

# Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé



**Dr. Frank KARG / CEO (PDG) HPC INTERNATIONAL SAS / France**

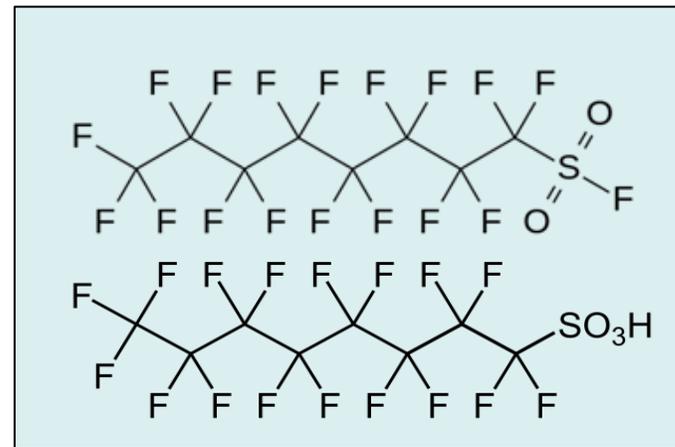
Scientific Director of HPC-Group International

Tél : +33 (0) 607 346 916, Email : [frank.karg@hpc-international.com](mailto:frank.karg@hpc-international.com)

## Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé

Dr. (es. Sc.) Frank Karg / Scientific Director of HPC-Group (INOGEN JV) and  
CEO-President of HPC INTERNATIONAL / France, Germany, Suisse, Hungary, Balkan, etc.

Email: [frank.karg@hpc-international.com](mailto:frank.karg@hpc-international.com) / Tél: +33 607 346 916



## PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ? : Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Toxicologie & écotoxicologie
5. Contexte réglementaire & Valeurs limites
6. Investigations & Evaluations des risques (ERS)
7. Traitements, Dépollution & Décontamination



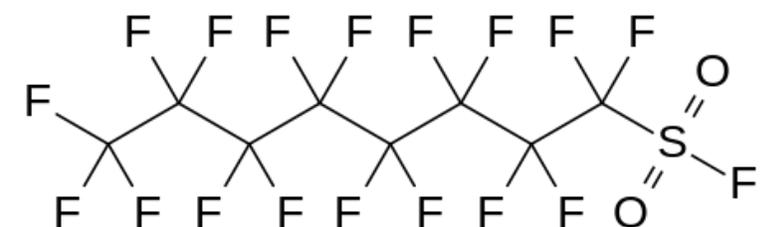
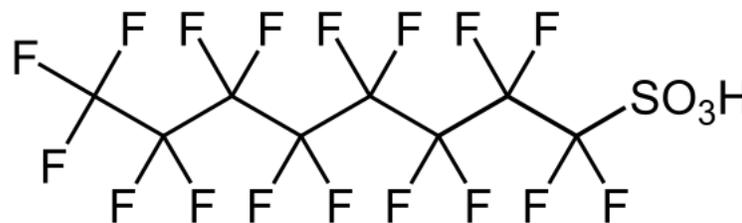
## PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ?: Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Toxicologie & écotoxicologie
5. Contexte réglementaire & Valeurs limites
6. Investigations & Evaluations des risques (ERS)
7. Traitements, Dépollution & Décontamination



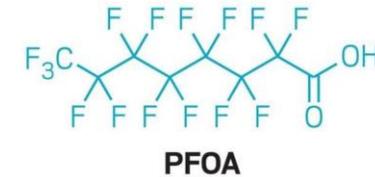
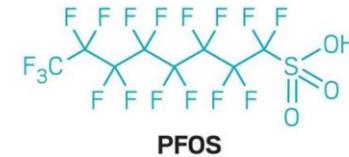
## PFAS ?

- Il existent env. **4 700 (x2 ?) substances** Per- & Polyfluor-akyles (PFAS) en produits synthétiques
- PFAS ont été fabriqués industriellement **depuis** des années **1940s**.
- **PFOA and PFOS** ont été fortement produits et étudiés. Les 2 substances sont très persistents et toxiques pour les organismes, y compris les humains.
- Quelques PFAS sont des **POP**: « Persistent Organic Pollutants » et bannis par la Convention de Stockholm, comme PFOA, PFOS & PFOSF (Perfluoro-octanonic-acid, Perfluoro-octane-sulfonic-acid & Perfluoro-octane-sulfonyl fluorine).



**PFAS comprennent une gamme diversifiée de groupes hydrophiles,**  
**→ ce qui explique leur forte solubilité:**

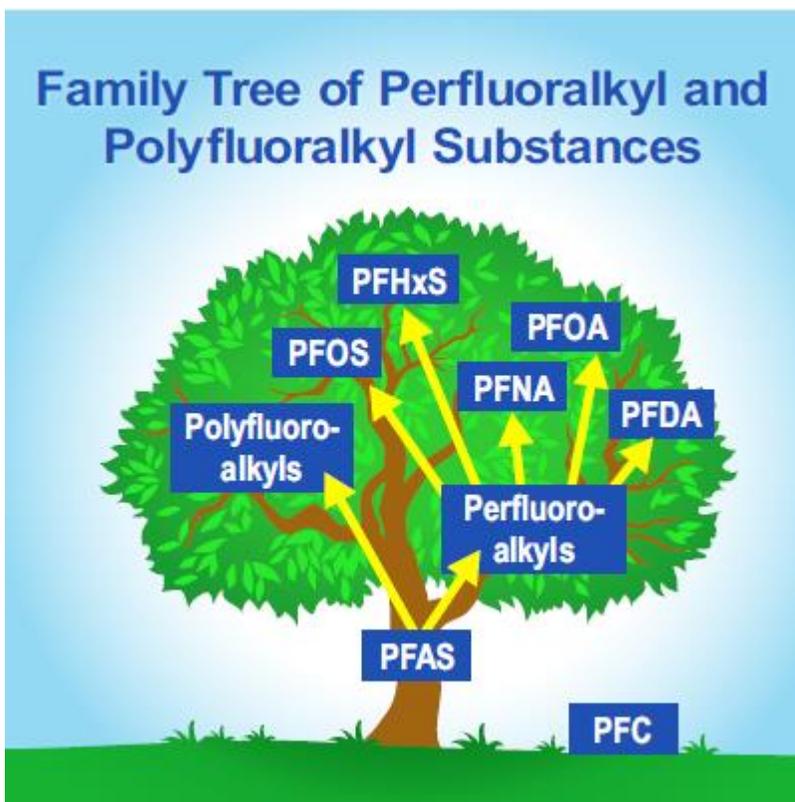
- **Non ioniques** (p. ex. polyéthylène glycols, oligomères d'acrylamide).
- **Anioniques** (p. ex., les sulfonates, les sulfates, les carboxylates et les phosphates).
- **Cationiques** (p. ex., ammonium quaternaire).
- **Amphotères** (p. ex., taines et sulfo-taines): base + acide



→ **Les produits commerciaux** contiennent principalement **des mélanges.**

→ **Les fluoro-télomères à longue chaîne (> C<sub>8</sub>)** utilisés comme substitués du PFOS (interdit) et du PFOA **sont transformés en PFOA dans le sous-sol.** Les PFAS de chaîne courte (< C<sub>6</sub>) ne peuvent pas être transformés en PFOA ou en PFOS.

## PFAS Classification:

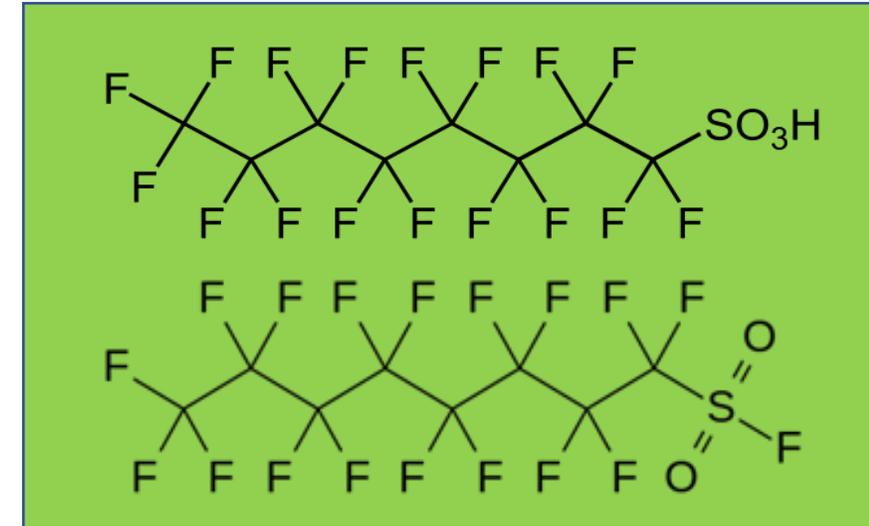


Classement et structure chimique pour les alkyls perfluorés (d'après Buck *et al.* (2011))

Classification et structure chimique		$C_nF_{2n+1}R$ , où $R =$	Exemples (n=8)
Acides alkyls perfluorés (PFAA)  <b>Acides Perfluoro alkyliques (PFAA)</b>	Acides carboxyliques alkyls perfluorés (PFCA)	COOH	PFOA (forme acide carboxylique)
	Carboxylates d'alkyls perfluorés (PFCA)	COO <sup>-</sup>	PFOA (forme carboxylate)
	Acides sulfoniques perfluoroalcanes (PFSA)	SO <sub>3</sub> H	PFOS (forme acide)
	Sulfonates de perfluoroalcanes (PFSA)	SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PFOS (forme sulfonate)
	Acides sulfiniques de perfluoroalcanes (PFSIA)	SO <sub>2</sub> H	Acide sulfinique perfluorooctane (PFOSI)
	Acides phosphoniques alkyls perfluorés (PFPA)	P(=O)(OH) <sub>2</sub>	Acide sulfonique perfluorooctyl (C8-PFPA)
	Acides phosphiniques alkyls perfluorés (PFPIA)	P(=O)(OH)(C <sub>m</sub> F <sub>2m+1</sub> )	Acide phosphinique bis(perfluorooctyl) (C8/C8-PFPIA)
Sulfonates de perfluoroalcanes fluorés (PASF)	SO <sub>2</sub> F	Sulfonate de perfluorooctane fluoré (POSF)	
<b>Sulfonates Perfluoro alkyliques (PFASu)</b>			
Sulfonamides de perfluoroalcanes (FASA)	SO <sub>2</sub> NH <sub>2</sub>	Sulfonamide de perfluorooctane (FOSA)	
<b>Sulfonamides Perfluoro alkanes (PFASa)</b>			
Perfluoroalcanoyles fluorés (PAF)	COF	Perfluorooctanoyle fluoré (POF)	
<b>Perfluoro alkanoyles (PAF)</b>			
Iodures alkyls perfluorés (PFAl)	I	Iodure hexyl-perfluoré (PFHxI)	
<b>Perfluoro alkyle iodites (PFAl)</b>			
Aldéhydes alkyls perfluorés (PFAL) et hydrates d'aldéhydes perfluorés (PFAL.H <sub>2</sub> O <sub>s</sub> )	CHO et CH(OH) <sub>2</sub>	Perfluorononanal (PFNAL)	

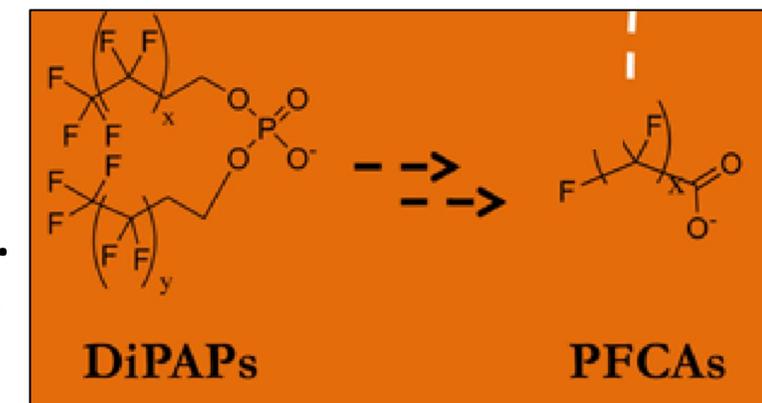
## → Tensioactifs Perfluorés :

- **PFOS** : *Perfluoro-octane-sulfonate* → →  
→ Depuis 2009 dans la « Stockholm Convention »  
Concernant les POP: « Persistants Organic Pollutants »
- **PFCA** : *Acides perfluoro-sulfoniques*:
- **PFOA** : *Acide perfluoro-octanoïque* → →
- **PFBSF** : *Perfluoro-butanesulfonyl-fluorure*
- **PFHxSF** : *Perfluoro-haxanesulfonyl-fluorure*,
- **PFOSF** : *Perfluoro-octanesulfonyl-fluorure*
- **PFDSF** : *Perfluoro-docecansulfonyl-fluorure*,



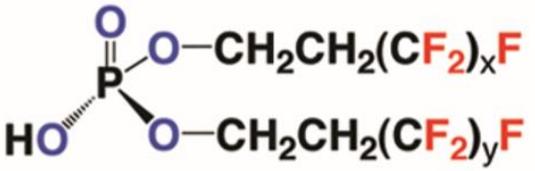
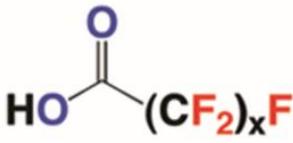
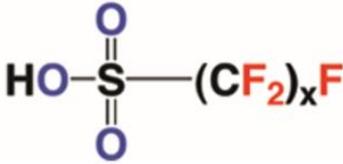
## → Tensioactifs Polyfluorés :

- **PAP** : *Acides phosphoniques polyfluoro-alkyles*  
→ interdites. Mélanges avec les Alcools fluoro-télomériques (**FTOHs**).
- **monoPAP** : mono-esters des acides phosphoniques polyfluoro-alkyles
- **diPAP** : *di-esters des acides phosphoniques polyfluoro-alkyles !!!*
- **triPAP** : tri-esters des acides phosphoniques polyfluoro-alkyles.



