiguë vis-à-vis de *Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*.

Aucune mortalité n'a été observée, ce résultat est entré dans la grille de donnée TerraSys. D'autres paramètres tels que la variation de masse ont été mesurés mais ils ne sont pas pris en compte par la norme ISO 11268-1 et ne peuvent donc pas être renseignés dans le formulaire.

3. Résultats

Une fois complété le tableau des résultats de bioessais, TerraSys propose une fonction « Modélisation : Estimation des risques à partir des biotests ». Cette fonction demande de préciser l'indicateur approprié du seuil toxique (par exemple EC₅₀) pour obtenir une estimation quantitative des indices de risques. Etant donné que les résultats retenus sont issus d'essai sans dilution, il ne sera possible d'obtenir qu'une évaluation qualitative du risque.

Comme présenté précédemment, cette fonction de TerraSys correspond à l'évaluation de risque pour les écosystèmes selon l'approche écotoxicologique. Elle identifie pour chaque sol testé un risque ou une absence de risque en fonction du résultat du biotest enregistré. Les résultats se présentent sous la forme d'un fichier texte présenté dans l'annexe 2. Ils indiquent qu'un risque existe pour la végétation herbacée du site étudié et une absence de risque pour les invertébrés du sol. Concrètement, le logiciel met en rapport les résultats enregistrés et les éléments décrits dans le modèle conceptuel. Il a identifié un impact sur les végétaux et la présence de végétation herbacée dans le modèle, en conséquence il signale un risque pour ce récepteur. L'évaluation n'identifiera pas de risque pour un récepteur s'il n'est pas décrit dans le modèle ou s'il n'est pas couvert par les bioessais renseignés dans le formulaire. Comme aucun essai n'a été réalisé sur un mammifère, l'évaluation n'extrapole pas un impact direct sur le prédateur hérisson même si un impact sur sa proie a été identifié (cette théorie a été vérifiée avec des résultats d'essai sur vers de terre modifiés). Toutefois, la fonction « Modélisation : Estimation des risques à partir des biotests » n'a pas vocation à être utilisée seule mais conjointement avec l'éRé à partir du risque chimique.

4. La fonction d'examen approfondi des résultats

La fonction d'examen approfondi combine l'évaluation des risques par modélisation des rapports de risques (approche chimique) et par les résultats des biotests. Dans le cadre de ce projet, l'évaluation porte sur l'unique substance pour laquelle des valeurs de concentration seuil étaient disponibles : la 2,3,7,8-TCDD⁸. La base de données incluse dans TerraSys comprend des doses de référence établies sur rat, souris et oiseau, le logiciel effectue une conversion (voir Annexe 4) pour correspondre aux espèces sélectionnées dans le réseau trophique choisi.

Les valeurs de référence écotoxicologiques de 2,3,7,8-TCDD renseignées dans TerraSys :

- pour les oiseaux, la plus protectrice est de $1.4 \cdot 10^{-6}$,
- pour les mammifères, la plus protectrice est de 1.10^{-6} .

⁸ Note : la 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-para-dioxine est la molécule émise lors de l'accident chimique du 10 juillet 1976 à Seveso (Italie). Cet accident est à l'origine de l'adoption par la communauté européenne de la « Directive SEVESO ».



Ainsi un calcul de risque chimique de type PEC/PNEC est réalisé puis cette réponse est intégrée avec les résultats obtenus par les bioessais.

Le résultat de l'évaluation du risque pour la 2,3,7,8-TCDD avec les données obtenues en phase expérimentale et le modèle d'exposition défini comme le modèle de référence (concentration moyenne dans le sol des 4 parcelles, BCFvers moyen) indique un indice de risque de 0,17 pour le hériçon, représentant des mammifères terrestres (le détail du rapport tel que produit par TerraSys constitue l'annexe 3). S'il avait fallu tenir compte de la spatialisation de la pollution, la maille la plus contaminée en 2,3,7,8-TCDD (P4), présentant une concentration environ 4 fois supérieure à la moyenne, le risque intégré aurait été environ 4 fois supérieur ce qui reste encore inférieur au seuil de 1 ($4 \times 0,17 = 0,68$). Dans les deux cas ces indices de risques se traduisent par un risque négligeable pour les organismes terrestres.

