

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

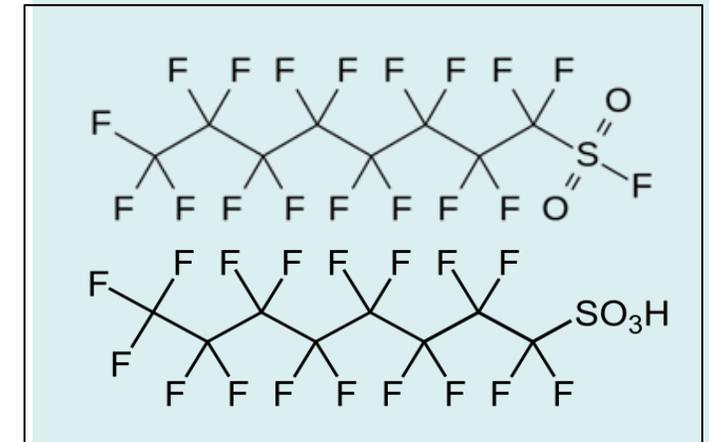
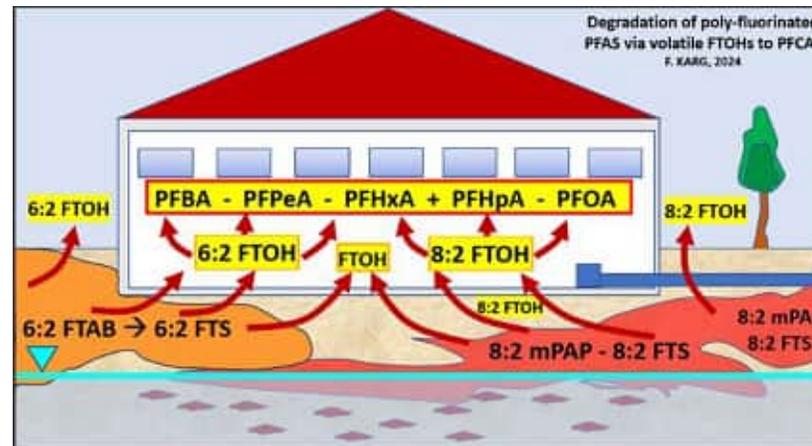
Tél : +33 (0) 607 346 916, Email : frank.karg@hpc-international.com

Les traitements in-situ des PFAS dans les eaux souterraines, les sols & gaz du sol (FTOH) et l'application des Bio-Polymères protéiniques : Bilans Coûts-Avantages

In-situ treatments of PFAS in groundwater, soils and soil vapor (FTOH) and the application of protein Bio-Polymers: Advantages & Inconvenients

Frank KARG, Philippe GIRARD, Ulrike HINTZEN, Lucie ROBIN-VIGNERON,
HPC INTERNATIONAL / France, Germany, Suisse, Hungary, Balkan, etc.

Email: frank.karg@hpc-international.com / Tél:+33 607 346 916



PFAS (PFC, PFT):

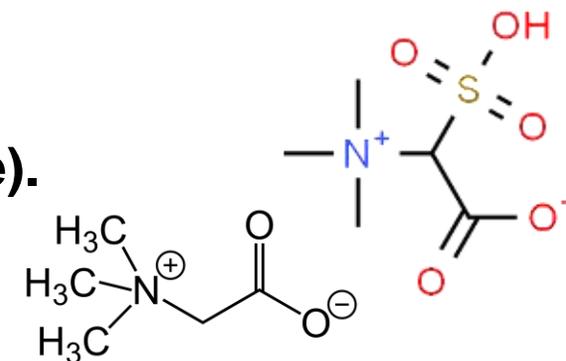
1. PFAS ?: Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. Traitements, Dépollution & Décontamination



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: par ex. Bétaines & Sulfobétaines).



→ Les produits commerciaux contiennent principalement des mélanges.

→ Les fluoro-télomères à longue chaîne (> C₈) utilisés comme substitués du PFOS (interdit) et du PFOA sont transformés en PFOA dans le sous-sol. Les PFAS de chaîne courte (< C₆) ne peuvent pas être transformés en PFOA ou en PFOS.

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

**Min:
33
Catégories**

1. **Acides Perfluoroalkane-sulfoniques (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. **Fluorotélomère-alcooles,**
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.