Selon: H. Lee et al. 2013

→ **PAP (Di-esters d'acide polyfluoro-alkyl-phosphorique) & Structures PFAS:**

Structure	Congeners Monitored	Acronym
	<p>8 congeners  <math>x = 4, 6, 8 \text{ or } 10</math>  <math>y = x \text{ or } x+2</math></p>	<p>If <math>y=x</math>  <math>x:2</math> diPAP                      If <math>y=x+2</math>  <math>x:2/y:2</math> diPAP</p>
	<p>4 congeners  <math>x = 8-11</math></p>	<p>PFOA, PFNA,                      PFDA, PFUnA</p>
	<p>1 congener  <math>x = 8</math></p>	<p>PFOS</p>

Selon: D'Eon et al. 2009

# Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé

**Min:  
33  
Catégories**

1. **Acides Perfluoroalkane-sulfonique (PFASs),**
2. Perfluoroalkane-sulfonates (sels),
3. Perfluoroalkane-sulfonique-acide/sulfonates,
4. Perfluoro-cycloalkane-sulfonique-acide et dérivés,
5. Perfluoroalkane-sulfonamides (FASAs),
6. Perfluoroalkane-sulfonamide, sels d'ammonium quaternaire,
7. Acrylate de perfluoroalkane-sulfonamide (MeFASACs),
8. Méthacrylates de perfluoroalkane-sulfonamide,
9. Perfluoroalkane-sulfonamide phosphates,
10. Halogénures de perfluoroalkane-sulfonyl,
11. Autres composés polyfluoroalkyl-sulfureux,
12. **Acides perfluoroalkyliques-carboxyliques (PFCA),**
13. Sels perfluoroalkyliques-carboxyliques,
14. Perfluoroalkyliques-alcools/cétones,
15. Halogénures d'acide perfluoroalkyliques-carboxylique,
16. Perfluoroalkyliques-halogénures,
17. Perfluoroalkyliques-alkyl-éthers,
18. Perfluoroalkyliques-amines,
19. Perfluoroalkyliques-amino-acides/sels/esters,
20. **Perfluoroalkyliques-phosphates,**
21. Perfluoroalkyliques-acrylate,
22. Perfluoroalkyliques-méthacrylates,
23. Autres esters perfluoroalkyliques-carboxyliques,
24. Composés perfluoroalkyliques-hétérocycliques,
25. Perfluoroalkyliques-silane,
26. **Fluorotélomériques-alcools,**
27. Fluorotélomériques halogénures,
28. Fluorotélomériques sulfonates, chlorures de sulfonyl et sulfonamides,
29. Acrylate de fluorotélomériques,
30. Méthacrylates de fluorotélomériques,
31. Autres acrylates,
32. Fluorotélomériques phosphates,
33. Autres fluorotélomères.

**4 700 x 2 ?**

**Au total, il existe env. 4 700 (x 2 >) PFAS  
aux caractéristiques chimiques et  
physiques différentes.**

## PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ? : Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Toxicologie & écotoxicologie
5. Contexte réglementaire & Valeurs limites
6. Investigations & Evaluations des risques (ERS)
7. Traitements, Dépollution & Décontamination



## Sources des PFAS :

- **Les aliments** emballés dans des matériaux contenant des PFAS (papier & cartons glacée, plastiques...), traités avec des équipements utilisés par les PFAS ou cultivés dans un sol ou de l'eau contaminés par le PFAS.
- **Produits ménagers commerciaux**, y compris les tissus, les teintures, des produits antiadhésives (par exemple, des vernis, des cires, des peintures, des produits de nettoyage et des **mousses de lutte contre l'incendie** (surtout sur des aéroports civils et militaires, sur des sites des formations anti-incendie ou sur des sites d'accidents d'incendie).
- **Le lieu de travail**, y compris des installations de production et d'application (par exemple, chromatation, galvanisation, fabrication de produits électroniques ou huiles) qui utilisent des PFAS.
- **Sols, eaux souterraines et eau potable & Gaz du sol (FTOH)**, typiquement localisées ou associée à une installation spécifique (par exemple, fabrication, décharges, Stations d'épuration, Sites d'usages des produits anti-incendie) ou zones agricoles traitées aux boues de STEP.
- **Les organismes vivants**, y compris les poissons, les animaux et les humains, où les PFAS se bio-accumulent et persistent au fil du temps.

# Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé

## Production & Applications depuis 1960

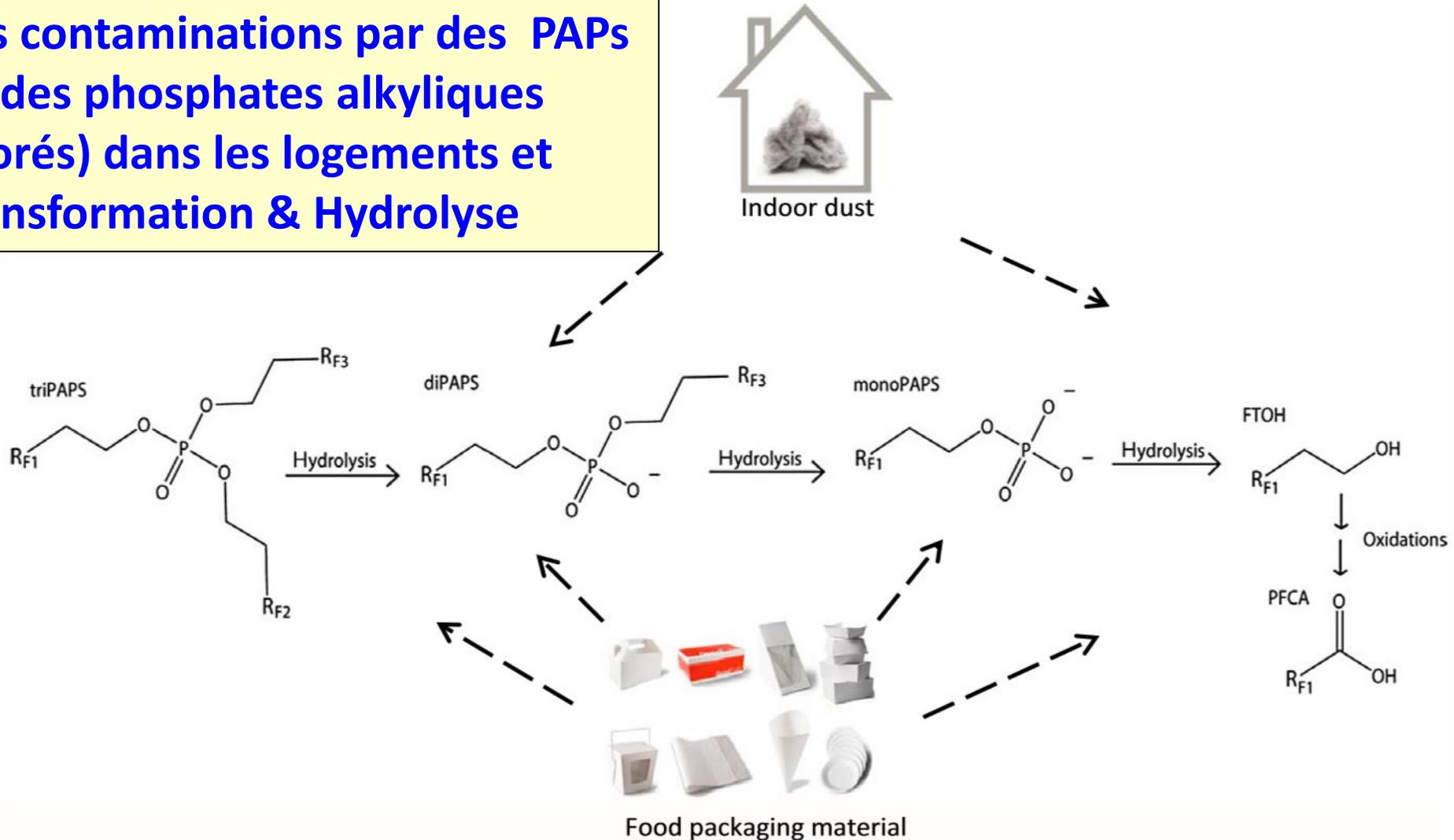
- Galvanisation
- Production des Textiles
- Food Packaging (Polymers)
- Production des Papiers & Cartons
- Raffineries, Industrie Photographique & encres
- Matériel de Construction (Bétons):  
par ex. C<sub>8</sub>-C<sub>20</sub>-gamma-omega-perfluoro Thiols)
- Peintures, Encres & Laces
- Modules électroniques & semi-conducteurs
- Huiles Hydrauliques,
- Production de Teflon (Fluoropolymères)
- Mousses anti-incendie (AFFF)
- Papiers traités en surface & Cartons....



Utilisation des PFAS (AFFF) sur  
l'ancienne Base Aérienne  
BA 103 (700 ha)



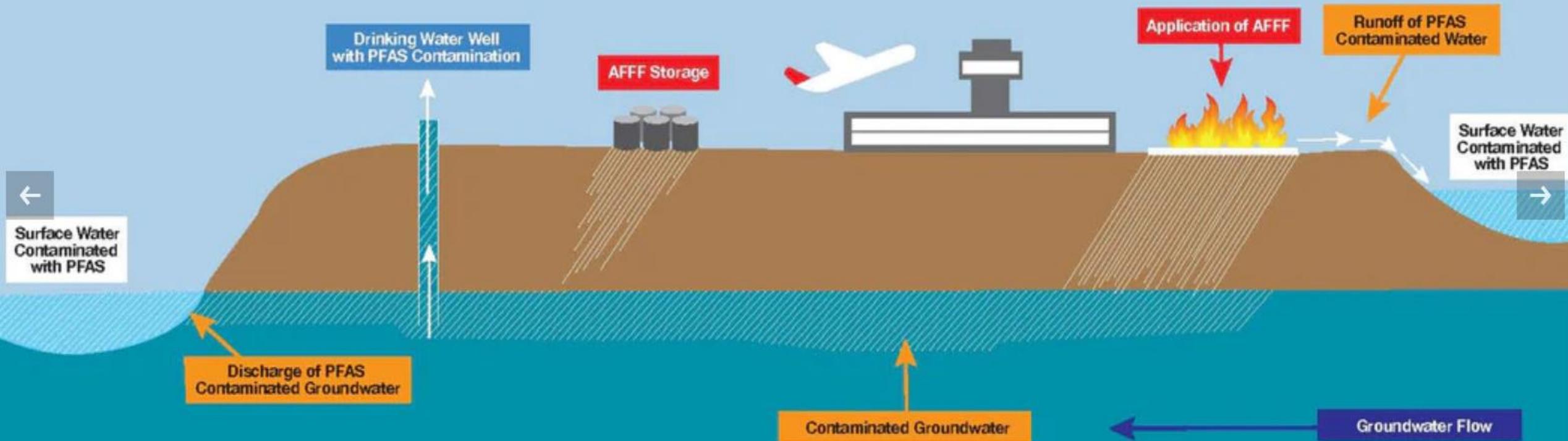
## Sources des contaminations par des PAPs (Esters des phosphates alkyliques polyfluorés) dans les logements et Biotransformation & Hydrolyse



## Utilisation des Mousses Anti Incendie (AFFF) sur les Aéroports: Anti Fire Fighting Foams

### Sources, Pathways & Receptors

### PFAS in AFFF



# Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé

**Fire Fighting Foam (AFFF) Layer of 1,2 m on German NATO Site**



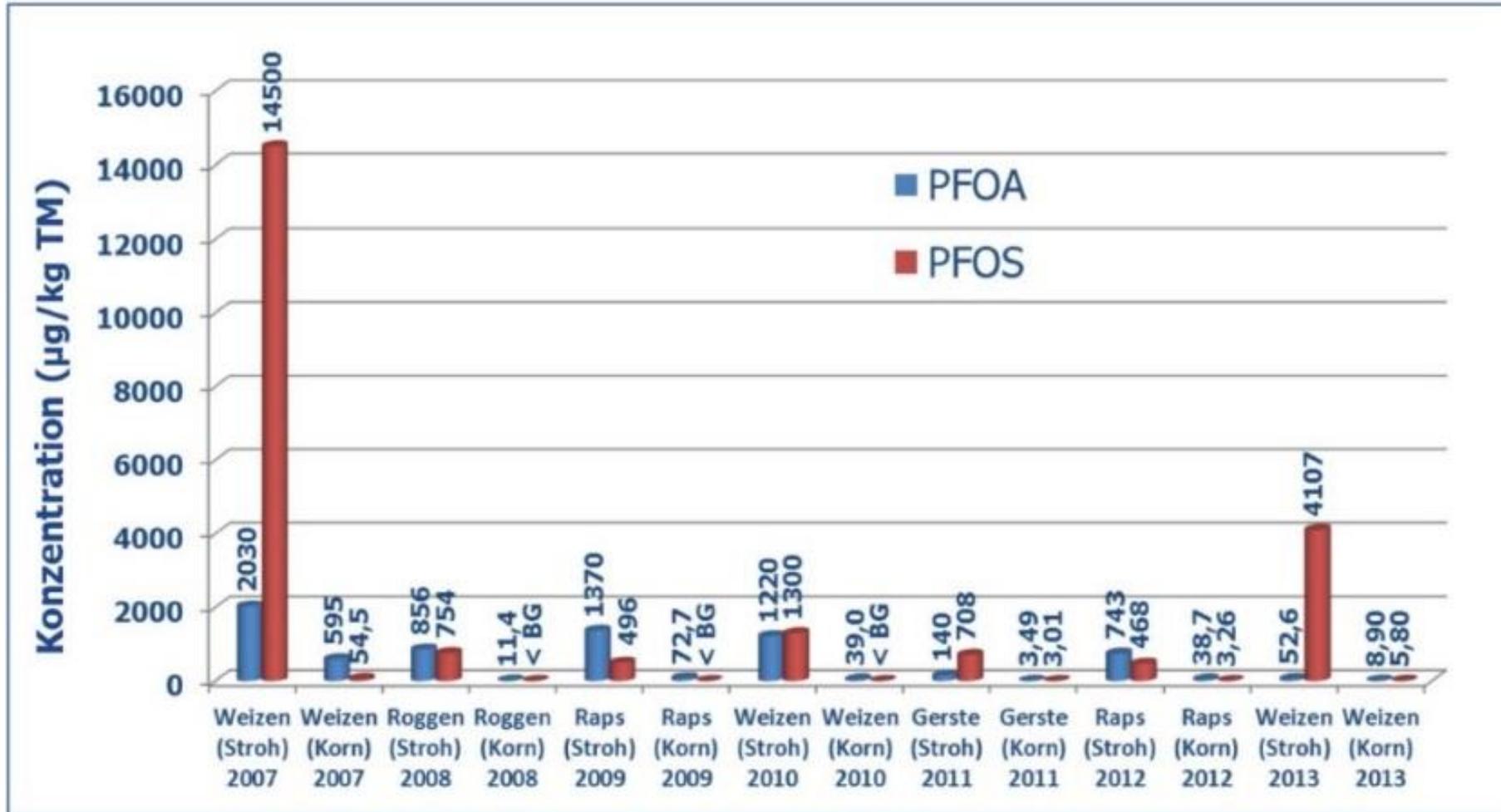
Quelle: Spiegel Online 19.11.2016 / KTVU-TV / AP