La fonction « évaluation du risque intégré » demande de noter le niveau de confiance (de 1 à 5) pour tous les paramètres utilisés pour décrire les substances et le modèle. Il compare ensuite les résultats obtenus avec les deux méthodes d'évaluation du risque (chimique et écotoxicologique). Si les résultats obtenus selon les deux approches sont contradictoires, la fonction d'examen approfondi des résultats conserve l'impact enregistré lors des bioessais et précise que « *le résultat négatif des modélisations pourrait être lié au nombre restreint de contaminants organiques et/ou inorganiques* » pris en compte. Une approche protectrice du risque est donc suivie.

Avec les données de cette étude, l'évaluation conclue enfin par un risque significatif direct pour les végétaux herbacés avec un niveau de confiance modéré. La possibilité d'un risque indirect est également couverte dans le rapport de sortie (Annexe 4 et « *un risque significatif, peu important* », pour les invertébrés du sol avec un niveau de confiance faible. Le risque pour les invertébrés du sol n'avait pourtant été démontré par aucune des approches. La possibilité d'un risque indirect est également couverte dans le rapport de sortie (Extraits dans l'Annexe 4).

Le logiciel TerraSys propose d'interpréter les résultats de bioessais réalisés avec le sol contaminé conjointement aux résultats obtenus pendant la modélisation du risque chimique. Evaluer le risque pour les écosystèmes en suivant plusieurs types d'approche est une procédure recommandée par exemple par la norme ISO 19204 pour l'évaluation des risques sur sol contaminés. Les points forts de chaque type d'approche viennent ainsi pallier aux points faibles des autres pour diminuer les incertitudes de l'évaluation de risques. Le module semble suffisamment développé mais il n'a pas été possible de tester cette fonction de façon approfondie. De plus amples études pourraient être conduites par exemple sur un site contaminé avec des substances pour lesquelles la toxicité pour les organismes est mieux documentée et dont le sol a été testé sur un plus grand nombre d'essais d'écotoxicité.



X Synthèse des résultats

1. La sensibilité des paramètres sur les résultats de l'évaluation de l'exposition

Le projet GESIPOL a permis de générer de nombreuses données sur le site pollué de Saint Cyprien et beaucoup d'informations sur les PCB et les PCDD/F. Avec toutes ces données il a été possible d'une part d'exploiter le logiciel d'évaluation des risques TerraSys de Sannexen mais aussi de tester la sensibilité de plusieurs paramètres intervenant dans une éRé et dont la sélection est à la responsabilité de l'évaluateur. Il a été permis de déterminer quels sont les paramètres ayant finalement assez peu d'impact sur les résultats et lesquels sont déterminants. Pour les premiers (la composition de la diète des organismes définis comme objectif de protection, une description exhaustive des caractéristiques de plusieurs parcelles globalement homogènes), une approche protectrice ou moyennée peut être choisie, mais pour les seconds (le BCF, le nombre de niveau trophique à considérer), la sélection de leur valeur doit être effectuée avec soin, en tenant compte des objectifs et de la dimension (locale ou applicable au niveau national) de l'évaluation.

Pour reprendre les conclusions des différentes études qui ont été menées dans ce rapport :

- En ce qui concerne la caractérisation de la substance, le BCF est un facteur déterminant et a un impact important sur les résultats. Seules les valeurs de BCF avec un indice de confiance élevé (ce n'est pas le cas par exemple des valeurs calculées à partir de concentrations mesurées sous la limite de quantification) devraient être retenues. De plus, la valeur maximale du BCF 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 et de considérer le risque lié à l'empoisonnement secondaire à ces différents niveaux. Un premier prédateur suivi d'un prédateur supérieur semble constituer un minimum pour ne pas sous-estimer le transfert de ces contaminant dans l'écosystème.
- En revanche, la description exhaustive (% sable, limon, argile, %MO et % couverture végétale) de différentes parcelles relativement homogènes n'a que très peu d'impact sur les résultats de la modélisation des concentrations d'exposition. Il est donc suffisant de regrouper les parcelles à peu près homogènes entre elles et de considérer pour ces paramètres la moyenne ou une valeur majorante.

2. Perspectives

L'utilisation d'un logiciel de modélisation pour évaluer la sensibilité des différents paramètres propres au transfert de contaminants dans la chaîne trophique permet de répondre à certaines questions que se posent les évaluateurs du risque de façon rapide et convaincante. L'exercice pourrait être renouvelé avec d'autres problématiques comme la biodisponibilité des métaux dans les sols et les sédiments ou encore l'évolution des concentrations d'exposition dans le temps.