> 9 000 !

Au total, il existe > 9 000 (- 12 000) 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. Traitements, Dépollution & Décontamination



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 & inces
- Matériel de Construction (Bétons):
par ex. C₈-C₂₀-gamma-omega-perfluoro Thiols)
- Peintures, Encres & Laces
- Modules électroniques & semi-conducteurs
- Huiles Hydrauliques,
- Production de Teflon (Fluoropolymeres)
- Mousses anti-incendie (AFFF)
- Papiers traités en surface & Cartons....



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



17.10.2018 Gartenhalle, Karlsruhe



Source:

28. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar



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



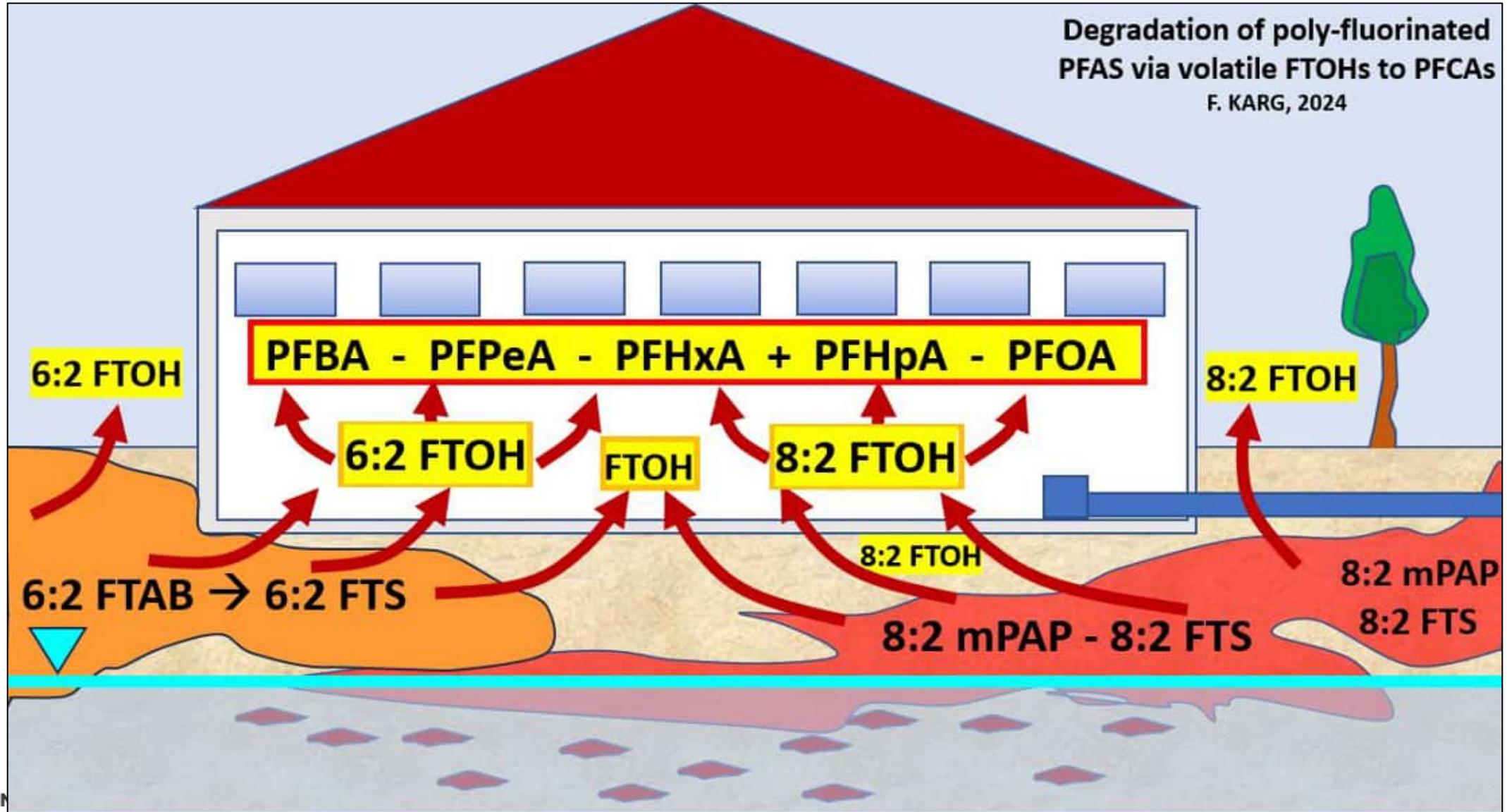
Quelle: Spiegel Online 19.11.2016 / KTVU-TV / AP