**PFAS: Pollutions des Eaux Souterraines  
à Düsseldorf**



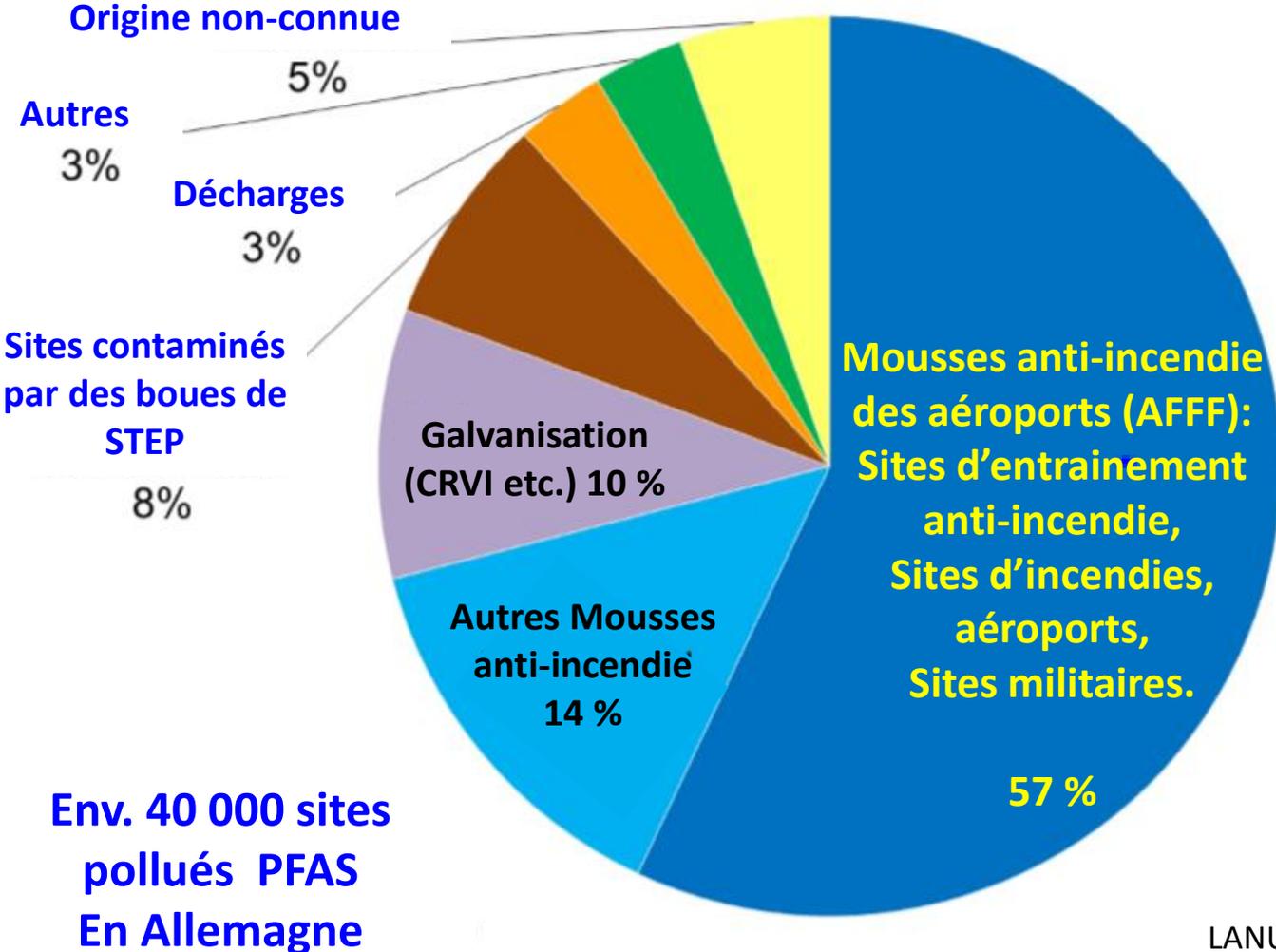
Foto: Landeshauptstadt Düsseldorf

## PFOA & PFOS dans les céréales en Allemagne

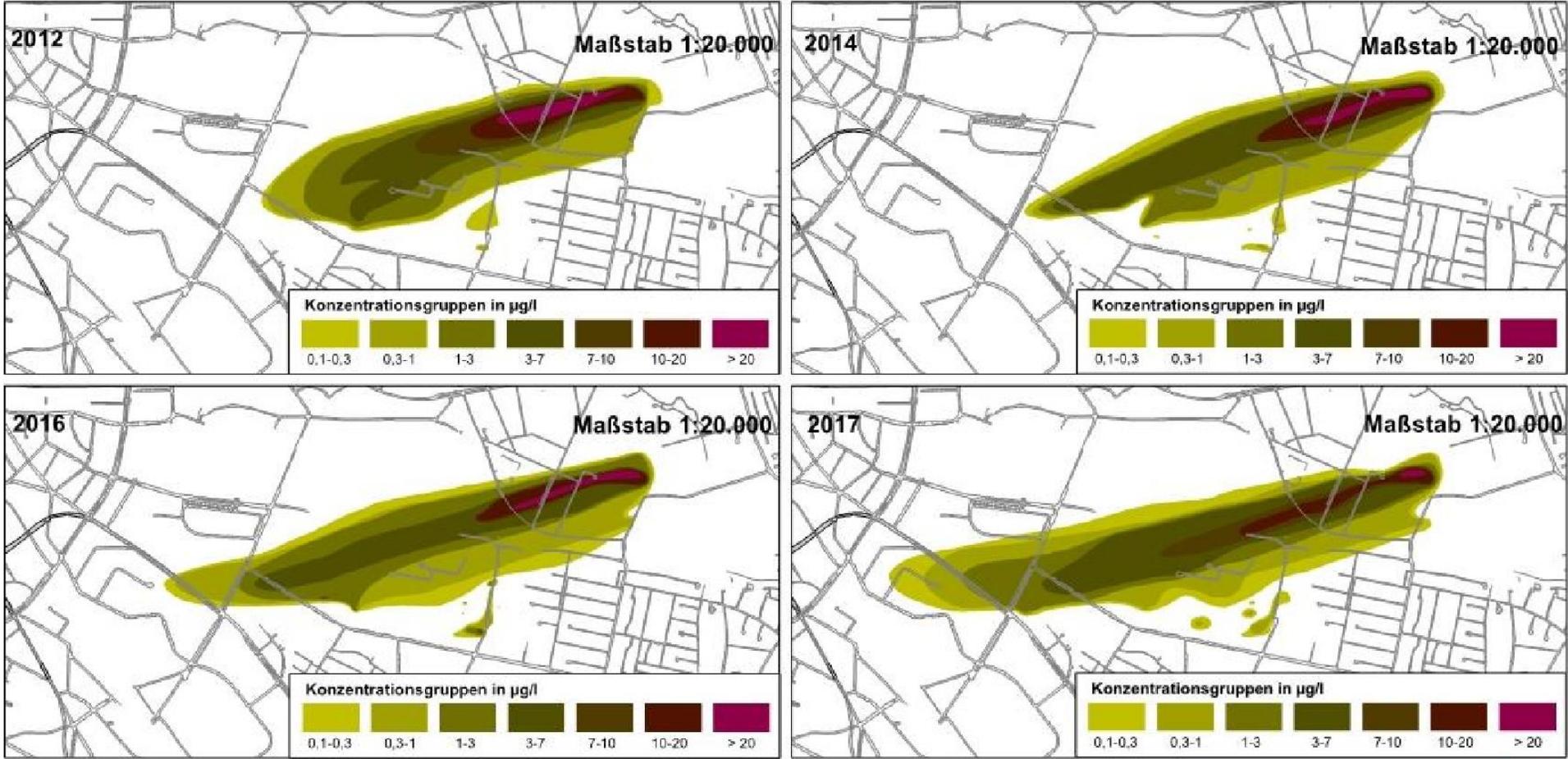


Selon: U. Achstetter et al. 2015

## PFAS in NRW / Allemagne



## PFAS dans les ESO : Düsseldorf



## Sites potentiellement pollués par les PFAS:

- Sites des entraînements anti-incendie (utilisation des mousses anti-incendie)
- Sites des incendies (utilisation des mousses anti-incendie)
- Aéroports, bases aériennes et sites militaires (à partir de 1946)
- Sites industriels de galvanisation (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des papiers et cartons « cirés » (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des textiles imperméables (à partir de 1946)
- Sites industriels de production et d'utilisation des sprays d'imperméabilisations pour textiles, cuirs, etc. (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des emballages alimentaires (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des moquettes et tapis contenant des retardateurs des flammes (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des tapisseries contenant des retardateurs des flammes (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des produits de nettoyage (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des éléments électroniques (transistors, platines électroniques, etc.) (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des pesticides et biocides (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des produits cosmétiques (à partir de 1946)
- Anciens laboratoires de la chimie photographique (à partir de 1946)
- Production et application des Teflons (PTFE, etc.), y compris pour les équipements domestiques et médicales (à partir de 1946)
- Sites industriels de production des plastiques, contenant des retardateurs des flammes (à partir de 1946)
- Sites industriels et manufactures de production des objets et meubles contenant des surfaces lisses en application des PFAS (à partir de 1946)
- Sites ayant reçus des Boues de STEP à partir des années 1950
- Sites pétrolières et de l'industrie chimique, y compris la production et l'application des peintures, des teintures, des encres, des pigments, les cires chimiques et les produits de polissage, Teintureries, Tanneries, etc.. (à partir de 1946)
- Décharges et anciennes décharges (ISDD, ISDND, ISDD, etc.).



## PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ? : Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Toxicologie & écotoxicologie
5. Contexte réglementaire & Valeurs limites
6. Investigations & Evaluations des risques (ERS)
7. Traitements, Dépollution & Décontamination



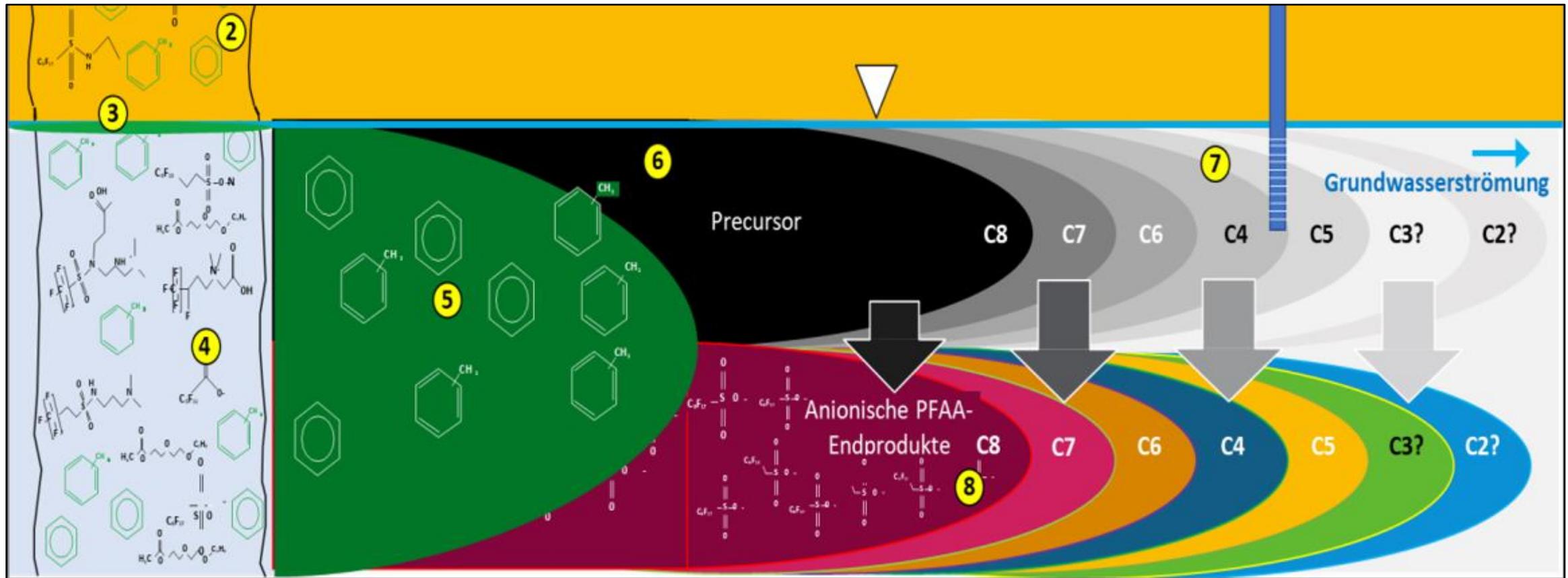
## PFAS : Chimie Environnementale



- Les produits chimiques polyfluorés non entièrement fluorés (« Précurseurs ») peuvent être convertis microbiologiquement en produits chimiques persistants et entièrement fluorés (perfluorés).
- La dégradation complète microbiologique des PFAS n'a pas encore été démontrée.
- Une distinction est faite entre les **Sources de contamination locaux** (Sites de galvanisation, sites d'extinction des incendies, etc.) et la **contamination par des PFAS à grande surface** (application agricole d'engrais, boues d'épuration, etc.).

