



# Travaux sur les transferts sols-plantes

**Karen Perronnet - INERIS**  
**Roseline Bonnard - INERIS**



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE

**ADEME**



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



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

*Journée technique d'information et de retour  
d'expérience de la gestion des sols pollués –  
2017*



# TROPHé – projet de recherche

## Karen Perronnet - INERIS



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE



30 novembre 2017

# TROPHé : Transfert et Risque des Organiques Persistants pour l'Homme et les écosystèmes

## APR GESIPOL ADEME 2013-2017



### Constats dans la gestion des SSP :

1. Peu de données sur les transferts des PCB et dioxines/furanes dans la chaîne alimentaire (cf. BAPPOP) et le réseau trophique
2. REX faible sur l'exposition et les risques sanitaires en lien avec des sols impactés par des POPs chlorés (détail par congénères) pour certaines voies d'exposition
3. Peu d'évaluation des risques pour l'écosystème (éRé)

Propriétés	Chaîne alimentaire	Toxicité
✓ Stabilité forte	✓ Accumulation dans les graisses	✓ Valeur VTR
✓ Biodégradation faible	✓ Produits animaux (lait, viande, oeuf)	✓ TEF pour PCDD/F et PCB-dl par rapport 2,3,7,8-TCDD
✓ 209 congénères PCB		
✓ 210 congénères PCDD/F		

## **Transfert et Risque des Organiques Persistants pour l'Homme et les écosystèmes**

### **Objectifs : acquisition de nouvelles connaissances afin**

1. d'améliorer la connaissance des transferts, de la bioaccumulation et de la biodisponibilité des PCB et des dioxines (PCDD/F et PCB-dl) dans la chaîne alimentaire et le réseau trophique
2. d'évaluer les expositions et les risques à l'aide d'outils de modélisation (MODUL'ERS, TerraSys - *non présenté*)
3. d'identifier des étapes, des outils communs susceptibles d'être mis en œuvre dans les démarches d'évaluation des risques sanitaires (ERS) et d'évaluation des risques pour l'écosystème (éRé). *Non présenté*

## > Equipes impliquées dans TROPHé - partenaires extérieurs

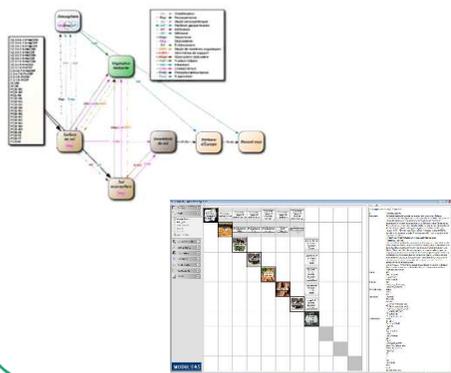
# TROPHé

Gestion du projet :  
**INERIS**

Expérimentations:



Modélisations:



**INERIS**



**UFR Chrono  
Environnement  
Franche Comté**

**Projet TROPE:**  
transferts des POPs  
dans les escargots



**Lab Transfert-  
université de  
Bordeaux +  
Envisol + EODD**

**Projet APPOLINE:**  
Biomarqueurs  
lipidiques et  
Nématodes



**UR AFPA\_INRA  
Univ. Lorraine**

Biodisponibilité des  
PCB dans les sols +  
bioaccessibilité **Thèse**



**Ecole des  
Mines. St Etienne**

**ANAPoP:** Inventaire  
floristique  
Atténuation naturelle

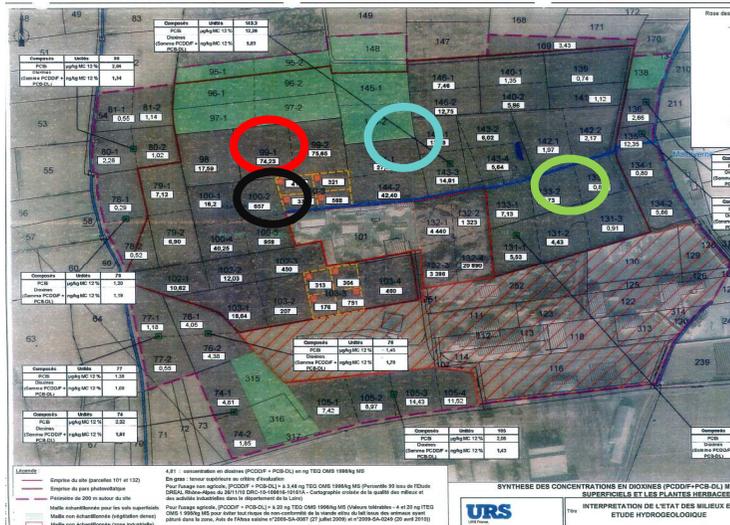
## 1. Améliorer la connaissance des transferts des PCB, PCDD/F dans la chaîne alimentaire et le réseau trophique

- > Détermination expérimentale de la capacité des PCB et PCDD/F à se transférer du milieu SOL à des végétaux consommés par l'Homme (risque sanitaire) et à des invertébrés (réseau trophique)
- > Proposition de BCF (bio concentration factor)
- >  $BCF = \frac{\text{concentration dans végétal ou invertébré}}{\text{concentration dans le sol}}$
- > Programme analytique: **6 PCBi, 12 PCB-dl, 10 PCDF, 7 PCDD**

**Total: 35  
substances**

# 1. Améliorer la connaissance des transferts

## > Site atelier : niveau de contamination dans les sols



- ✓ Ancien site industriel (démantèlement de transformateurs PCB)
- ✓ Incendie en 2008 → dispersion des PCB et PCDD/F dans l'environnement proche (pâtures)
- ✓ Texture sableuse pour les 4 mailles avec galets
- ✓ pH compris entre 4,6 (maille P3) et 6,2

### Niveau de pollution dans les sols

la	Concentration en PCDD/F+PCB-dl en ng ITEQ/kg	Concentration en PCBi en ng/kg
(P1)	2,5	3480
(P2)	36,8	34875
(P3)	77	10709
(P4)	246	30600



Valeurs pour les sols	$[PCDD/F]_{sol}$ ng I TEQ <sub>97</sub> /kg
zone rurale et urbaine < 10 ans*	1,3
zone urbaine/ind.*	4,7
AFSSA (vache allaitante/lait)**	6 à 26
Valeur Suisse***	20 (max.)