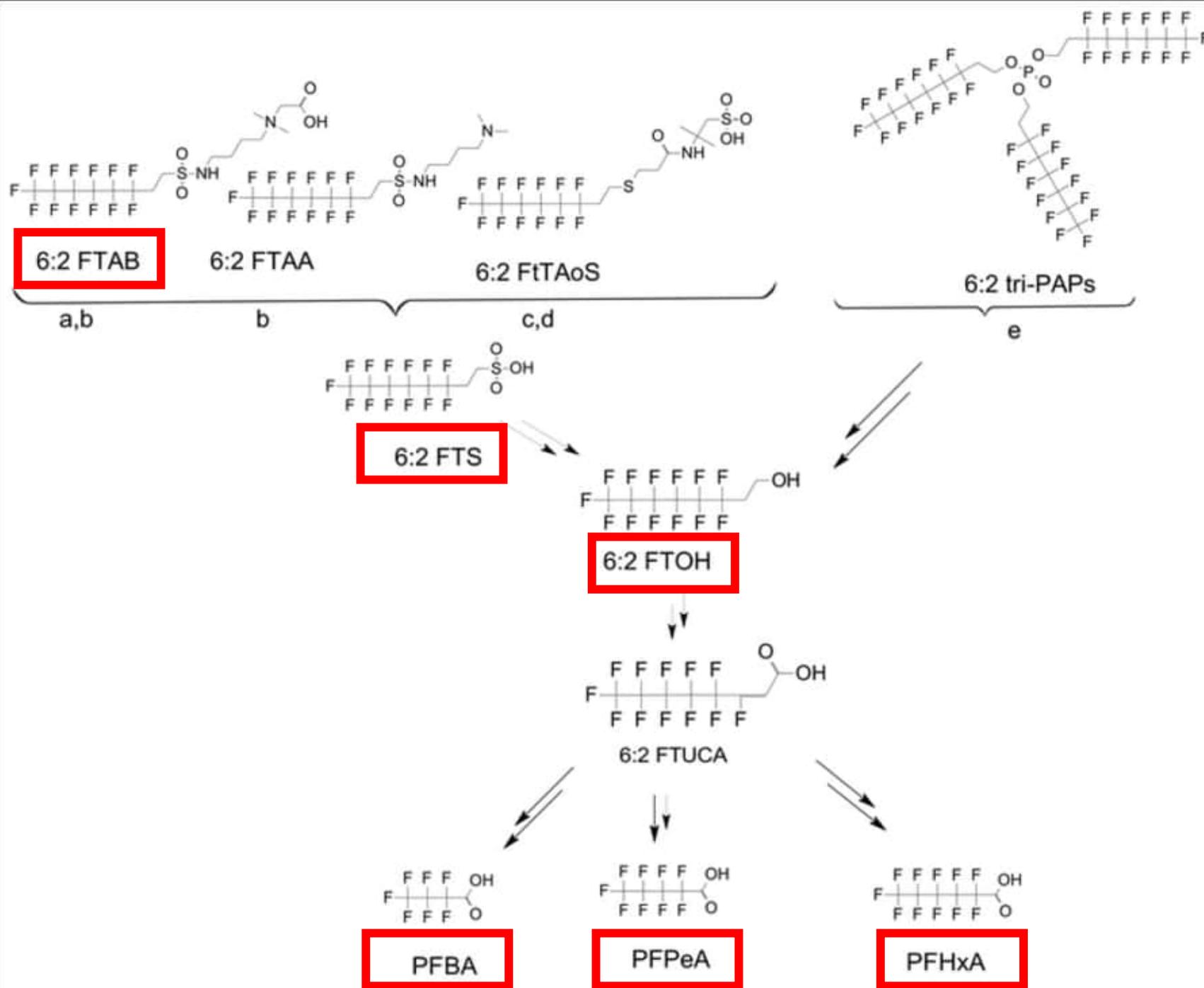
PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ?: Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. **Chimie environnementale**
4. Traitements, Dépollution & Décontamination