## PFAS : Chimie environnementale

Schema de Biotransformation des PFAS polyfluorés vers des PFAS perfluorés  
(Hurst 2017 & UBA 2020)



## PFAS : Chimie Environnementale

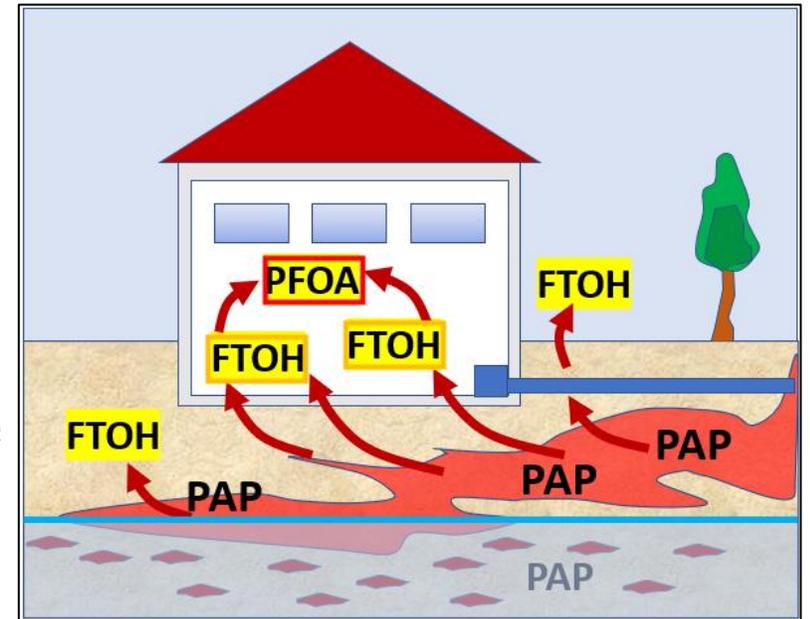
- Si les « Précurseurs" (PFAS polyfluorés) ne sont pas pris en compte par des investigations , une évaluation des risques peut conclure qu'aucun PFAS perfluoré n'est (encore) présent.
- La biotransformation des Précurseurs peut conduire à la formation de nouveaux carbones perfluorés et acides sulfoniques.
- Ces nouvelles formations issues de la biotransformation des PFAS polyfluorés doivent être prises en compte dans une analyse de situation, car les PFAS perfluorés deviennent de plus en plus présents au fil du temps.
- Une entrée de ces polluants solubles dans les eaux souterraines peut provoquer de très longs panaches de polluants qui, lors de la surveillance des eaux souterraines, montrent une présence plus forte de composés PFAS perfluorés stables.

## PFAS : Chimie Environnementale

### Mécanismes de Biotransformations des PFAS:

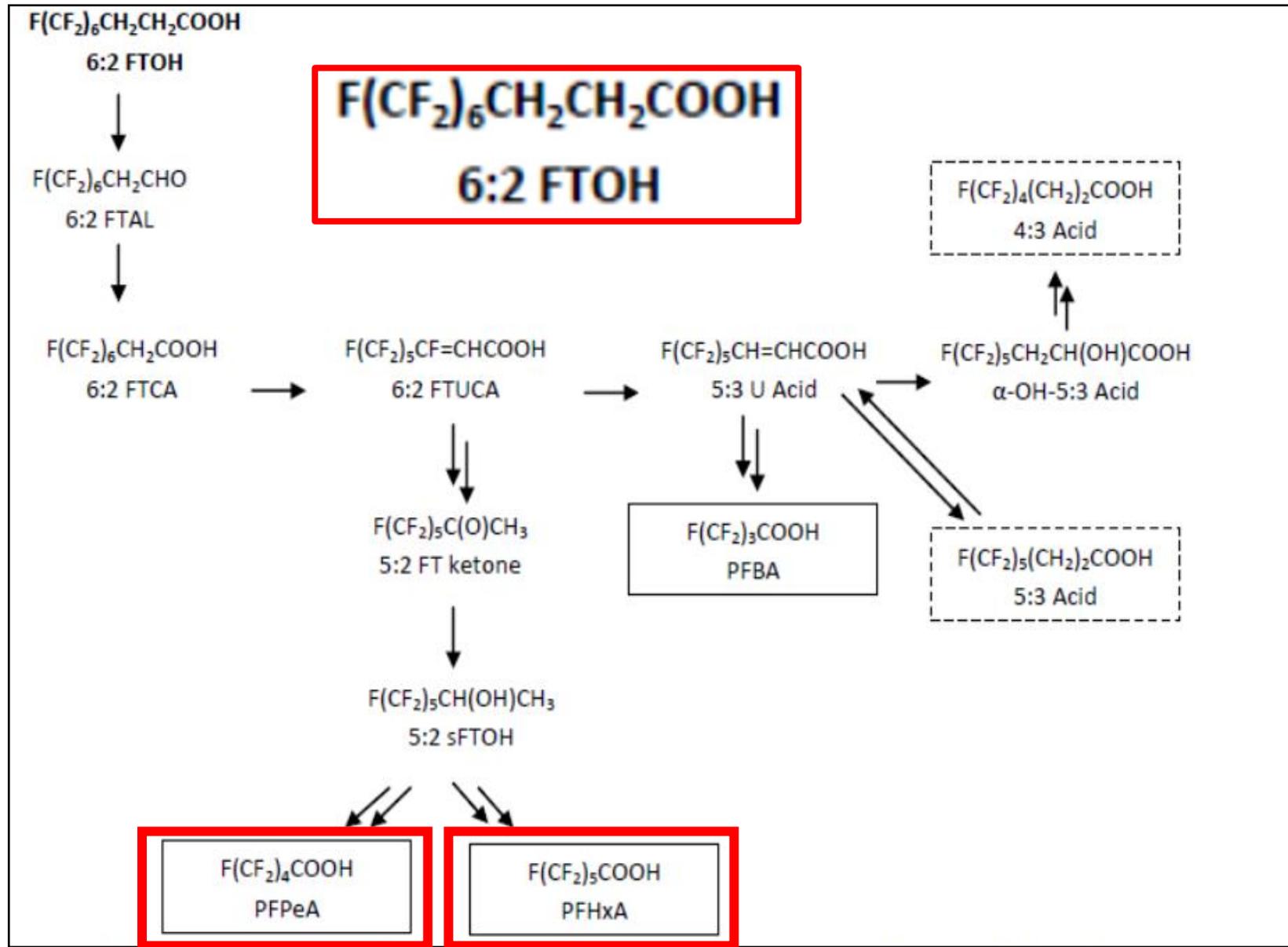
→ → par ex.: PAP → FTOH → PFOA, etc.:

- Dans les composés polyfluorés, il existe un processus de transformation fondamental dans lequel les atomes de carbone terminaux non-fluorés sont séparés.
- Cette dégradation partielle est relativement rapide. Les alkylphosphates polyfluorés (PAP), les esters d'acide carboxylique de fluortélomères, etc. peuvent être décomposés en alcools fluorotélomères volatils (FTOH), tels que le 6:2-mono-PAP & 6:2-di-PAP envers le 6:2-FTOH.
- Les FTOH sont transformés microbiologiquement en PFAS perfluorés stables. Par exemple; le 6:2-FTOH est bio-transformé en PFHpA, PFHxA et PFPeA et le 8:2-FTOH en PFHpA, PFOA et 2H-PFOA .....