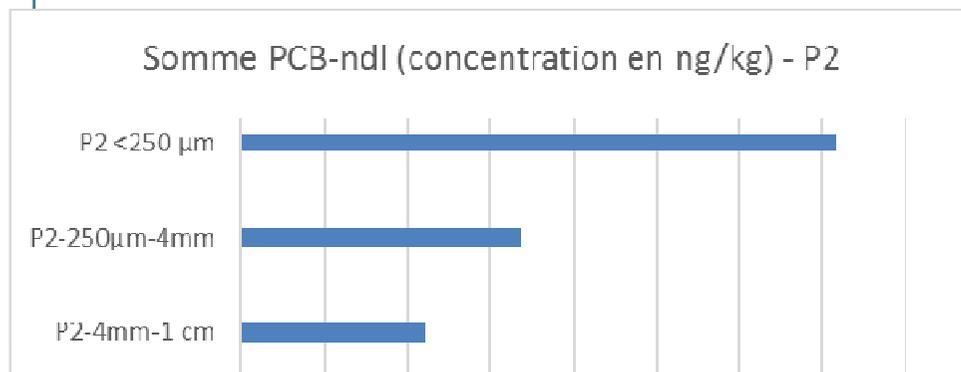
\*Valeur médiane – source BRGM (2008)

\*\* PCB-dl + PCDD/F (saisine 2009)

\*\*\* cultures alimentaires et fourragères

## 1. Améliorer la connaissance des transferts

### > Concentrations en fonction des fractions granulométriques



**Influence pour l'évaluation des risques si voie d'exposition par ingestion de sol retenue**

**→ Procéder à l'analyse de la fraction adhérente aux**

**INERIS**

En masse pour les 4 sols:

✓ fraction < 250 µm : 5-20%

✓ fraction 250 µm-4 mm : 70%

En concentration:

✓ fraction < 250 µm : 2 à 4 fois plus élevées que les autres fractions

✓ quelle que soit la famille (PCB, PCDD/F) et le congénère

## 1. Améliorer la connaissance des transferts

- ✓ Sélection de terres impactées : 4 niveaux de contamination (P1, P2, P3, P4) → expérimentations en conditions contrôlées



- ✓ Mise en culture de végétaux couramment cultivés dans les jardins français inclus catégories :  
feuille – racine – tubercule – fruit
- ✓ Analyse des PCB et PCDD/F dans organes consommés et préparés (lavage, épluchage des carottes)

## 1. Améliorer la connaissance des transferts

- ✓ Proposition de BCF au nombre de :
- ✓ **134** pour les végétaux



Consolidation et enrichissement de la base BAPPOP  
Gamme de valeurs BCF obtenues sur 4 niveaux de contamination de sol

Trois cas de figure :

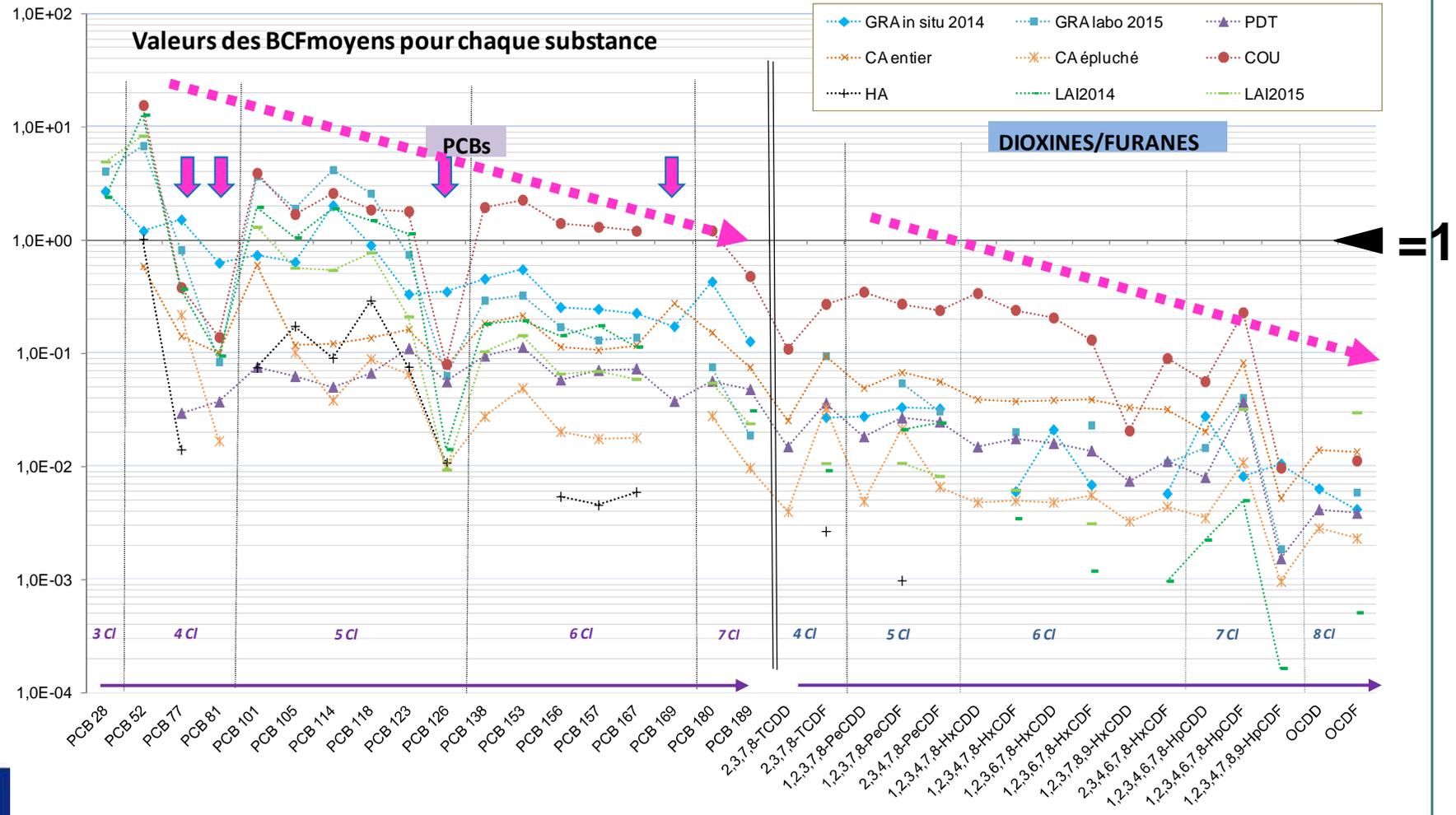
- ✓ BCF calculé dès lors que concentration sol **et** végétal  $> LQ_{\text{laboratoire}}$
- ✓ BCF estimé avec valeur de  $LQ/2$  si concentration sol **ou** végétal  $< LQ$
- ✓ BCF non déterminé si concentration sol **et** végétal  $< LQ$



Influence possible des limites de quantification (LQ) des laboratoires pour l'évaluation des risques si **estimation** de valeurs BCF à partir des LQ (approche conservatoire du risque)