L'outil de TerraSys qui permet d'intégrer les résultats de biotests avec les résultats d'une évaluation selon l'approche chimique est également un point intéressant qui pourrait être examiné plus en avant. Dans ce rapport il n'a finalement pas été possible de conduire l'étude jusqu'au calcul du risque pour chaque substance, mais renouveler l'exercice sur un site existant contaminé avec des substances pour lesquelles des seuils d'écotoxicité sont disponibles et des bioessais réalisés pourrait fournir des informations pertinentes. D'autant plus si elles sont combinées à d'autres initiatives qui vont dans le sens d'utiliser différentes approches du risque conjointement comme la norme ISO 19204 TRIAD (ISO 2014).



XI Références

INERIS (2014). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques - METHODOLOGIE, INERIS: 68.

INERIS (2015). Paramètres physico-chimiques des substances prédéfinies dans le logiciel MODUL'ERS, INERIS: 82.

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

ISO (2014). "Soil quality - Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (TRIAD approach) - Draft." ISO/DIS 19204

LASCOURREGES, J.-F. (2015). Projet P4 « tests écotoxicologiques », premiers résultats sur le site de Saint-Cyprien (42). Projet TROPHE Transferts et Risques des Organiques Persistants pour l'Homme et les écosystèmes., Innovasol: 6.

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

US-EPA (1998). Methodology for assessing health risks associated with multiple pathways of exposure to combustor emissions., EPA, USA.



XII Annexes

Annexe	Libellé
1	Description de la diète et des relations trophiques dans le réseau trophique complexe.
2	Calcul des indices de risques à partir de biotests.
3	Calcul des indices de risques à partir de la modélisation mathématique pour le 2,3,7,8-TCDD
4	Extraits du rapport de risque intégré (Examen approfondi des résultats)



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

COMPOSITION DE LA DIÈTE DES ÉLÉMENTS HÉTÉROTROPHES:

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Invertébrés du sol
(aucun)

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Hérisson d'Europe
Jan. Fév. Mars Avril Mai Juin Juil. Août Sept. Oct. Nov. Déc.

- Invertébrés du sol	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%
- Invertébrés terrestres	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Renard roux
Jan. Fév. Mars Avril Mai Juin Juil. Août Sept. Oct. Nov. Déc.

- Caille des blés	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%
- Lapin de garenne	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%
- Hérisson d'Europe	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%
- Chouette hulotte	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Chouette hulotte
Jan. Fév. Mars Avril Mai Juin Juil. Août Sept. Oct. Nov. Déc.

- Caille des blés	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%
- Moineau domestique	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%
- Musaraigne carrelet	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%	30.0%
- Lapin de garenne	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Lapin de garenne
Jan. Fév. Mars Avril Mai Juin Juil. Août Sept. Oct. Nov. Déc.

- Végétation herbacée	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
-----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Invertébrés terrestres
- Végétation herbacée

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Musaraigne carrelet
Jan. Fév. Mars Avril Mai Juin Juil. Août Sept. Oct. Nov. Déc.

- Invertébrés terrestres
 100% 100% 100% 100% 100% 100% 100% 100% 100% 100% 100% 100%

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Caille des blés
 Jan. Fév. Mars Avril Mai Juin Juil. Août Sept. Oct. Nov. Déc.

- Végétation herbacée
 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0%
 - Invertébrés terrestres
 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0% 50.0%

ÉLÉMENTS CONSTITUANT LA DIÈTE DE : Moineau domestique
 Jan. Fév. Mars Avril Mai Juin Juil. Août Sept. Oct. Nov. Déc.