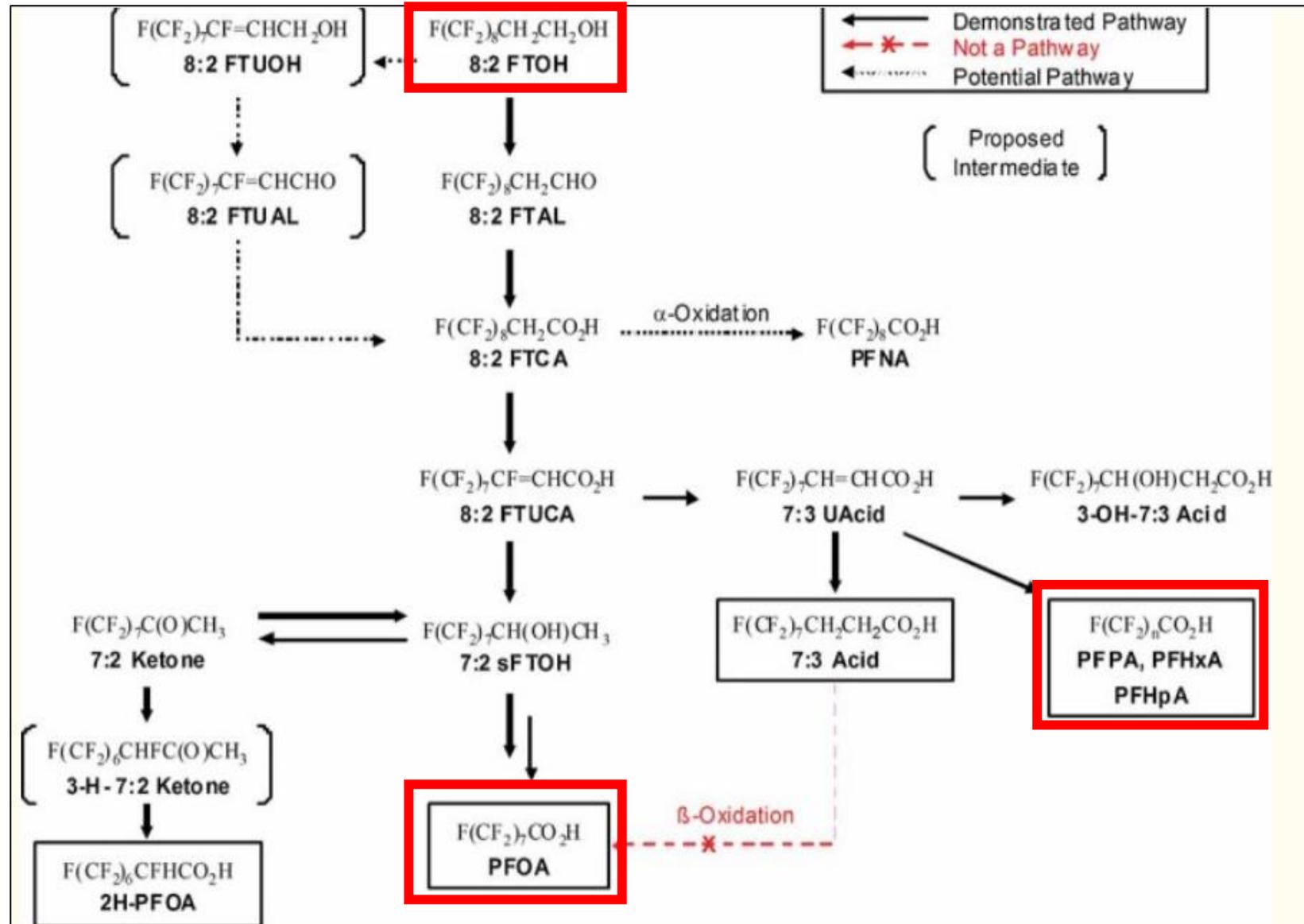
**PFAS : Chimie  
Environnementale**

**Biotransformation  
des Alcools  
Fluorotélomeres :  
6:2 FTOH  
envers  
PFHxA, PFPeA,  
PFPrA, TFA**



# PFAS : Chimie Environnementale

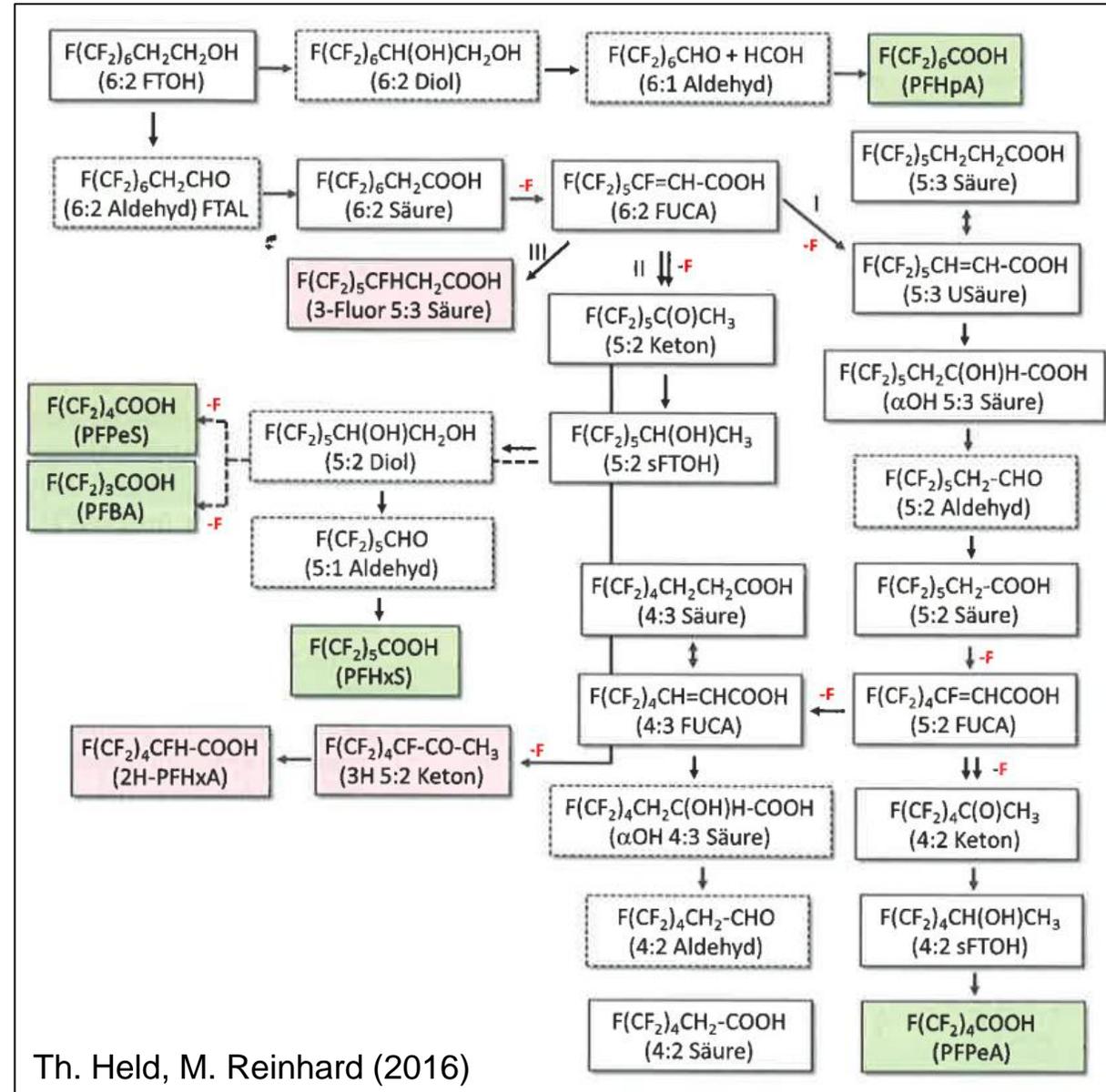
Biotransformation  
des Alcools  
Fluorotélomeres :  
8:2 FTOH  
envers  
PFOA, PFHpA, 2H-  
PFOA (& Acide 7:3)



# PFAS : Chimie Environnementale

Chemins de  
dégradatio, des  
Alcools  
Fluorotéломères

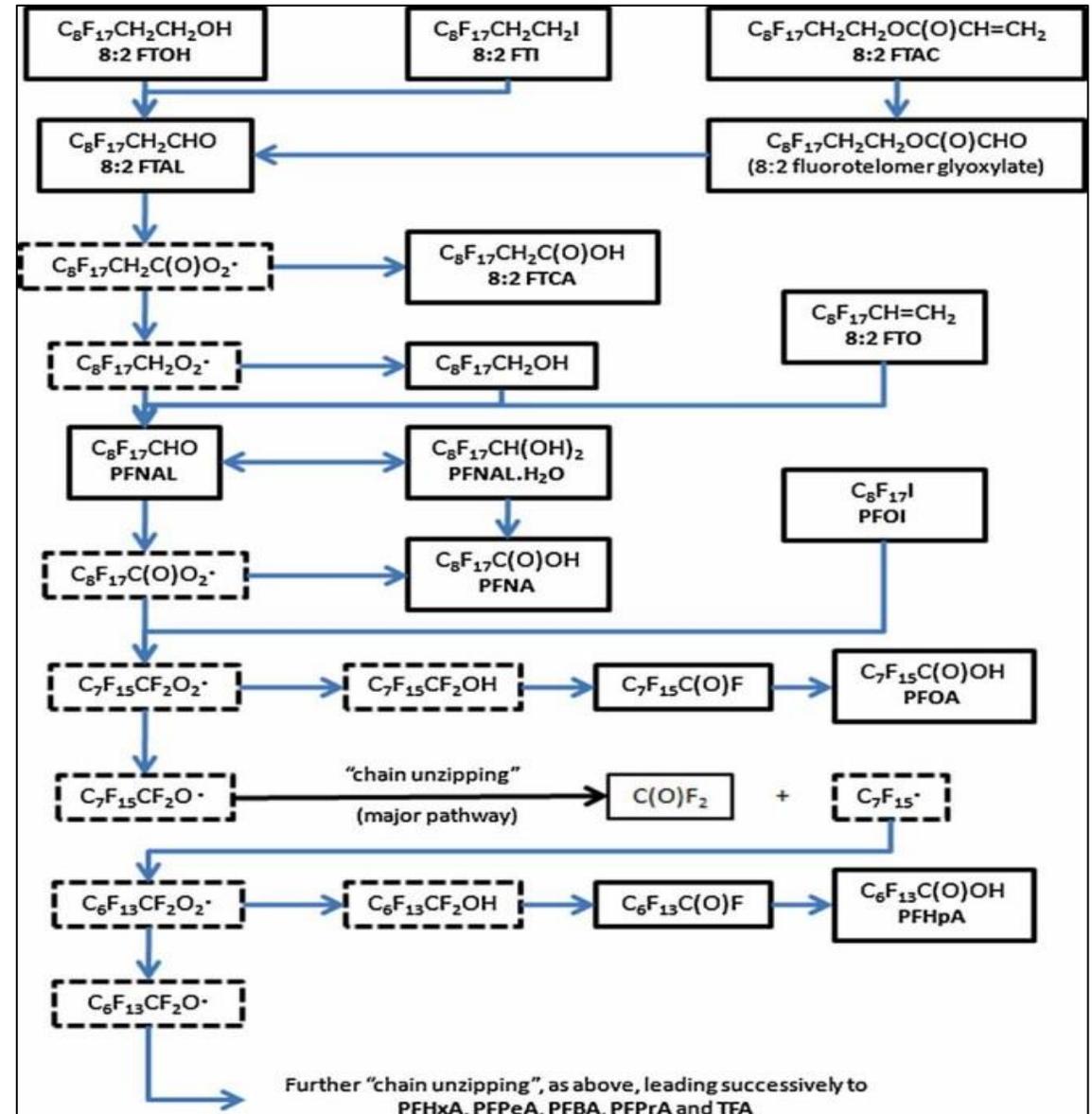
**Vert:** Produits finaux  
**-F:** Dégradation  
avec élimina-  
tion de F-



Th. Held, M. Reinhard (2016)

# PFAS : Chimie Environnementale

Continuation de la  
Biotransformation  
des Alcools  
Fluorotélobromures:  
8:2 FTOH  
envers  
PFHxA, PFPeA,  
PFPrA, TFA



PFAS :  
Chimie  
Environne-  
mentale  
U.S.

Formation de PFOA en Environnement

PFOA-related substance / substance group	Estimated volumes (tonnes/year)	Typical degradation rate (% of emitted substance transformed into PFOA per year)	Amount of PFOA <i>potentially</i> formed in the environment <sup>a</sup> (tonnes/year)
Fluorotelomer alcohols (FTOH)	100-1000	10%	10-100
Fluorotelomer derivatives	100-1000	5%	5-50
diPAP and monoPAP	?	1%	?
Polyfluorinated silanes	?	No data	?
Per- and polyfluorinated phosphonic acids	?	No data	?
Polyfluorinated iodides	100-1000	5%	5-50
Perfluorinated iodides	< 10	100% assumed	10
Polymers	100-1000	1%	10

Zhao et al. (2013)



Note: a – assuming 100% of the used amount is released to the environment as a very worst case

## PFAS (PFC, PFT):

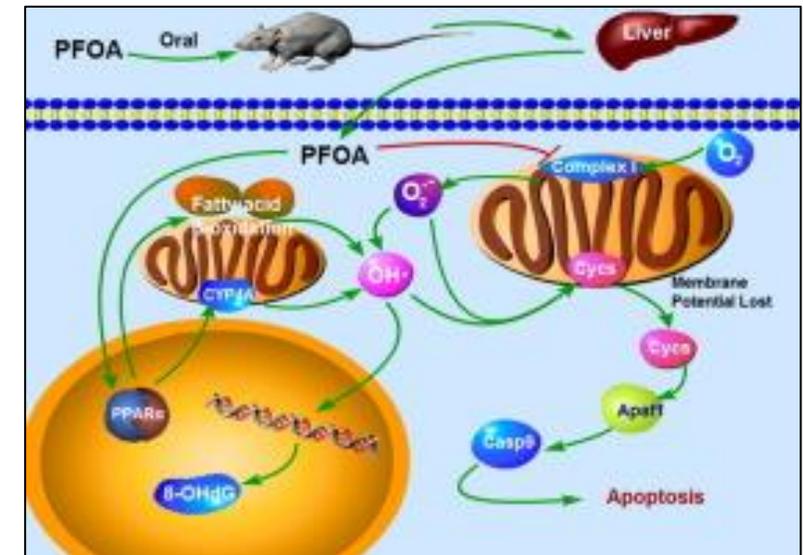
1. PFAS ? : Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Toxicologie & écotoxicologie
5. Contexte réglementaire & Valeurs limites
6. Investigations & Evaluations des risques (ERS)
7. Traitements, Dépollution & Décontamination



## Toxicologie :

Par ex. PFOA et PFOS:

- **Perturbations endocriniennes** (sur la production d'hormones stéroïde et la diminution des taux de testostérone, etc.): PFOS + FTOH (Alcools fluoro-télomériques),
- **Cancérogénicité:** Développements du Cancer des Seins & Testicules (PFOA...),
- **Tératogénicité** (par ex.: via les taux d'androgènes ou d'hormones thyroïdiennes anormaux, ...),
- **Immunotoxicité** (via des effets thyroïdiens et sur le système immunitaire, gamma-globulines),
- **Neurotoxicité** (troubles d'hyperactivité, etc.). De même que d'autres troubles neurologiques peuvent en résulter.



Molecular mechanisms of PFOA-induced Toxicity

## Caracteristiques & effets toxicologiques des PFAS:

- Très soluble,
- Très persistant,
- **Polyfluoro-AS sont transformés en vers des Perfluoro-Alkyles,**
- Bio-accumulables,
- Faible poids corporel des petites enfants,
- Immunotoxiques,
- Cancer (PFOA),
- Perturbateurs endocriniens (Thyroïde : PFOS, etc.).



The **most important** exposure route of concern is consumption of PFAS **contaminated water**.

Health effects that have been associated with exposure to PFAS in non-pregnant adults include:



Difficulty becoming pregnant



Chronic kidney disease

Cardiovascular disease



Altered liver function



Osteoarthritis



## Effets Toxicologiques des PFAS :

**Pregnant women, unborn fetus, and infants are most susceptible to adverse health effects once exposed to PFAS.**

Perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS), two common forms of long-chain PFAS, have been associated with the following



Low Birth Weight



Delayed Puberty



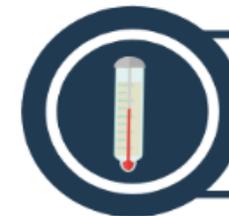
Preterm Birth



Attention deficit/  
hyperactivity  
disorder (ADHD)



Pregnancy-induced  
hypertension/ Pre-  
eclampsia



Immune  
Response  
Suppression



Effets Toxicologiques des PFAS : Résumé

	# of Carbons	Liver	Developmental	Reproductive	Immune	Hematologic	Thyroid	Neuro-behavioral	Tumors
<b>Perfluoroalkyl Carboxylates</b>									
<i>PFBA</i>	4	■	■	■	□	■	■	□	□
<i>PFPeA</i>	5	□	□	□	□	□	□	□	□
<i>PFHxA</i>	6	■	■	■	□	■	■	□	□ (Negative)
<i>PFHpA</i>	7	■	□	□	□	□	□	□	□
<i>PFOA</i>	8	■	■	■	■	■	■	■	■
<i>PFNA</i>	9	■	■	■	■	■	■	□	□
<i>PFDA</i>	10	■	■	■	■	■	■	■	□
<i>PFUnA</i>	11	■	■	□	■	□	□	□	□
<i>PFDoA</i>	12	■	■	■	■	■	□	■	□
<b>Perfluoroalkyl Sulfonates</b>									
<i>PFBS</i>	4	■	■	■	■	■	■	□	□
<i>PFHxS</i>	6	■	■	□	□	■	■	■	□
<i>PFOS</i>	8	■	■	■	■	■	■	■	■
<b>Per- &amp; Polyfluoroalkyl Ether Replacements</b>									
<i>ADONA</i>	6	■	■	□	□	■	□	□	□
<i>HFPO-DA GenX</i>	6	■	■	■	■	■	■	□	■

Effect reported in one or more laboratory animal study  
 Effect was evaluated but not found, or effect has not been evaluated

# Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé

## Valeurs de Dose – Effet / VTR: Exemple ANSES (2017): <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2015SA0105.pdf>

Tableau XVIII : Valeurs toxicologiques de référence (VTR) des PFAS retenues dans le présent avis.