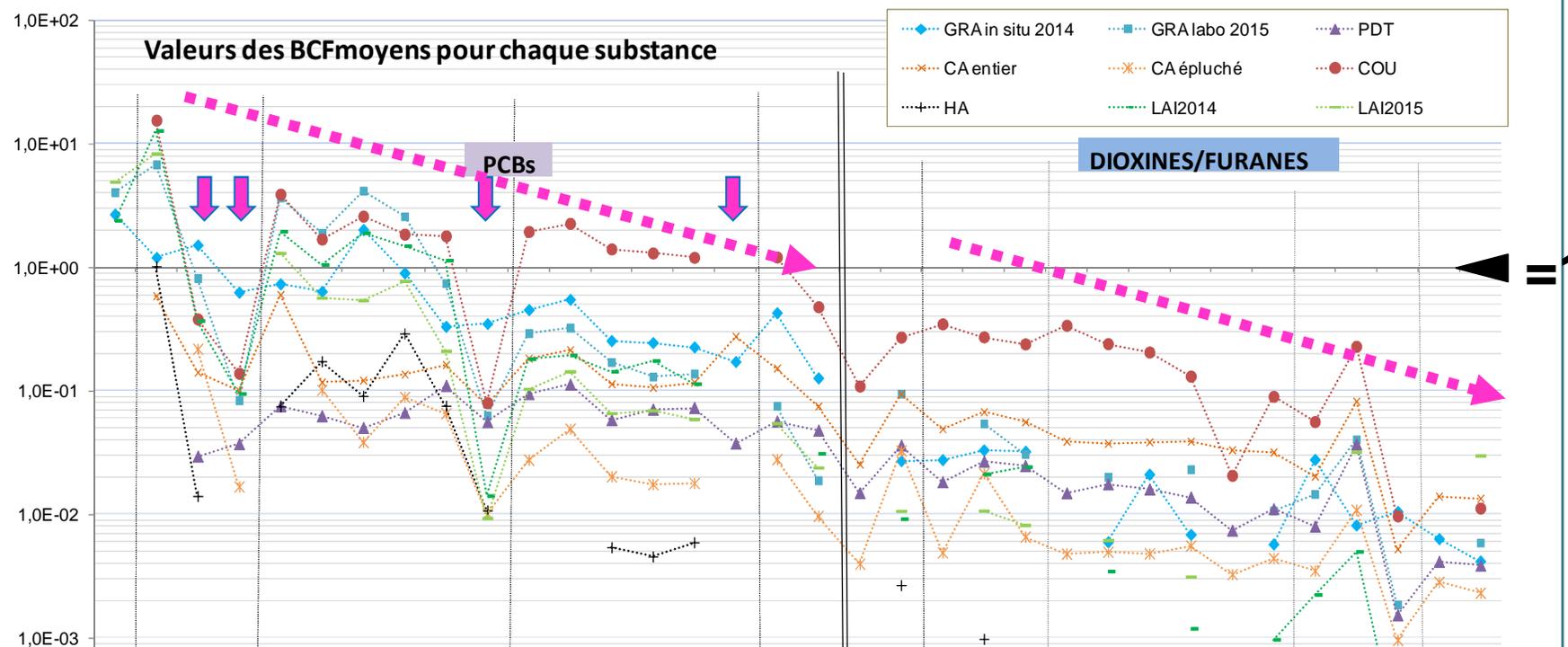
# 1. Améliorer la connaissance des transferts

✓ Valeurs BCF moyen MS pour les végétaux (moyenne P1, P2, P3, P4):



# 1. Améliorer la connaissance des transferts

✓ Valeurs BCF moyen MS pour les végétaux (moyenne P1, P2, P3, P4):



## Variabilité des BCF selon:

- ✓ Famille POP chlorés :  $BCF_{PCB} \gg BCF_{PCDD/F}$  (quelques valeurs > 1)
- ✓ Végétal : courgette ++ , laitue ++ pour les PCB les plus légers (transfert gazeux)
- ✓ Degré de chloration des PCB, PCDD/F – singularité des PCB-dl coplanaires non ortho-substitués PCB77, 81, 126 et 169
- ✓ Niveau de contamination du sol (non représenté – sur P4, valeurs BCF plus faibles)

## 2. Evaluation des expositions et des risques sanitaires chez l'Homme

- ✓ Dérouler une Evaluation des Risques Sanitaires (ERS) pour apprécier la sensibilité de paramètres sur la base des BCF obtenus expérimentalement
  
- utilisation de MODUL'ERS (logiciel de modélisation multi-média pour estimer les concentrations, expositions, risques sanitaires)
- voies d'exposition retenues pour des adultes/enfants (7 classes d'âge dont 3 entre 0 et 6 ans):
  - Ingestion non intentionnelle de sol
  - Ingestion de végétaux autoproduits



**Total: 35 substances**

## 2. Evaluation exposition/risque - Homme

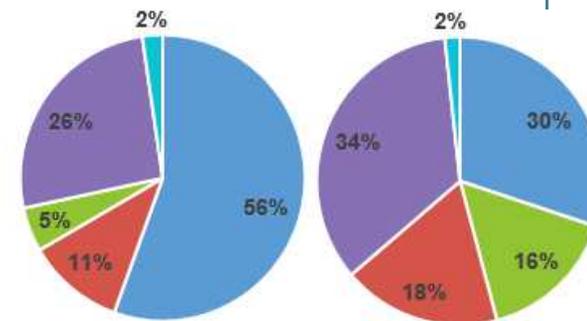
### ✓ Exposition différenciée entre PCB et PCDD/F selon l'adulte/enfant

- PCB-ndl/-dl : **fort transfert** dans les végétaux (courgette, salade – pour les PCB les plus légers) → la consommation de végétaux constitue une **voie d'exposition prépondérante**

→ toute modification des paramètres liés à l'ingestion de sol (quantité) aura une influence modérée

- PCDD/F : **faible transfert** dans les végétaux → l'ingestion de sol constitue une voie d'exposition prépondérante, notamment pour les enfants (1 à 3 ans)

→ forte influence de la quantité de sol ingérée



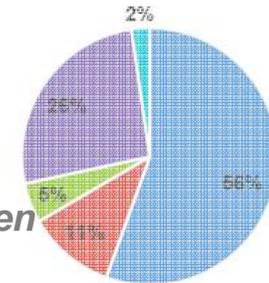
*Bol alimentaire moyen*  
Adulte - Enfant (1-3 ans)

- courgettes
- autres légumes-fruits (haricots)
- légumes-feuilles (laitues)
- légumes-racines (carottes)
- tubercules (pommes de terre)