- Invertébrés terrestres
 80.0% 80.0% 80.0% 80.0% 80.0% 80.0% 80.0% 80.0% 80.0% 80.0% 80.0% 80.0%
 - Invertébrés du sol
 20.0% 20.0% 20.0% 20.0% 20.0% 20.0% 20.0% 20.0% 20.0% 20.0% 20.0% 20.0%

Nombre de chaînes trophiques définies: 11

Inventaire des chaînes trophiques:

- 1 Végétation herbacée » Caille des blés » Renard roux
- 2 Végétation herbacée » Lapin de garenne » Renard roux
- 3 Végétation herbacée » Invertébrés terrestres » Musaraigne carrelet » Chouette hulotte » Renard roux
- 4 Invertébrés du sol » Hérisson d'Europe » Renard roux
- 5 Invertébrés du sol » Moineau domestique » Chouette hulotte » Renard roux
- 6 Végétation herbacée » Caille des blés » Chouette hulotte » Renard roux
- 7 Végétation herbacée » Lapin de garenne » Chouette hulotte » Renard roux
- 8 Végétation herbacée » Invertébrés terrestres » Hérisson d'Europe » Renard roux
- 9 Végétation herbacée » Invertébrés terrestres » Moineau domestique » Chouette hulotte » Renard roux
- 10 Végétation herbacée » Invertébrés terrestres » Caille des blés » Renard roux
- 11 Végétation herbacée » Invertébrés terrestres » Caille des blés » Chouette hulotte » Renard roux

Sommaire des récepteurs écologiques pour lesquels les risques peuvent être évalués:

- | | | | |
|----|------------------------|---|--|
| 1 | Végétation herbacée | = | Producteurs primaires (autotrophes) |
| 2 | Invertébrés du sol | = | Consommateurs primaires détritivores |
| 3 | Hérisson d'Europe | = | Consommateurs de niveaux 1/2 (Régime alimentaire: Insectes/Invertébrés) |
| 4 | Renard roux | = | Consommateurs de niveaux 2/3/4 (Régime alimentaire: Chair) |
| 5 | Chouette hulotte | = | Consommateurs de niveaux 2/3 (Régime alimentaire: Chair) |
| 6 | Lapin de garenne | = | Consommateurs de niveau 1 (Régime alimentaire: Végétaux) |
| 7 | Invertébrés terrestres | = | Consommateurs primaires ou secondaires |
| 8 | Musaraigne carrelet | = | Consommateurs de niveau 2 (Régime alimentaire: Insectes/Invertébrés) |
| 9 | Caille des blés | = | Consommateurs de niveaux 1/2 (Régime alimentaire: Végétaux/Insectes/Invertébrés) |
| 10 | Moineau domestique | = | Consommateurs de niveaux 1/2 (Régime alimentaire: Insectes/Invertébrés) |

ANNEXE 2 CALCUL DES INDICES DE RISQUES A PARTIR DE BIOTESTS

TERRASYS 1.0 - CALCUL DES INDICES DE RISQUES À PARTIR DE BIOTESTS

Base de calcul des indices de risques : Niveau minimal avec effet (LOEC)

Liste des échantillons :

Numéro	Matrice	X	Y
P1	Solide	480	230
P2	Solide	320	190
P3	Solide	210	230
P4	Solide	230	260

Liste des biotests :

1. Germination et croissance de plantes terrestres- ISO 11269-2. 1995 (4 échantillons)
 - A. Inhibition de la croissance (21 jours)
2. Mortalité du ver Eisenia - ISO 11268-1. 1993 (4 échantillons)
 - A. Létalité (14 jours)

Description des enregistrements :