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

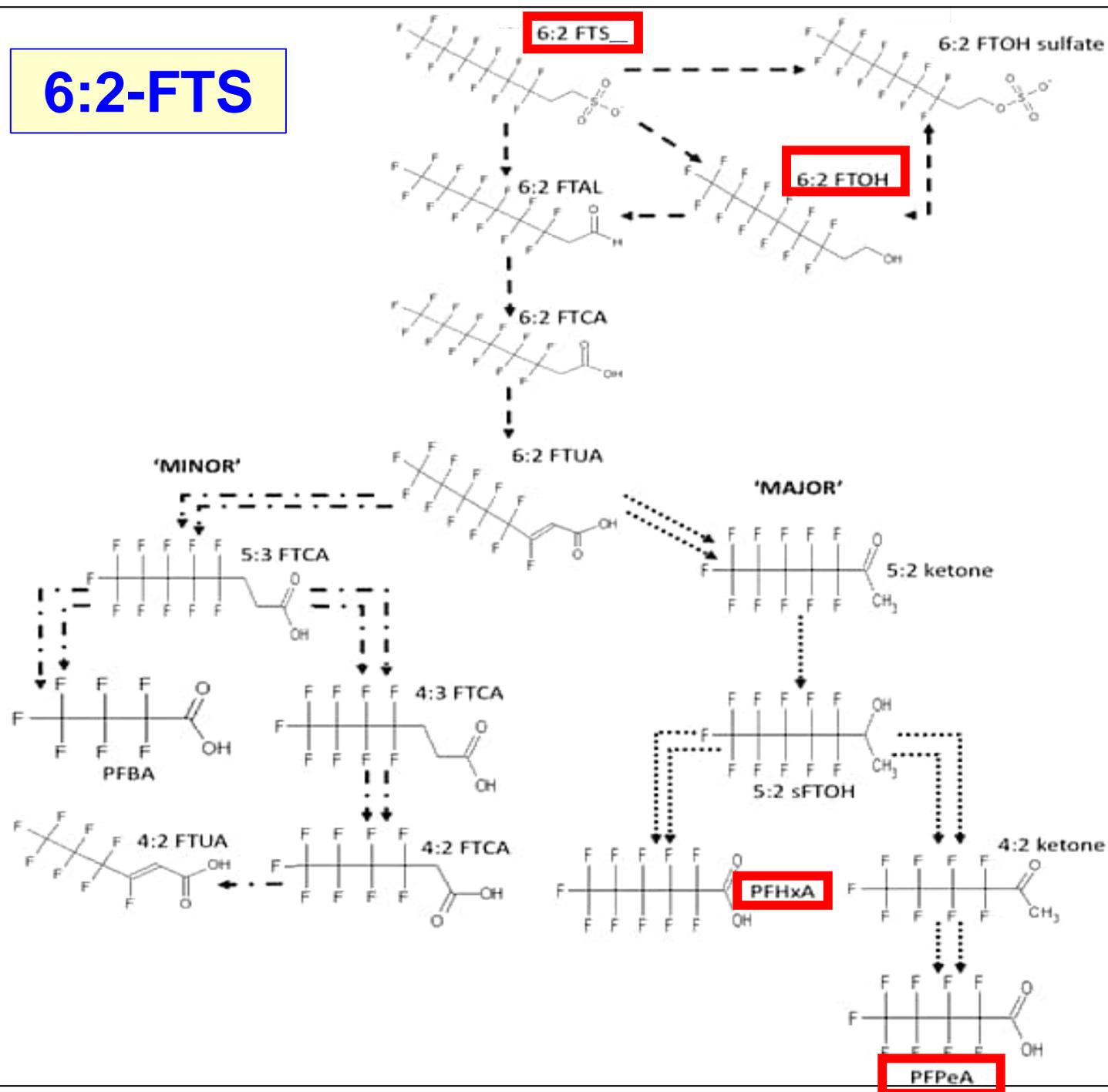




6 :2 FTAB et sa dégradation via le 6 :2 FTS et le 6 :2 FTOH vers les PFAS per-fluorés PFBA, PFPeA et PFHxA

(LaFond et al. 2023, D.M.J. Shaw et al. 2019 ,Ying Shi, 2018 et V. Mendez et. al. 2022)