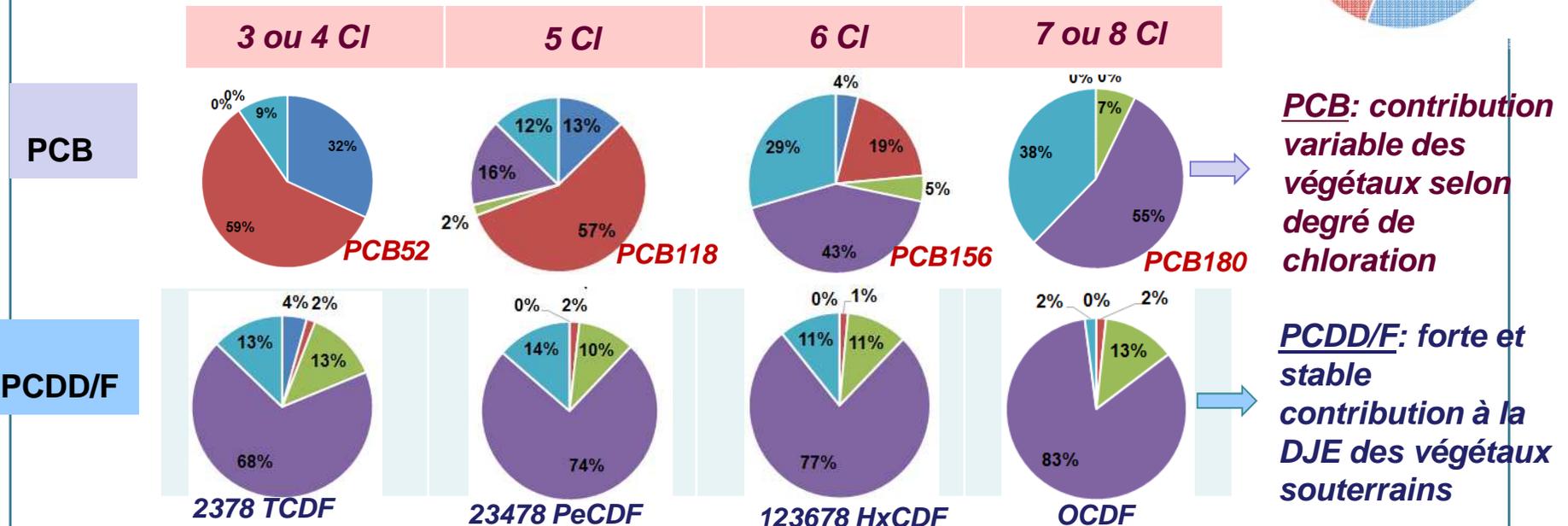
## 2. Evaluation exposition/risque - Homme

### ✓ Exposition différenciée entre PCB et PCDD/F selon l'adulte/enfant

- Exemple de contribution des végétaux à la dose journalière d'exposition DJE selon la substance et le degré de chloration – adulte sur sol P4