#	Biotest	#Éch.	Type de réponse	Concentration échantillon	Variable d'effet	%Réponse toxique	Statistist. Significatif?	Biol./Écol. significatif?	Indice de risques	Indice qualitatif
1	1A	P1	Réponse toxique	N.A.	N.A.	39	Oui	?	N.C.	> 1.0
2	1A	P1	Réponse toxique	N.A.	N.A.	29	Oui	?	N.C.	> 1.0
3	1A	P1	Réponse toxique	N.A.	N.A.	33	Oui	?	N.C.	> 1.0
4	1A	P1	Réponse toxique	N.A.	N.A.	62	Oui	?	N.C.	> 1.0
5	1A	P1	Réponse toxique	N.A.	N.A.	1	Non	?	N.C.	< 1.0
6	1A	P1	Réponse toxique	N.A.	N.A.	40	Oui	?	N.C.	> 1.0
7	1A	P2	Réponse toxique	N.A.	N.A.	33	Oui	?	N.C.	> 1.0
8	1A	P2	Réponse toxique	N.A.	N.A.	21	Oui	?	N.C.	> 1.0
9	1A	P2	Réponse toxique	N.A.	N.A.	15	Oui	?	N.C.	> 1.0
10	1A	P2	Réponse toxique	N.A.	N.A.	62	Oui	?	N.C.	> 1.0
11	1A	P2	Réponse toxique	N.A.	N.A.	9	Oui	?	N.C.	> 1.0
12	1A	P2	Réponse toxique	N.A.	N.A.	44	Oui	?	N.C.	> 1.0
13	1A	P3	Réponse toxique	N.A.	N.A.	48	Oui	?	N.C.	> 1.0
14	1A	P3	Réponse toxique	N.A.	N.A.	88	Oui	?	N.C.	> 1.0
15	1A	P3	Réponse toxique	N.A.	N.A.	1	Oui	?	N.C.	> 1.0
16	1A	P3	Réponse toxique	N.A.	N.A.	70	Oui	?	N.C.	> 1.0
17	1A	P3	Réponse toxique	N.A.	N.A.	53	Oui	?	N.C.	> 1.0
18	1A	P3	Réponse toxique	N.A.	N.A.	28	Oui	?	N.C.	> 1.0
19	1A	P4	Réponse toxique	N.A.	N.A.	47	Oui	?	N.C.	> 1.0
20	1A	P4	Réponse toxique	N.A.	N.A.	45	Oui	?	N.C.	> 1.0
21	1A	P4	Réponse toxique	N.A.	N.A.	41	Oui	?	N.C.	> 1.0
22	1A	P4	Réponse toxique	N.A.	N.A.	64	Oui	?	N.C.	> 1.0
23	1A	P4	Réponse toxique	N.A.	N.A.	14	Oui	?	N.C.	> 1.0
24	1A	P4	Réponse toxique	N.A.	N.A.	59	Oui	?	N.C.	> 1.0
25	2A	P1	Réponse toxique	N.A.	N.A.	0	Non	?	N.C.	< 1.0
26	2A	P2	Réponse toxique	N.A.	N.A.	0	Non	?	N.C.	< 1.0
27	2A	P3	Réponse toxique	N.A.	N.A.	0	Non	?	N.C.	< 1.0

28	2A	P4	Réponse toxique	N.A.	N.A.	0	Non	?	N.C.	< 1.0
----	----	----	-----------------	------	------	---	-----	---	------	-------

N.A. : non applicable N.C.: non calculé (conditions de calcul non-satisfaites)

Applicabilité des résultats de biotests aux divers types de récepteurs :

Type de récepteurs	Bst.1	Bst.2
Micro-organismes du sol		
Invertébrés du sol		X
Invertébrés terrestres et aériens		
Végétation herbacée	X	
Végétation arbustive		
Végétation arborescente		
Micro-organismes aquatiques		
Phytoplancton/périphyton		
Plantes aquatiques		
Zooplancton		
Invertébrés aquatiques		
Poissons		
Amphibiens		
Reptiles		
Oiseaux		
Mammifères		

Tableau des indices de risques minimum par éléments/biotests :

Éléments de l'écosystème	Bst.1	Bst.2
Végétation herbacée	< 1.0	--
Invertébrés du sol	--	< 1.0

Tableau des indices de risques maximum par éléments/biotests :

Éléments de l'écosystème	Bst.1	Bst.2
Végétation herbacée	> 1.0	--
Invertébrés du sol	--	< 1.0

INTERPRÉTATION GLOBALE DES RÉSULTATS DES BIOTESTS POUR LE MODÈLE CONCEPTUEL EN COURS :

AVERTISSEMENT :

L'interprétation des données pour l'ensemble des biotests est limitée par le nombre restreint d'échantillons. Les conclusions suggérées doivent être considérées en tenant compte de cette réserve.

Un potentiel de risque significatif a été estimé pour les récepteurs suivants :

- Végétation herbacée

(4 échantillons sur 4 - Niveau de confiance : élevé)

Les indices de risques ayant été calculés sur la base d'un niveau d'effet (LOEC ou ECx), les conclusions énoncées sur la présence de risques reflètent vraisemblablement un risque réel pour les récepteurs écologiques du terrain à l'étude.