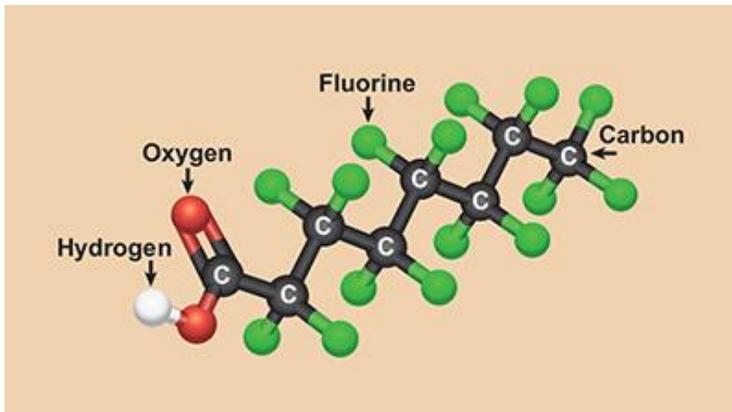
Composé	n° CAS	Effet critique	Etude clé	Voie d'administration	Point de départ	Ajustement	Facteurs d'incertitude	VTR	Références
PFOS	1763-23-1	Effets hépatiques	Chronique	Orale, alimentation	DSENO 0,021 mg/kg	PBPK 0,0015 mg/kg	25 UF <sub>A</sub> : 2,5 UF <sub>H</sub> : 10	0,06 µg/kg	Butenhoff <i>et al.</i> (2012b) Santé Canada (2016b)
PFOA	335-67-1	Effets hépatiques	Chronique	Orale, alimentation	DSENO 0,06 mg/kg	PBPK 0,000625 mg/kg	25 UF <sub>A</sub> : 2,5 UF <sub>H</sub> : 10	0,025 µg/kg	Perkins <i>et al.</i> (2004) Santé Canada (2016a)
PFBS	375-73-5	Hyperplasie tubulaire	2-génération	Orale, gavage	BMD <sub>10%</sub> L <sub>95%</sub> 24 mg/kg	Allométrique BMD <sub>10%</sub> L <sub>95%</sub> HED 6,06 mg/kg	75 UF <sub>A</sub> : 2,5 UF <sub>H</sub> : 10 UF <sub>S</sub> : 3	0,08 mg/kg	Lieder P.H. <i>et al.</i> (2009a)
PFBA	375-22-4	Effets hépatiques	Subchronique	Orale, gavage	DSENO 6 mg/kg	Allométrique NOAEL <sub>HED</sub> 1,764 mg/kg	75 UF <sub>A</sub> : 2,5 UF <sub>H</sub> : 10 UF <sub>S</sub> : 3	0,024 mg/kg (VTi <sup>16</sup> )	Butenhoff <i>et al.</i> (2012a)
PFHxS	355-46-4	Effets hépatiques	OCDE 422	Orale, gavage	DSENO 1 mg/kg	Allométrique NOAEL <sub>HED</sub> 0,289 mg/kg	75 UF <sub>A</sub> : 2,5 UF <sub>H</sub> : 10 UF <sub>S</sub> : 3	0,004 mg/kg (VTi)	Butenhoff <i>et al.</i> (2009a)
PFHxA	307-24-4	Effets rénaux	Chronique	Orale, gavage	DSENO 30 mg/kg	Allométrique NOAEL <sub>HED</sub> 7,91	25 UF <sub>A</sub> : 2,5 UF <sub>H</sub> : 10	0,32 mg/kg	Klaunig <i>et al.</i> (2015)
PFPeA	2706-90-3	Read across sur la base du PFHxA - VTi							
PFHpA	375-85-9	Read across sur la base du PFOA - VTi							
6:2 FTSA	27619-97-2	Aucune donnée disponible permettant de construire une VTR chronique par voie orale							
6:2 FTAB	34455-29-3	Aucune donnée disponible permettant de construire une VTR chronique par voie orale							
8:2 FTSA	39108-34-4	Aucune donnée disponible permettant de construire une VTR chronique par voie orale							

# Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé

## VTR:

**Example: Wienecke et al. (2020):**

**RPF : Relative Potency Factors,  
Basés sur une Equivalence  
toxicologique par rapport  
au PFOA**



Per- and polyfluorinated congeners	RPF
Sulfonic acids	
PFBS	0.001
PFPeS*	$0.001 \leq \text{RPF} \leq 0.6$
PFHxS	0.6
PFHpS*	$0.6 \leq \text{RPF} \leq 2$
PFOS	2
PFDS*	2
Carboxylic acids	
PFBA	0.05
PFPeA*	$0.01 \leq \text{RPF} \leq 0.05$
PFHxA	0.01
PFHpA*	$0.01 \leq \text{RPF} \leq 1$
PFOA	1
PFNA	10
PFDA*	$4 \leq \text{RPF} \leq 10$
PFUnDA	4
PFDoDA	3
PFTriDA*	$0.3 \leq \text{RPF} \leq 3$
PFTeDA	0.3
PFHxDA	0.02
PFODA	0.02
Ether carboxylic acids	
HFPO-DA	0.06
ADONA	0.03
Telomer alcohols	
6:2 FTOH	0.02
8:2 FTOH	0.04

<sup>a</sup> RPF values using relative liver weight increase as input. RPFs are presented for 14 perfluoroalkyl acids (PFAAs) and two PFAA precursors (the telomer alcohols).

\*RPF based on read-across.

# Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé

## VTR en international (env. 170)

**ANSES:** Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (2017)

**ATSDR:** Agency for Toxic Substances and Disease Registry

**EFSA:** European Food and Safety Authority

**IRIS :** Integrated Risk Information of Substances (U.S. - EPA)

**UBA :** Umweltbundesamt (Germany)

**BfR:** Bundesinstitut für Risikobewertung (Germany)

**OEHHA :** Office of Environmental Health Hazard Assessment

**WHO:** World Health Organization

**RIVM :** Netherlands Environmental & Health Institute

**MDHHS:** Michigan Department of Health and Human Services, Division of Environmental Health

**TCEQ:** Texas Commission on Environmental Quality

**NJ-DWQIHES:** New Jersey Drinking Water Quality Institute Health Effects Subcommittee

**Wieneke et al. 2020 :** Toxicological Equivalence factors on PFOA RfD

Substance	Cancerogen / not cancerogen	Chronic toxicological value			Species	Sigle	Security Factor	Organization
		Exposure path	Target organ	Value				
PFBA	NC	oral	Hepatic	2,9 µg/kg/d	Rate	RfD	NOAEL / 2400	TCEQ 2016
		inhalation	Hepatic	10 µg/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	from oral value	TCEQ 2016
PFPeA	NC	oral	Hepatic	3,8 µg/kg/d	Rate	RfD	same than PFHxS LOAEL/(263*300)	TCEQ 2016
PFHxA	NC	oral	Hepatic	3,8 µg/kg/d	Rate	RfD	same than PFHxS LOAEL/(263*300)	TCEQ 2016
PFHpA	NC	oral	Hepatic	25 ng/kg/d	Rate	DJT	Extrapolation of DJT of Health Canada	ANSES 2017
PFOA	NC	oral	Hematologic	0,86 ng/kg/d	Rate	TDI	BMDL5	UBA 2020 BfR & EFSA 2018
			Hepatic, Mammar, Hematologic	12 ng/kg/d	Mice	RfD	LOAEL (81*100)	TECQ 2016
	inhalation	Hepatic	4,1 ng/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	NOAEL / (81*3000)	TCEQ 2016	
	C	oral	Testicular tumors	2,52 (mg/kg/d) <sup>-1</sup>	Epidemio	SF	-	New Jersey 2017
PFNA	NC	oral	Hematologic	2,5 ng/kg/d	Mouse	RfD	NOAEL / 300	EPA IRIS 2019 New Hampsire DES 2019
		inhalation	Lung, respiratory system	28 ng/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	NOAEL / (81*30 000)	EPA IRIS 2019 TCEQ 2018
PFDA	NC	oral	Hepatic	15 ng/kg/d	Rate	RfD	NOAEL / (81*1000)	TCEQ 2016
		inhalation		53 ng/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	from oral value	TCEQ 2016
PFBS	NC	oral	Hematologic and renal	1,4 µg/kg/d	Rate	RfD	NOAEL / (142*300)	TCEQ 2016
		inhalation		4,9 µg/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	from oral value	TCEQ 2016
PFHxS	NC	oral	Hematologic and thyroidal	3,8 µg/kg/d	Rate	RfD	LOAEL / (263*300)	TCEQ 2016
		inhalation		13 ng/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	from oral value	TCEQ 2016
PFHpS	NC	oral	Hepatic	0,43 ng/kg/d	Rate	TDI	Potency Factor : 0,6-2	UBA 2020, EFSA 2018, BfR 2018
PFOS	NC	oral	Hepatic	1,86 ng/kg/d	Monkey	TDI	NOAEL	UBA 2020 BfR & EFSA 2018
		inhalation	Thyroidal, neurological and foetal development	81 ng/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	from oral value (23 ng/kg/j)	TCEQ 2016
PFOSA	NC	oral	Mammary glands	12 ng/kg/d	Mice	RfD	Same than PFOA NOAEL/(81*300)	TCEQ 2016
		inhalation		4,1 ng/m <sup>3</sup>	Rate	RfC	same than PFOA NOAEL/(81*3000)	TCEQ 2016

Exemples →

## PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ? : Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Toxicologie & écotoxicologie
5. Contexte réglementaire & Valeurs limites
6. Investigations & Evaluations des risques (ERS)
7. Traitements, Dépollution & Décontamination



## Réglementation :

- **L'US-EPA & le Canada** ont restreint l'utilisation des PFAS et de certains précurseurs de production.
- **Au sein de l'UE**, les réglementations sont différentes entre les pays, mais l'utilisation du **PFOS** a été réglementée, **seule une teneur maximale de 0,001 % ou 10 mg/kg est autorisée** [Commission Regulation (EU) No. 757/2010 amending Regulation (EC) No. 850/2004], sauf dans les AFFF (3 %).
- **Plusieurs pays en UE (D, NL, S):** Lignes directrices sur **l'eau potable** et des **sols** ou les réglementations pour **les eaux souterraines** pour un ou plusieurs composés PFAS.
- **VTR: Une Dose hebdomadaire tolérable (DHT) de 4,4 ng/kg/Sem. (ou Dose Journalier Tolérable de (DJT) : 0,63 ng/kg/j pour des PFAS : PFOA, PFOS, PFNA & PFHxS):** EFSA : 17/09/2020 <https://www.efsa.europa.eu/fr/news/pfas-food-efsa-assesses-risks-and-sets-tolerable-intake>
- **La Directive (UE) 2013/39/UE** cadre sur l'eau européenne (DCE), fixe pour le **PFOS & dérivés** (et pour d'autres substances prioritaires) une Normes de Qualité Environnementale (NQE-MA) de **0,65 ng/l pour les Eaux superficielles** et **0,13 ng/l pour les Eaux du milieu marin** (et des NQE-CMA: Concentrations Maximales Admissibles)
- L'UE envisage également des réglementations strictes concernant le PFOA, qui peuvent également inclure une **interdiction de la plupart des produits** contenant des PFAS.
- **En Allemagne** des **Valeurs limites existent pour les eaux souterraines et de l'eau potable**. De plus en plus, les réglementations régionales (Länder) exigent des investigations et des dépollutions systématiques de **sites contaminés** et la dépollution des eaux souterraines ( jusqu'à **0,06 µg/l en PFNA**).



## Valeurs limites : Exemple : ESO & Eau potable en Allemagne

N°	Polluant PFC / PFT	Syn.	Eau potable [µg/l]	Eaux souterraines [µg/l]
1	Acide perfluoro-butanoïque	PFBA	10	-
2	Acide perfluoro-pentanoïque	PFPeA	-	3
3	Acide perfluoro-hexanoïque	PFHxA	6	-
4	Acide perfluoro-heptanoïque	PFHpA	-	0,3
5	<b>Acide perfluoro-octanoïque</b>	<b>PFOA</b>	0,1	-
6	Acide perfluoro-nonanoïque	PFNA	0,06	-
7	Acide perfluoro-decanoïque	PFDA	-	0,1
8	Acide perfluoro-butane-sulfonique	PFDA	6	-
9	Acide perfluoro-hexane-sulfonique	PFBS	0,1	-
10	Acide perfluoro-heptane-sulfonique	PFHxS	-	0,3
11	Perfluoro-octane-sulfonate	PFHpS	0,1	-
12	<b>Acide H4-polyfluoro-octane-sulfonique</b>	<b>PFOS</b>	-	0,1
13	Perfluoro-octane-sulfonamide	PFOSA	-	0,1

## PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ? : Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Toxicologie & écotoxicologie
5. Contexte réglementaire & Valeurs limites
6. Investigations & Evaluations des risques (ERS)
7. Traitements, Dépollution & Décontamination