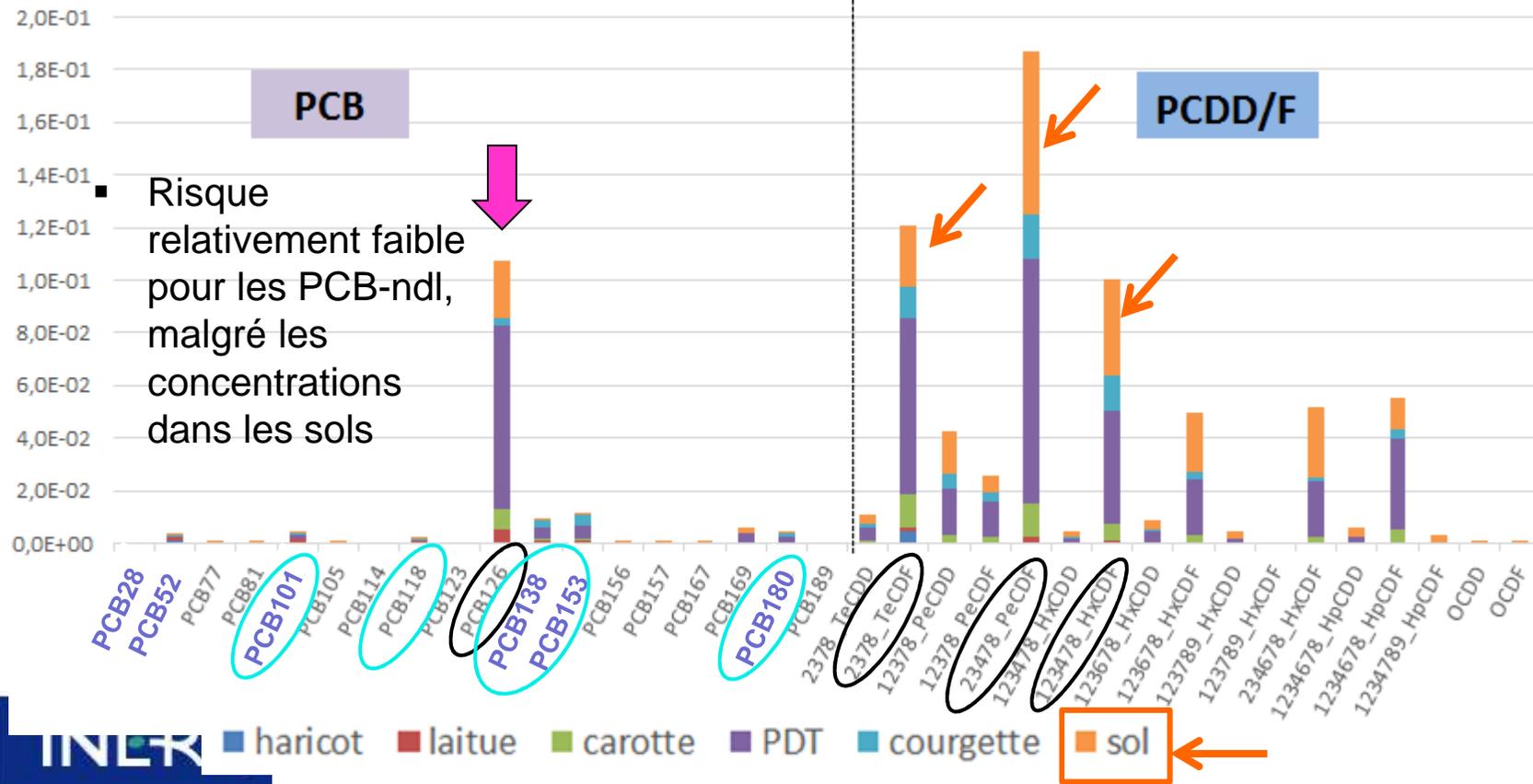
Bol alimentaire moyen



## 2. Evaluation exposition/risque - Homme

### ✓ Risques sanitaires ➤ Quotient de Danger (Adulte / sol P4)

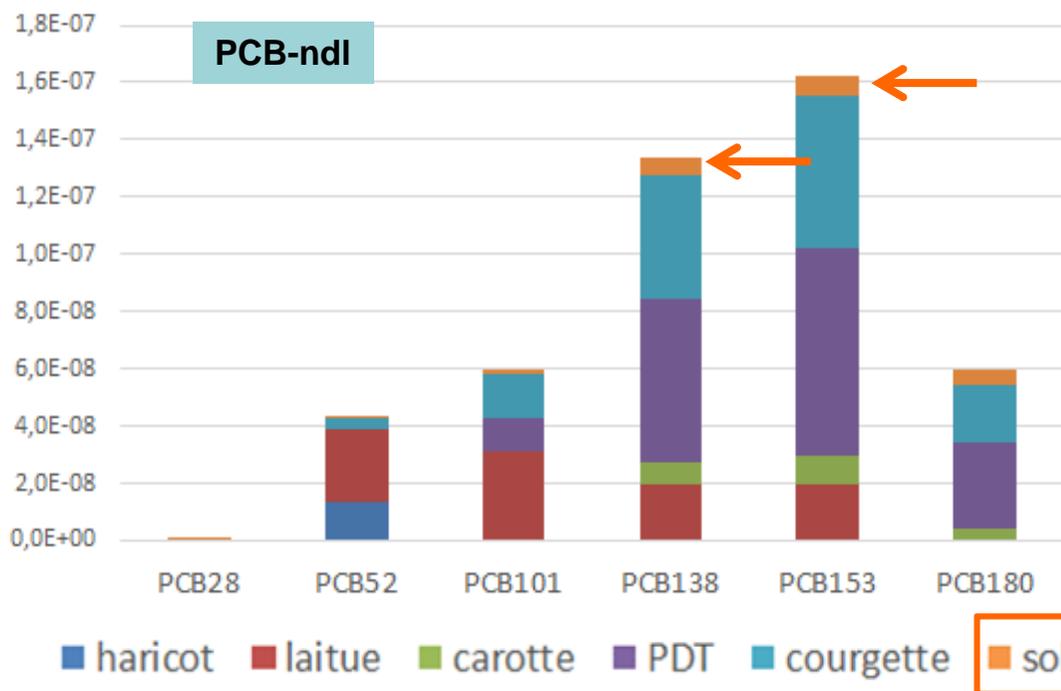
- Certaine contribution de la voie ingestion de sol dans le risque (PCDD/F)
- Risque porté par PCB126 et trois PCDF (< 7 atomes de Cl) – avec une exposition modérée mais une toxicité élevée



## 2. Evaluation exposition/risque - Homme

✓ **Risques sanitaires** ➤ Excès de Risque Individuel (Adulte / sol P4)

Pour les PCB-dl et PCDD/F, pas de VTR sans seuil prise en compte.



- Risque linéaire à la dose d'exposition pour les PCB-ndl et aux concentrations initiales dans les sols
- Faible contribution de l'ingestion de sol dans le risque global
- Risque en lien avec leur fort transfert dans les végétaux consommés

## 2. Evaluation exposition/risque - Homme

### ✓ Risques sanitaires

- **faiblement** portés par les PCB, présents dans les sols
- **fortement** tirés par les PCDD/F en raison des concentrations dans les sols et d'une toxicité élevée (valeurs toxicologiques de référence faibles et TEF)
- **singularité du PCB 126**, et des autres PCB-dl coplanaires non ortho-substitués (faible présence dans sols/végétaux mais toxicité élevée)

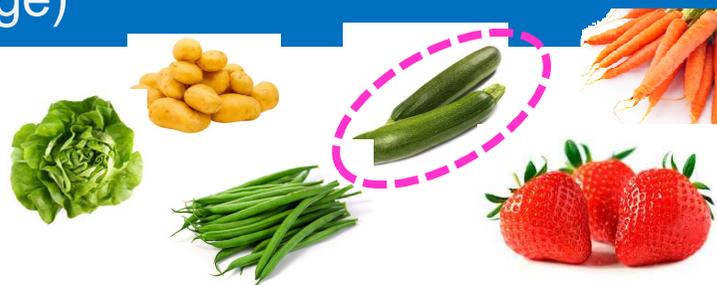


### En termes de risques sanitaires :

Ne pas considérer les PCB-dl et les PCDD/F uniquement sur la base de l'équivalent toxique (I-TEQ = donnée agrégée) → différencier les PCB-dl des PCDD/F en raison des transferts variables des congénères dans la chaîne alimentaire selon le **degré de chloration**, en vue de hiérarchiser les voies d'exposition et les congénères (POP singuliers)

## 2. Evaluation exposition/risque - Homme

- ✓ **Voies d'exposition à retenir si sol impacté par PCB et PCDD/F :**
  - Ingestion de sol et consommation de végétaux auto-produits constituent des **voies d'exposition à ne pas négliger** (même si expositions inférieures par rapport à la consommation de produits d'origine animale)
    - ...à moduler selon les concentrations initiales dans les sols
    - ...contribution aux risques différente entre PCB et PCDD/F
  - Considérer **toutes les catégories de légumes** dans le bol alimentaire pour l'évaluation des risques en raison des transferts variables selon les légumes, avec prise en compte des usages et du mode de préparation (ex: épluchage)





# Modes de transfert des PCDD/F et des PCB vers les plantes et définition de coefficients de transfert pour la modélisation

**Roseline Bonnard - INERIS**



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE



## Définition de coefficients de transfert

- **Travaux pour améliorer la pertinence des évaluations de risque et des estimations réalisées avec le logiciel MODUL'ERS**

Travail sur les données d'entrée

- Définition des coefficients de transfert des parachlorodibenzodioxines (PCDD), des paradichlorodibenzofurannes (PCDF) et des polychlorobiphényles (PCB) vers les matrices végétales et animales

## Qu'est ce que MODUL'ERS ? Pourquoi ces travaux ?

- **Outil de modélisation de l'exposition multimédia, adapté à la réalisation des évaluations prospectives de risques sanitaires effectuées dans le cadre de :**
  - des Analyses de Risques Résiduels (ARR) des sites et sols pollués
  - l'analyse des effets sur la santé des émissions des ICPE
- **Effet souvent sensible des coefficients de transfert (vers les végétaux consommés et aliments d'origine animale) sur le résultat des évaluations**
- **Variabilité et incertitude potentiellement fortes des coefficients de transfert**
- ➔ **Utilisation problématique de valeurs ponctuelles fournies sans information contextuelle**