L'évaluation des risques écotoxicologiques à partir des résultats de biotests comporte des limites d'interprétation liées aux biotests réalisés, au nombre d'échantillons disponibles, aux types d'effets considérés et à divers autres facteurs. Les conclusions suggérées par les résultats des biotests peuvent cependant être comparés aux indices de risque calculés à partir des concentrations et des valeurs de référence écotoxicologiques propres à chaque contaminant. Ces deux approches étant complémentaires, il est possible que les résultats de l'une et l'autre diffèrent sans que cela implique une contradiction réelle des résultats. Afin de considérer adéquatement les aspects complémentaires et redondants de chaque approche, il est recommandé de procéder à l'intégration des résultats des biotests et des modélisations à l'aide de la fonction "Examen approfondi des résultats" de TerraSys.

ANNEXE 3 CALCUL DES INDICES DE RISQUES POUR LE 2,3,7,8-TCDD, MODELISATION MATHEMATIQUE (APPROCHE CHIMIQUE)

TERRASYS 1.0 --- ESTIMATION DES RISQUES

23/03/2017 16:38:52

Fichier de modèle conceptuel: C:\Users\Pucheux\Documents\NPU\2015 Trophée\Différents modèles Terrasys\00-Base\modele reference.mdl

PARAMÈTRES DE MODÉLISATIONS:

Méthodes d'estimation des risques pour les récepteurs à contact direct (par ordre de priorités):

1. ORNL Tox. Benchmarks - Sol
 2. ORNL Tox. Benchmarks - Eau interstitielle
-

Traitement des concentrations bruit de fond dans les sols:

-> Utiliser le bruit de fond (BF) comme concentration de référence (CdR) si CdR < BF

Méthodes d'estimation des risques pour les récepteurs aquatiques (par ordre de priorités):

- 1.
 - 2.
-

Traitement des concentrations bruit de fond dans l'eau de surface:

-> Utiliser le bruit de fond (BF) comme concentration de référence (CdR) si CdR < BF

Méthodes d'estimation des risques pour les amphibiens (par ordre de priorités):

1. Sanexen - EC20
 2. Sanexen - EC40
-

Traitement de l'exposition bruit de fond (doses + concentration dans l'eau de surface):

-> Utiliser le bruit de fond (BF) comme valeur de référence (VdR) si VdR < BF

Méthodes d'estimation des risques pour les vertébrés terrestres (par ordre de priorités):

1. ORNL Tox. Benchmarks (NOAEL)
2. ORNL Tox. Benchmarks (LOAEL)

Invertébrés du sol	0.00	3.00E-07	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100.00
--------------------	------	----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	--------

Doses bruit de fond (mg/jour) découlant de...

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Ingestion d'aliments :	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00								
Inhalation :	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00								
Dose bruit de fond totale (mg/jr):	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00								

Doses additionnelles (mg/jour) découlant de...

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Ingestion d'aliments :	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07								
Inhalation :	4.97E-11	4.97E-11	4.97E-11	6.57E-11	4.97E-11	9.30E-11	1.49E-10	1.49E-10	1.49E-10	1.49E-10	4.97E-11	1.49E-10
Dose additionnelle totale (mg/jr):	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07								

Doses totales (mg/jour) découlant de...

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Ingestion d'aliments :	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07								
Inhalation :	4.97E-11	4.97E-11	4.97E-11	6.57E-11	4.97E-11	9.30E-11	1.49E-10	1.49E-10	1.49E-10	1.49E-10	4.97E-11	1.49E-10
Dose multi-médias totale (mg/jr):	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07	1.26E-07								

INDICES DE RISQUE :

Doses bruit de fond:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Doses additionnelles :	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Doses totales :	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17

Indice de risque moyen (doses totales) : 0.17
 Indice de risque maximal (doses totales) : 0.17

Synthèse des indices de risques par contaminant:

VÉGÉTATION TERRESTRE :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Végétation herbacée : 2.3.7.8-TCDD	- ? -	- ? -	- ? -	- ? -	- ? -	- ? -
AUTRES RÉCEPTEURS À CONTACT DIRECT :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Invertébrés du sol : 2.3.7.8-TCDD	- ? -	- ? -	- ? -	- ? -	- ? -	- ? -
MAMMIFÈRES :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Hérisson d'Europe : 2.3.7.8-TCDD	0.00	0.17	0.17	0.00	0.17	0.17

- ? - : Indices de risques ne pouvant être calculés selon les méthodes sélectionnées

Synthèse des indices de risques maximum (tous contaminants):