## Investigations et évaluations des risques :

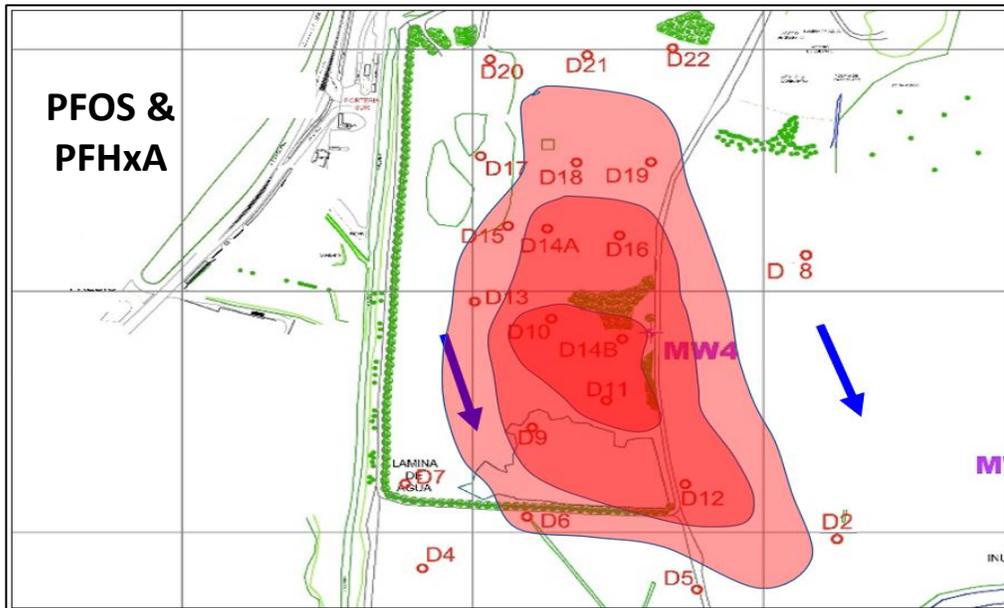
- A éviter, que certains **outils d'échantillonnage** et équipements de laboratoire puissent ajouter des PFAS à des échantillons, notamment via le poly-tétrafluoro-éthylène (PTFE),
- Il faut tenir compte de la **biotransformation** potentielle des PFAS dans l'environnement **pour en créer** davantage des PFOS persistants comme **l'PFOA en particulier**.
- Les analyses doivent être réalisées par **Chromatographie Liquide-Spectrométrie de Masse (LC-SM): DIN 38407-42**
- **Pour l'évaluation des risques**, des données toxicologiques (**VTR**) sont à chercher et à actualiser en niveau international.
- Dans le cas des **FTOH dans les Gaz du sol**, recommandation pour les investigations de **l'Air ambiant (ERP: Ecoles, Crèches, etc.)**



## Evaluation des Risques:

- **Definition des CMA: Concentrations Maximales Admissibles: ESO: Eaux souterraines**

**Exemple Site "N" en Allemagne > CMA**



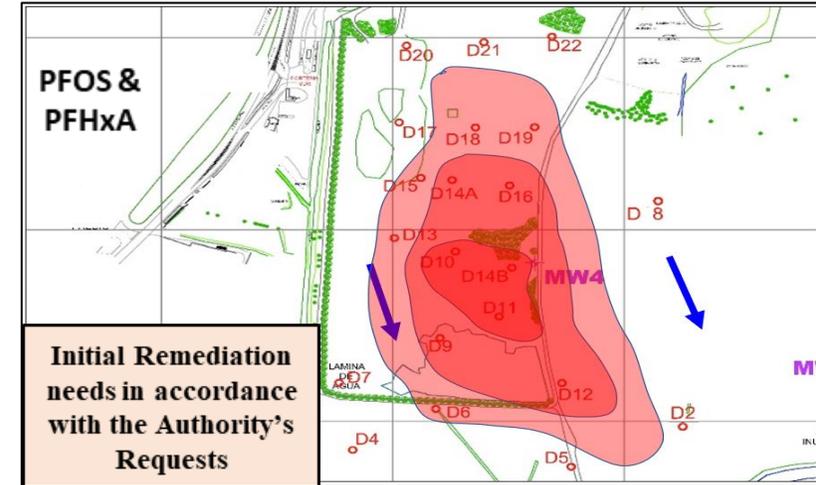
PFAS Substance	GW max. Concentration Site « N »	SS-RG: Site Specific Remediation Goals			
		Residential without GW use	Residential GW use for green space	Residential GW use for individual gardens	GW use in Gardens and bathing
	Exposure Pathways →	Inhalation of PFAS with Water Vapors	Inhalation of PFAS with Water Vapors & Skin contact	Inhalation of PFAS with Water Vapors & Skin contact and vegetable consumption	Inhalation of PFAS with Water Vapors & Skin contact and vegetable & GW consumption
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
PFBA	0,015	447 <sup>(1)</sup>	447 <sup>(1)</sup> (45 000)	447 <sup>(1)</sup> (40 000)	10 (7) <sup>(2)</sup>
PFPeA	0,031	3 <sup>(2)</sup>	3 <sup>(2)</sup>	3 <sup>(2)</sup>	3 <sup>(2)</sup>
PFHxA	0,190	180 000	75 000	70 000	8
PFHpA	0,036	7	6	5	0,3 (0,06) <sup>(2)</sup>
PFOA	0,350	0,15	0,14	0,12	0,1 <sup>(2)</sup> (0,03)
PFNA	<0,010	62,5 <sup>(1)</sup>	15	10	0,06 <sup>(2)</sup> (0,006)
PFDA	<0,010	4,270 <sup>(*)</sup>	7,5	7	0,1 <sup>(2)</sup> (0,03)
PFBS	0,120	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>	6 <sup>(2)</sup>
PFHxS	6,90	243 <sup>(1)</sup>	243 <sup>(1)</sup> (20 000)	243 <sup>(1)</sup> (15 000)	7
PFHpS	0,530	0,3 <sup>(2)</sup>	0,3 <sup>(2)</sup>	0,3 <sup>(2)</sup>	0,3 <sup>(2)</sup>
PFOS	6,40	300	25	20	0,1 <sup>(2)</sup> (0,004)
PFOSA	<0,010	0,1 <sup>(2)</sup> (0,024)	0,1 <sup>(2)</sup> (0,023)	0,1 <sup>(2)</sup> (0,022)	0,1 <sup>(2)</sup> (0,02)

(1) Limiting at Water Solubility (2) Limiting on German Screening Levels (GFS)

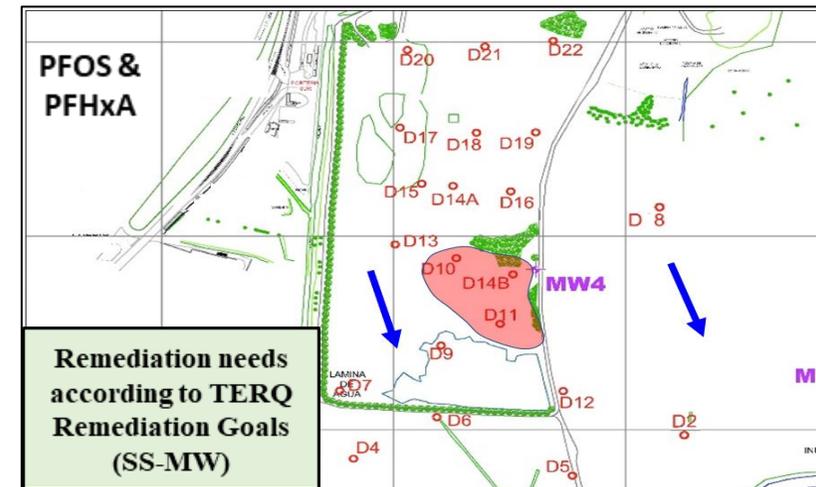
## Evaluation des Risques: ESO

- L'évaluation des risques EQRS et la définition des CMA spécifiques pour les sites pollués présentent un intérêt particulier en ce qui concerne la présence de PFAS, car les coûts de dépollution peuvent se concentrer sur la sécurité sanitaire.
- Le dépassement des CMA peut être cartographié pour identifier et quantifier les zones et les volumes à traiter. La meilleure optimisation du budget de dépollution peut être obtenue et la sécurité juridique maximale peut être assurée en tenant compte de l'élimination des risques non acceptables.
- Une prise en compte des scénarios réels d'utilisation (d'exposition) et le Cocktail des Polluants est nécessaire.

*Reduction du cout de  
dépollution des ESO: -81%.*



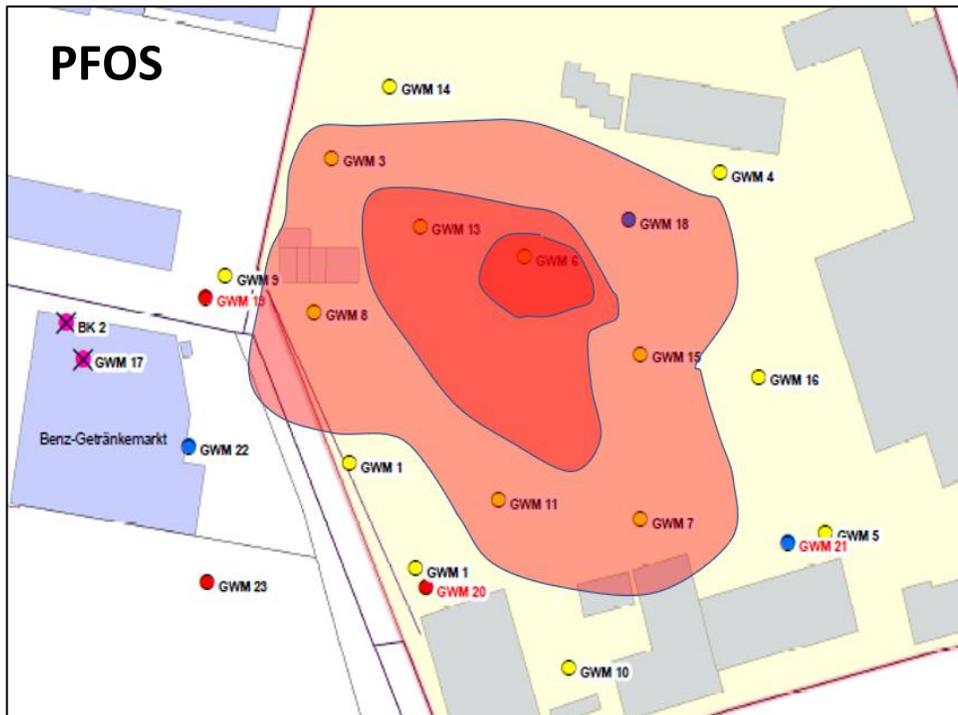
Exemple: Besoin initial de dépollution des eaux souterraines conformément aux Valeur limites GFS: PFHxS et le PFOS.



Besoins de dépollution selon les CMA spécifiques au site pour le PFHxS et le PFOS

## Evaluation des Risques : Sols

- Définition et cartographie des CMA: Conc. Max. Admissible pour les Sols et les Lixiviats
- Exemple Site “F” en Allemagne



Substance	SS-RG (Site Specific Remediation Goals)				Bayern Stufe 1 + BW (GFS)* (2017)	Bayern Stufe 2 LFU
	Industrial use with 30 cm coverage		Industrial use without any coverage			
	Exposure Pathway: Inhalation of Soil vapor		Exposure Pathway: Inhalation of Soil vapor & Contact to Soil and Dust			
	Soil mg/kg	Leachate mg/l	Soil mg/kg	Leachate mg/l	Leachate mg/l	Leachate mg/l
PFBA	1 000 <sup>(1)</sup>	0,355	800	0,355	0,01	0,004
PFPeA	-	0,012 <sup>(2)</sup>	-	0,012 <sup>(2)</sup>	0,003	0,012
PFHxA	600	3 980	300	1 990	0,006	0,024
PFHpA	0,000025	0,001 <sup>(2)</sup> (0,00011)	0,00002	0,001 <sup>(2)</sup> (0,000088)	0,0003	0,001
PFOA	0,000002	0,0004 <sup>(2)</sup> (0,000035)	0,0000015	0,0004 <sup>(2)</sup> (0,000027)	0,0001	0,0004
PFNA	1 000 <sup>(1)</sup>	0,0496	0,8	0,0496	0,00006	0,00025
PFDA	1 000 <sup>(1)</sup>	0,00339	4	0,00339	0,0001	0,0004
PFBS	-	0,024 <sup>(1)</sup>	-	0,024 <sup>(1)</sup>	0,006	0,024
PFHxS	1 000 <sup>(1)</sup>	0,193	200	0,193	0,0001	0,0004
PFHpS	-	0,001 <sup>(1)</sup>	-	0,001 <sup>(1)</sup>	0,0003	0,001
PFOS	0,003	0,0197	0,002	0,0131	0,0001 0,00023	0,0004
H <sub>4</sub> PFOS	-	0,0004 <sup>(1)</sup>	-	0,0004 <sup>(1)</sup>	0,0001	0,0004
PFOSA	0,000006	0,0004 <sup>(1)</sup> (0,000007)	0,000005	0,0004 <sup>(1)</sup> (0,000006)	0,0001	0,0004

(1) Limiting at Water Solubility (2) Limiting on German Screening Levels (Stufe 2)