## Qu'est ce que MODUL'ERS ? Pourquoi ces travaux ?

### **Dans le cas de MODUL'ERS,**

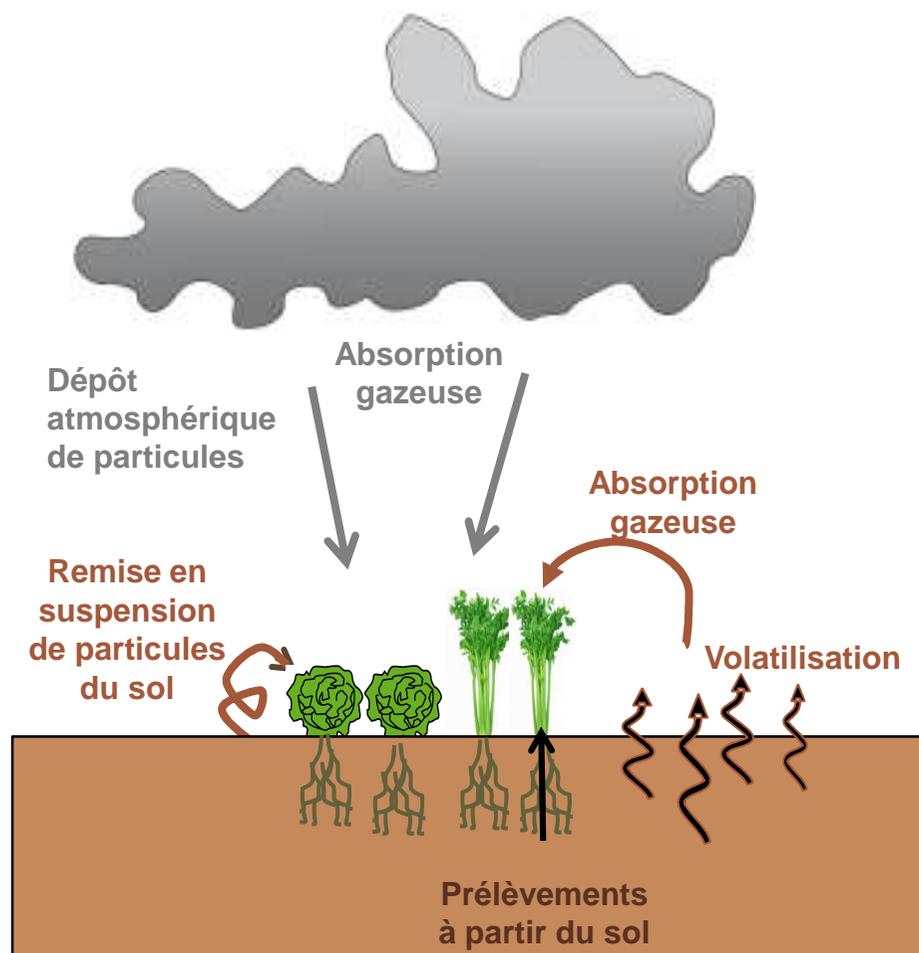
- fourniture de valeurs ponctuelles, intervalles de valeurs ou/et distributions selon le cas, avec références et éventuellement commentaires au sein du logiciel
- des rapports, joints au logiciel, présentent les données collectées, la méthode de sélection et les choix effectués pour définir ces valeurs

### **Objectif**

Si le paramètre a un effet sensible sur le résultat, permettre à l'utilisateur d'aller plus loin :

- en estimant les incertitudes
- en choisissant les données les plus appropriées, tout en connaissant leurs limites
- en recherchant des données plus appropriées (acquisition de données plus appropriées)

## Modes de contamination des végétaux



### Différents modes de contamination :

- à partir du sol
- à partir de l'air

### La part de ces différents mécanismes dans la contamination globale des végétaux varie en fonction :

- des substances,
- des conditions environnementales
- de l'espèce végétale.

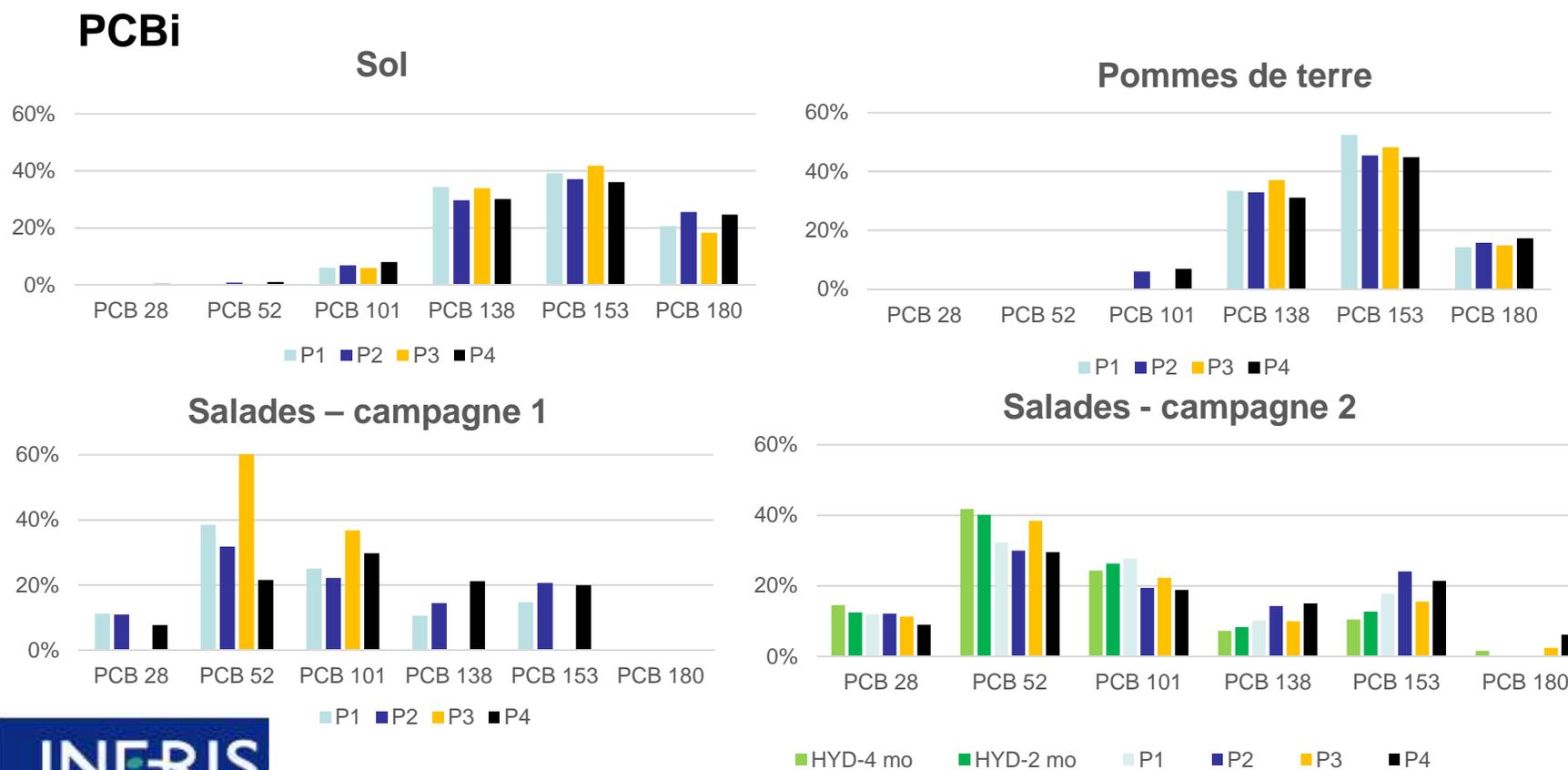
### Dans l'air

- les congénères de PCDD/F ayant plus de 4/5 atomes de chlore sont majoritairement sous forme particulaire
- les PCB sont essentiellement sous forme gazeuse