VÉGÉTATION TERRESTRE :	Br.fond	Additionnel	Total
- Végétation herbacée :	0.00	0.00	0.00
AUTRES RÉCEPTEURS À CONTACT DIRECT :	Br.fond	Additionnel	Total
- Invertébrés du sol :	0.00	0.00	0.00
MAMMIFÈRES :	Br.fond	Additionnel	Total
- Hérisson d'Europe :	0.00	0.17	0.17

Sommes des indices de risques de chaque récepteur (tous indices de risques):

VÉGÉTATION TERRESTRE :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Végétation herbacée :	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

AUTRES RÉCEPTEURS À CONTACT DIRECT :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Invertébrés du sol :	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MAMMIFÈRES :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Hérisson d'Europe :	0.00	0.17	0.17	0.00	0.17	0.17

Sommes des indices de risques de chaque récepteur (indices de risques égaux ou supérieurs à 1.0 seulement):

VÉGÉTATION TERRESTRE :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Végétation herbacée :	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AUTRES RÉCEPTEURS À CONTACT DIRECT :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Invertébrés du sol :	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MAMMIFÈRES :	Br.fond (moyen)	Additionnel (moyen)	Total (moyen)	Br.fond (maximum)	Additionnel (maximum)	Total (maximum)
- Hérisson d'Europe :	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ATTENTION: La somme des indices de risques des divers contaminants pour un récepteur donné n'est valide que dans les cas d'additivité des doses ou des concentrations. L'hypothèse d'additivité des doses ou des concentrations peut être retenue aux fins des évaluations de risques préliminaires, mais ne représente pas nécessairement les risques réels pour les récepteurs en cause. Ces résultats doivent être interprétés en tenant compte des limites d'interprétation inhérentes aux hypothèses de travail retenues.

N.B.: Les sommes des indices de risques pour chaque récepteur ne comprennent que les valeurs d'indices de risques ayant pu être calculées pour les contaminants et les récepteurs en cours, selon les méthodes sélectionnées. Ces résultats peuvent être incomplets si des combinaisons de récepteurs et de contaminants n'ont pu être évaluées. Les indices de risques détaillés par récepteur et par contaminant devraient être examinés attentivement pour identifier les indices n'ayant pu être calculés.

ANNEXE 4 EXTRAITS DU RAPPORT DE RISQUE INTEGRE (EXAMEN APPROFONDI DES RESULTATS)

TABLEAU COMPARATIF DES RÉSULTATS QUALITATIFS OBTENUS PAR BIOTESTS ET PAR MODÉLISATIONS

Récepteur	Échantillon (biotest):	1	2	3	4
Végétation herbacée		+/-	+/-	+/-	+/-
Invertébrés du sol		-/-	-/-	-/-	-/-
Hérisson d'Europe		/	/	/	/

Légende des réponses : Réponses des biotests / réponses des modélisations

- : absence de risque ? : risque incertain + : présence de risque

N.B.: Les résultats des modélisations sont calculés pour les échantillons les plus proches des échantillons de biotests correspondants.

Légende des numéros d'échantillons de biotests :

- 1 : P1
- 2 : P2
- 3 : P3
- 4 : P4

VÉRIFICATION DU NIVEAU DE CONCORDANCE DES RÉSULTATS OBTENUS PAR MODÉLISATIONS ET PAR BIOTESTS

Récepteur	Échantillon (biotest):	1	2	3	4
Végétation herbacée		-	-	-	-
Invertébrés du sol		+	+	+	+
Hérisson d'Europe					

Légende des niveaux de concordance :

- : contradictoire ? : équivoque + : concordant

Légende des numéros d'échantillons de biotests :

- 1 : P1
- 2 : P2
- 3 : P3
- 4 : P4

TABLEAU DES RÉSULTATS QUALITATIFS INTÉGRÉS

Récepteur	Échantillon (biotest):	1	2	3	4
Végétation herbacée		+n	+n	+n	+n
Invertébrés du sol		-	-	-	-
Hérisson d'Europe					

Légende des réponses :

- : absence de risque ? : risque incertain + : présence de risque

n : résultat positif du biotest conservé; le résultat négatif des modélisations pourrait être lié au nombre restreint de contaminants organiques et/ou inorganiques

Légende des numéros d'échantillons de biotests :

- 1 : P1
 - 2 : P2
 - 3 : P3
 - 4 : P4
-

CONCLUSIONS DE L'EXAMEN APPROFONDI DES RÉSULTATS :

Sur la base de l'ensemble des informations précédentes (modélisations et biotests), TerraSys suggère les conclusions suivantes quant à la présence ou l'absence d'un risque significatif pour les divers récepteurs écologiques en cause.