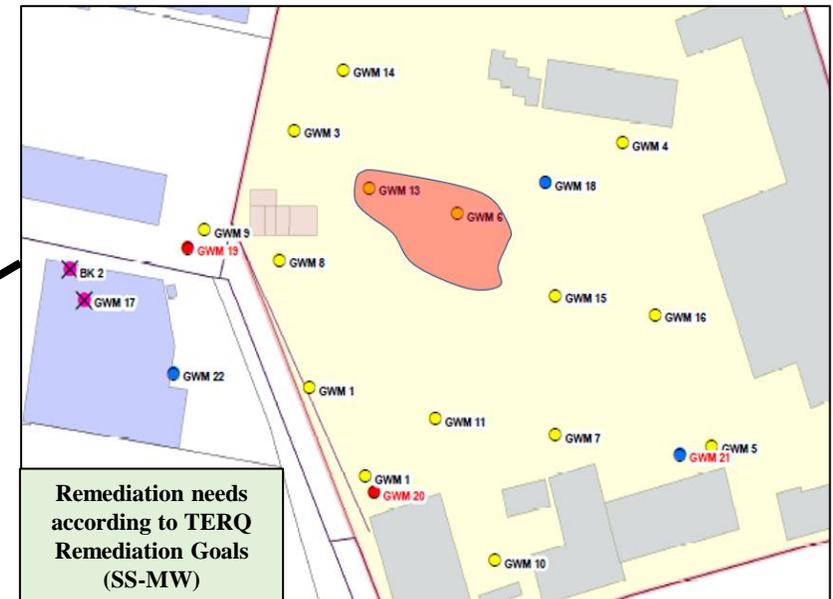
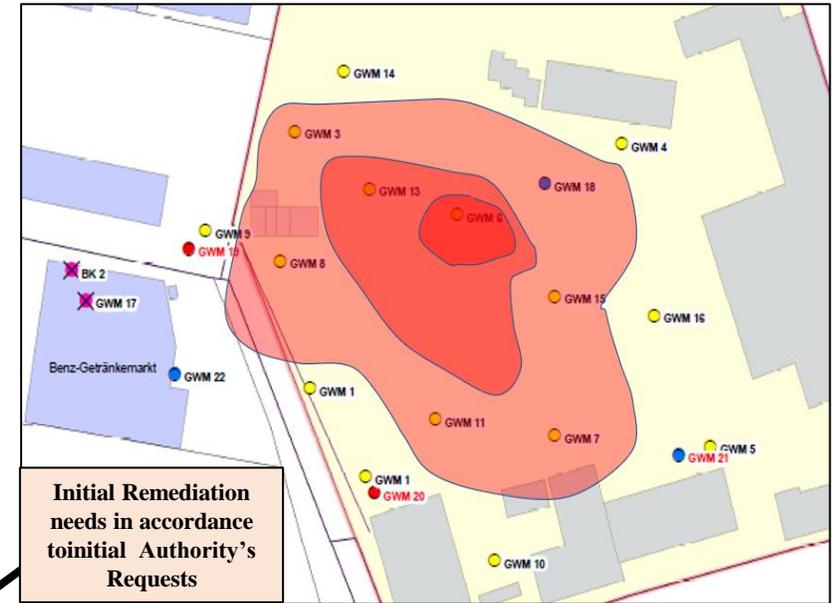
## Evaluation des risques : Sols

- Définition et cartographie pour les sols et lixiviats.
- Prise en compte par des CMA des scénarios réels d'utilisation (d'exposition) et le Cocktail des Polluants.

*Reduction du cout  
de dépollution de -73%.*

Besoin initial de dépollution des sols conformément aux  
demandes de l'Administration Allemande:  
> 0,0004 mg / l de lixiviat.

Application des CMA pour le PFOS:  
> 0,002 mg/l lixiviat Usage industriel



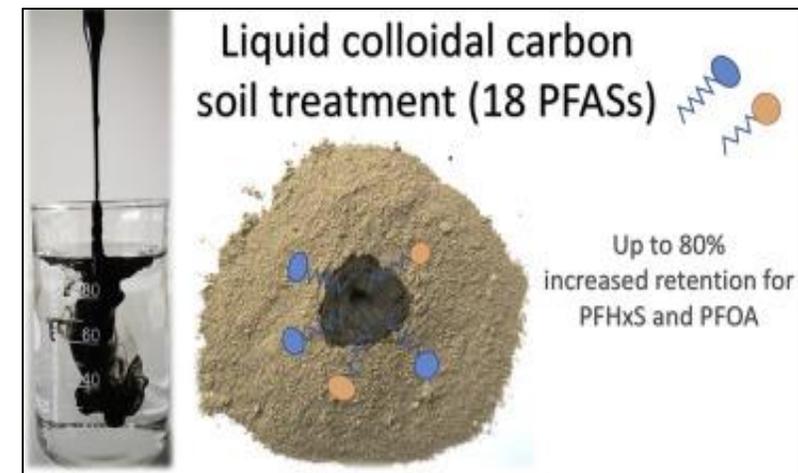
## PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ? : Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Toxicologie & écotoxicologie
5. Contexte réglementaire & Valeurs limites
6. Investigations & Evaluations des risques (ERS)
7. Traitements, Dépollution & Décontamination



## Réhabilitation & Dépollution:

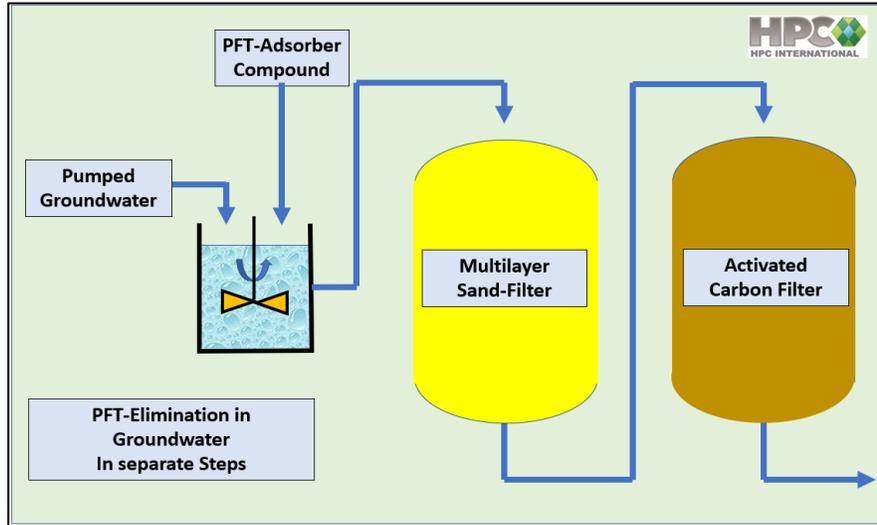
- La **réhabilitation microbiologique** n'est pas possible actuellement.
- La **réhabilitation du sol** comprend l'excavation et l'élimination ou l'incinération hors site, le lavage des sols, la stabilisation et les confinements.
- **Eaux souterraines (ESO) : la technologie de réhabilitation est P&T** avec traitement par le Charbon Actif ou d'autres adsorbants commerciaux, adaptés spécifiquement (échange d'ions, l'osmose inverse, les Résines absorbantes spécifiques) et injection du Charbon Actif Colloïdal (in-situ). **Eaux superficielles** : Pièges de bioaccumulation de dépollution.
- **Les applications in situ pour les ESO** sont possibles mais ont besoin d'une étude de faisabilité technico-économique.
- **Des technologies R&D innovantes** comme la SonoLysis et l'oxydation chimique spéciales (types ISCO) pourraient s'appliquer.
- **HSE:** Attention: Réactions dans le système respiratoire des Sols et eaux impactés !



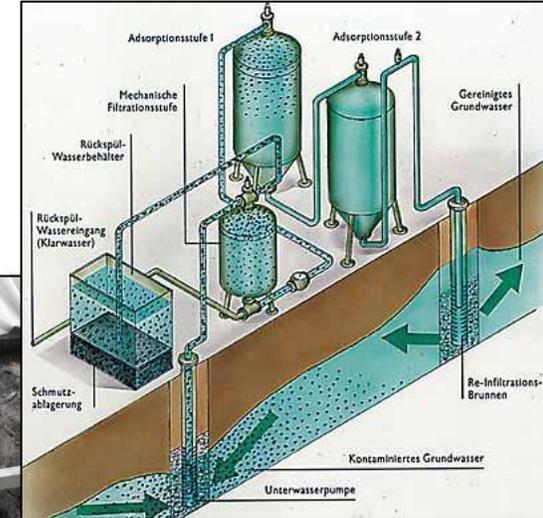
**Dépollution PFC de la Décharge de Wirmstal / Allemagne**



# Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé



## Dépollution: ESO

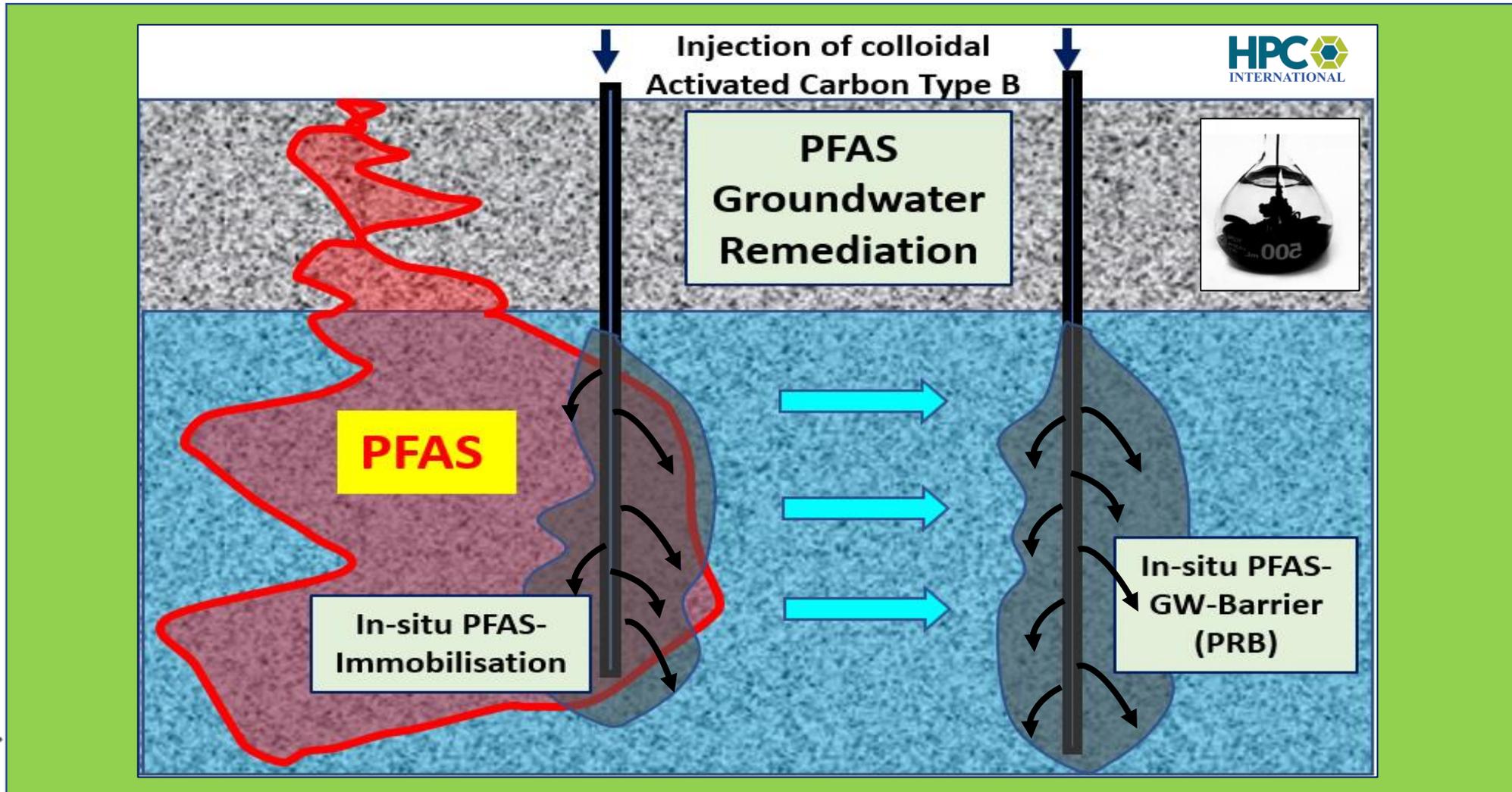


Elimination PFAS dans les eaux  
souterraines via P&T  
→ Flottants (mousses....)



## Dépollution in-situ:

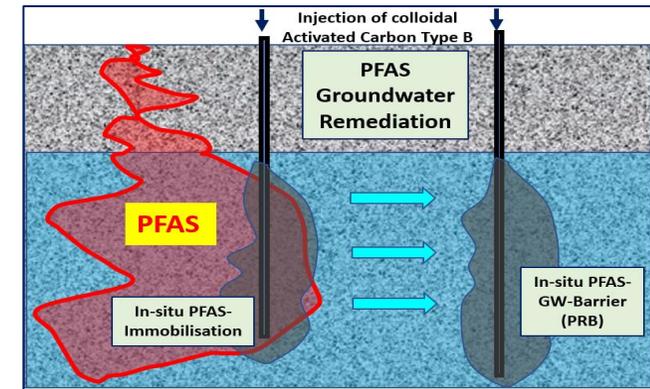
### ➤ In-situ immobilisation via Charbon Actif Colloïdal



## Conclusion :

Contact: [frank.karg@hpc-international.com](mailto:frank.karg@hpc-international.com)

- Il existe environ 4700 (x2 ?) composés PFAS
- Les PFAS sont très solubles mais aussi bio-accumulables
- Les substances per- et polyfluoroalkyles (PFAS) sont non-volatils, à l'exception des FTOH volatils: Alcools fluorotélomères,
- Les PFAS polyfluorés sont bio-transformés en PFAS perfluorés stables
- Il existe des milliers de sites pollués par les PFAS: sites de lutte contre l'incendie (comme sur les aéroports...), sites industriels, terres agricoles avec boues de STEP....
- Des investigations des sites et des évaluations des risques sont nécessaires !
- Des analyses chimiques existent principalement pour les acides perfluoro-alkane carboxyliques et les acides sulfoniques.
- Les eaux souterraines sont immédiatement affectées (y compris l'eau potable)
- Les dépollutions sont difficiles mais possibles, suite à des études de faisabilité technico-économiques.



## Management des pollutions PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Santé - Environnement

**Merci !**

**Questions ? Remarques ?**

Dr. (PhD) Frank Karg / Scientific Director of HPC-Group (INOGEN JV) and  
CEO-President of HPC INTERNATIONAL / France, Germany, Hungary, Balkan, etc.

Email: [frank.karg@hpc-international.com](mailto:frank.karg@hpc-international.com) / Phone: +33 607 346 916