# Analyse du transfert des PCDD/F et des PCB vers les végétaux

## Mise en évidence des modes de transfert préférentiels

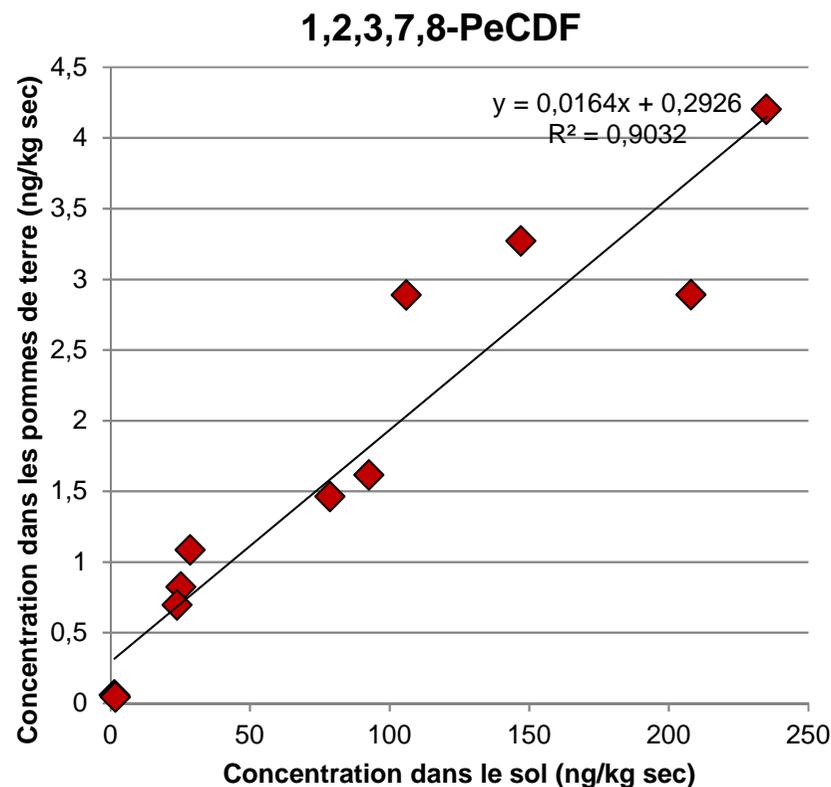
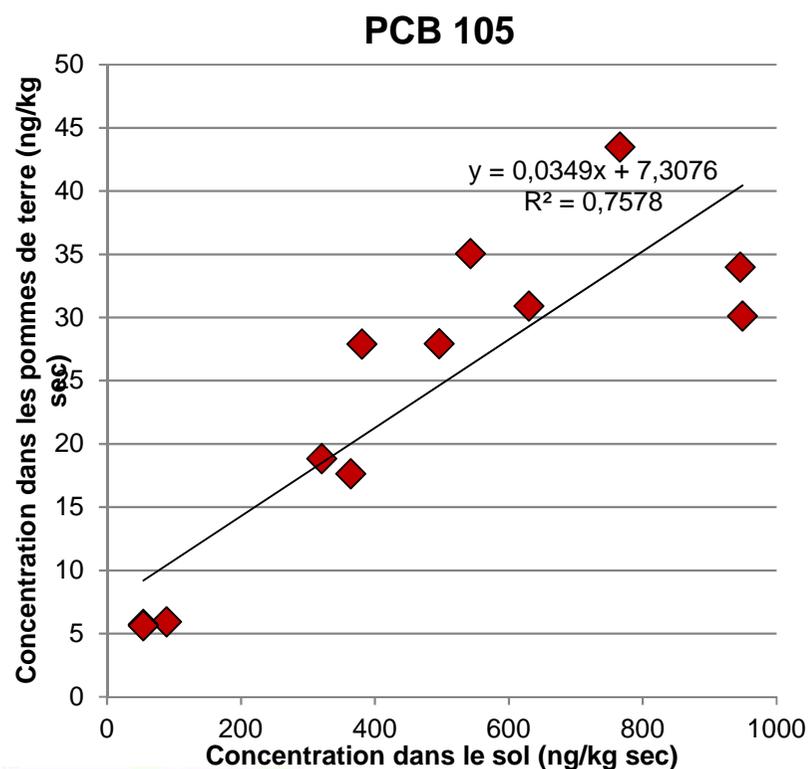
### 1. Confrontation des profils de congénères dans chaque espèce végétale à ceux obtenus pour le sol (données du projet TROPHÉ)