1. Un risque significatif, applicable à l'ensemble du terrain à l'étude, est estimé pour le récepteur suivant :

- Végétation herbacée (niveau de confiance : modéré)

2. Un risque significatif, mais peu important, pourrait exister pour le récepteur suivant :

- Invertébrés du sol (niveau de confiance : faible)

3. Aucun risque significatif n'a été estimé pour le récepteur suivant :

- Hérisson d'Europe (niveau de confiance : modéré)

ÉVALUATION DES EFFETS INDIRECTS :

L'évaluation des effets indirects vise à déterminer si les impacts directs de la toxicité des contaminants inscrits dans le modèle conceptuel sur un récepteur donné peuvent entraîner des effets indirects sur un autre récepteur. Cette évaluation tient compte de l'ensemble des interactions écologiques définies entre les divers éléments du modèle conceptuel. Compte-tenu de la complexité inhérente à un système écologique, les conclusions proposées par TerraSys ne doivent être lues qu'à titre d'indications d'effets possibles; il est recommandé à l'analyste de consulter ces indications et de formuler les conclusions et recommandations appropriées sur la base de son expertise professionnelle.

#él.	Récepteur écologique	Risque direct	Risque indirect (interactions avec #...)	Bénéfice indirect (interactions avec #...)
4.	Végétation herbacée	++	NON	NON
5.	Invertébrés du sol	+	NON	NON
6.	Hérisson d'Europe	-	NON	NON

- : Aucun risque + : Risque significatif peu important ++ : Risque significatif et important ? : Non calculé
 Un risque indirect signifie que le récepteur pourrait être indirectement affecté par la toxicité subie par une autre ressource de l'écosystème, en raison d'une dépendance liée à une relation de prédation/alimentation ou de symbiose; un bénéfice indirect signifie que le récepteur pourrait bénéficier indirectement de la toxicité subie par un autre récepteur écologique, en raison d'une relation de compétition avec ce récepteur. Les chiffres entre parenthèses indiquent les numéros des récepteurs écologiques impliqués dans les interactions de prédation/alimentation ou symbiose (risque indirect) ou de compétition (bénéfice indirect).

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°4 - Retour d'expérience suite à l'application des outils et méthodes innovants mis en place dans le cadre du projet TROPHÉ sur un site pollué avec des contaminants organiques bioaccumulables

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 pour les écosystèmes et notamment la chaîne trophique terrestre peu étudiés à ce jour.

Le livrable 4 utilise les facteurs de bioconcentration (BCF) expérimentaux déterminés sur les vers de compost (livrables 1 et 2) pour évaluer les risques pour l'écosystème terrestre. En l'absence de PNEC (concentration sans effet prévu) pour les PCB et les PCDD/F, l'évaluation du risque n'a pas pu être menée jusqu'à son terme, seule l'exposition des organismes terrestres a pu être évaluée.

L'exposition évaluée à l'aide du logiciel TerraSys (Sanexen) montre la sensibilité de certains paramètres. Les BCF peuvent être considérés comme les paramètres essentiels de l'évaluation des transferts de substances. Ne devraient être retenues que les valeurs de BCF avec un indice de confiance élevé. 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.

Essentiel à retenir

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 pour les écosystèmes et notamment la chaîne trophique terrestre peu étudiés à ce jour.

Le livrable 4 utilise les facteurs de bioconcentration (BCF) expérimentaux déterminés sur les vers de compost (livrables 1 et 2) pour évaluer les risques pour l'écosystème terrestre. En l'absence de PNEC (concentration sans effet prévu) pour les PCB et les PCDD/F, l'évaluation du risque n'a pas pu être menée jusqu'à son terme, seule l'exposition des organismes terrestres a pu être évaluée. L'exposition évaluée à l'aide du logiciel TerraSys (Sanexen) montre la sensibilité de certains paramètres. Les BCF peuvent être considérés comme les paramètres essentiels de l'évaluation des transferts de substances. Ne devraient être retenues que les valeurs de BCF avec un indice de confiance élevé. 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.

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