## Analyse du transfert des PCDD/F et des PCB vers les végétaux

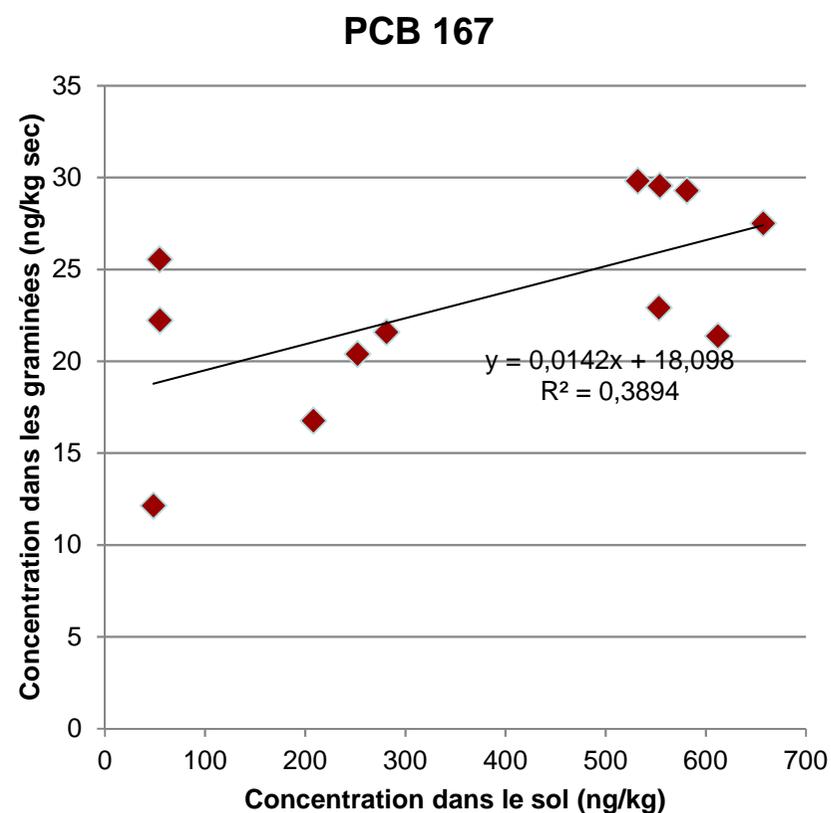
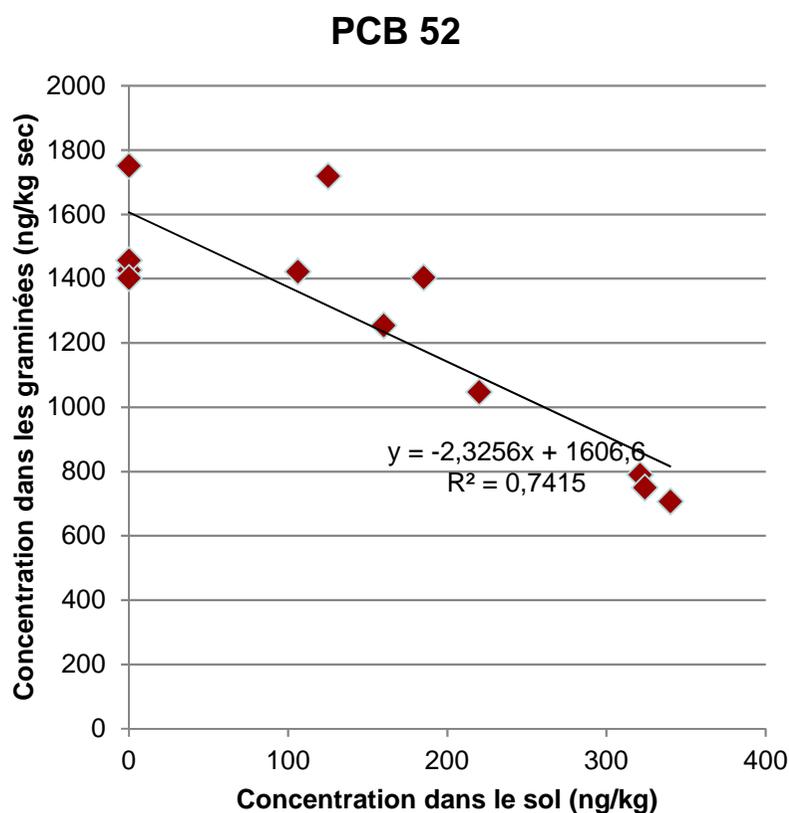
### 2. Pour chaque congénère, tracé des concentrations dans les végétaux en fonction de la concentration dans le sol (données du projet TROPHé)

Exemple pour les pommes de terre



# Analyse du transfert des PCDD/F et des PCB vers les végétaux

Exemple pour les graminées en milieu contrôlé



## Transfert des PCDD/F et des PCB du sol et de l'air vers les végétaux

- **Confrontation de l'analyse de ces graphes en accord avec les éléments d'information trouvés dans la littérature**

### **Conclusions**

#### **Pommes de terre non pelées**

- contamination liée à un transfert direct à partir du sol
- pas de transfert visible à partir de l'air

#### **Légumes-racines**

- contamination due au sol
- mais un apport par l'air existe.

#### **Graminées**

- contamination par absorption de polluants sous forme gazeuse dans l'air
- pour les cultures in-situ, un apport supplémentaire de particules issues de l'atmosphère et éventuellement de particules issues du sol .
- selon les cas (végétaux à l'équilibre avec l'atmosphère ou végétaux implantés sur un sol contaminé) et les familles de polluants, part de la contamination issue de l'atmosphère ou du sol, et celle se présentant sous une forme particulaire ou bien gazeuse varient

## Transfert des PCDD/F et des PCB du sol et de l'air vers les végétaux

### Salades

#### cultivées en enceinte fermée

- **contamination par les PCB et les furannes liée**
  - à l'absorption foliaire de polluants gazeux présents dans l'air de l'enceinte
  - aux polluants présents dans le sol. La proportion liée au sol tend à augmenter avec le nombre d'atomes de chlore
- **Pas de transfert mis en évidence pour les PCDD dans les essais en enceinte fermée**

**Mais, in situ, d'après les données de la littérature, le dépôt atmosphérique des particules joue un rôle important dans la contamination**

### Légumes-fruits

- contamination due à l'air pour les PCB les plus légers
- pour les autres molécules, transferts très limités
- sauf pour les végétaux du genre *Cucurbita* (comme la courgette et la citrouille) caractérisés par les transferts racinaires à partir du sol les plus élevés

## Définition de facteurs de bioconcentration pour les plantes

- **Définition de facteurs de bioconcentration sol-plante pour 17 congénères de PCDD/F et 17 congénères de PCB (PCB-dl et PCBi) et les différentes catégories de végétaux prédéfinies dans le logiciel**
  - À partir des pentes des droites de régression
  - À partir des rapports de concentrations dans la plante ( $C_p$ ) et dans le sol ( $C_s$ ), obtenus principalement dans le projet TROPHé
- **Définition de facteurs de bioconcentration air gazeux-plante pour chaque congénère, pour le fourrage, les légumes-feuilles et les légumes-fruits**
  - À partir des données de TROPHé
  - À partir des données de la littérature
- **Mais des sources d'incertitudes importantes sur les BCF air gazeux - plante (concentrations dans l'air surestimées, part liée au dépôt atmosphérique incertaine)**

## Aller plus loin...

### > Livrables TROPHé

Livrables 1 à 6 – prochainement disponibles sur les sites [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr) et [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

### > Communications orales

- journées de l'ADEME recherche SSP (Paris, mai 2017)
- colloque international Agricultures Urbaines Durables (Toulouse – juin 2017)
- colloque international AQUACONSOIL (Lyon – juin 2017)

> **BAPPOP** (intégration des données à la prochaine mise à jour)

> **MODUL'ERS** Rapports INERIS :

« Paramètres de transfert des polychlorodibenzodioxines, polychlorodibenzofurannes et des polychlorobiphényles, utilisés pour l'évaluation de l'exposition », INERIS-DRC-16-159776-09593A

« Coefficients de transfert des éléments traces métalliques vers les plantes, utilisés pour l'évaluation de l'exposition », INERIS-DRC-17-163615-01452A



## Perspectives 2018-2019

### > Démarrage du Groupe de Travail « GT *VEGETAUX* »

- Matrices concernées : végétaux consommables
- Contexte de l'évaluation des risques sanitaires

### > Objectifs

- Recenser les pratiques de préparation des végétaux avant analyse chimique (lavage, épluchage...) et les limites de quantification atteintes
- Harmoniser les pratiques sur le territoire national en concertation avec les laboratoires d'analyse environnementale

### > Pilotage : INERIS

*Journée technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sols pollués - 2017*



**Merci  
de votre attention**