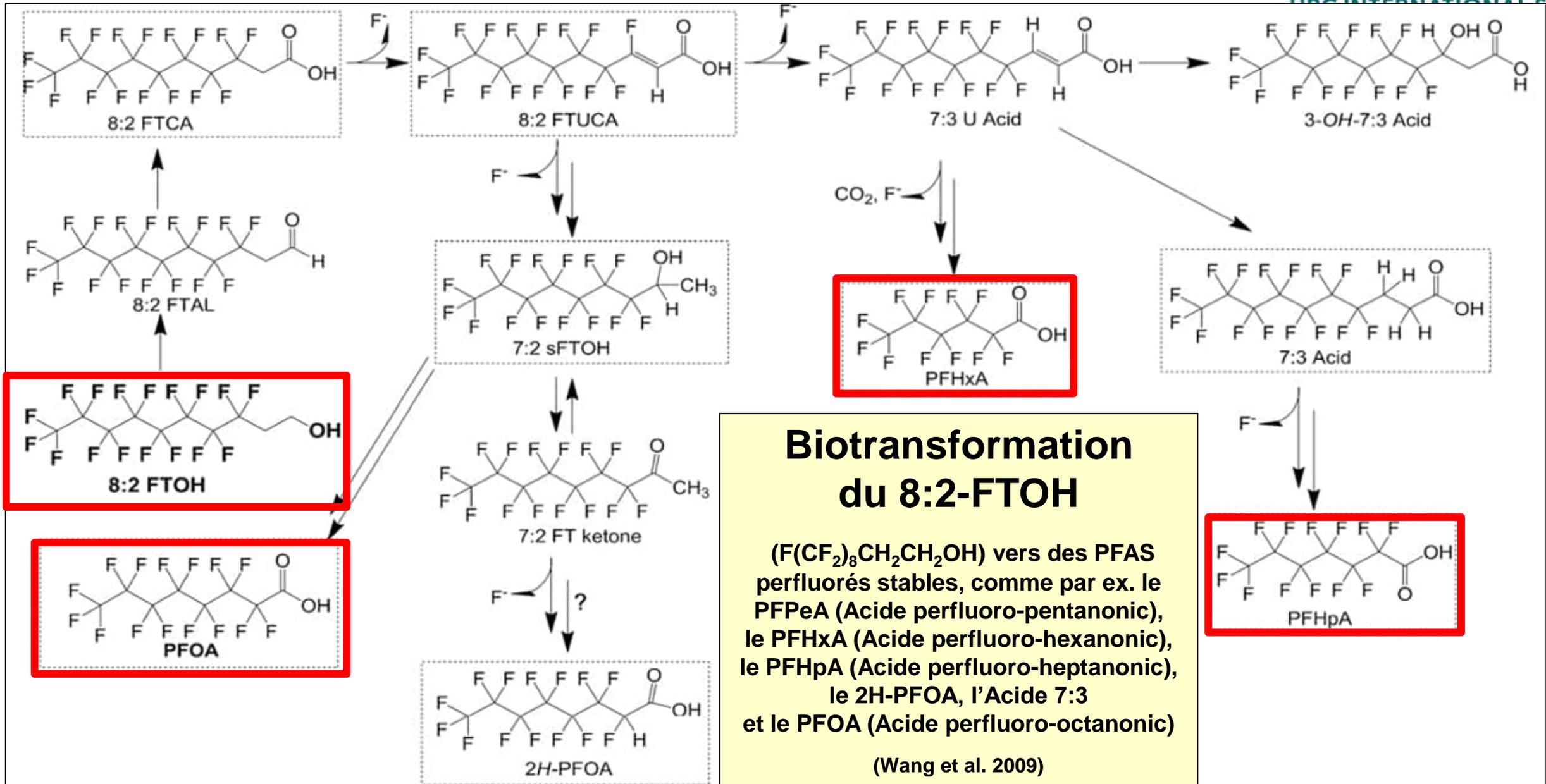
6:2-FTS



Biotransformation du 6:2-FTS

vers des PFAS perfluorés stables, comme par ex.:
le PFBA (Acide perfluorobutanonique), le PFPeA (Acide perfluoropentanonique),
le PFHxA (Acide perfluorohexanonique)

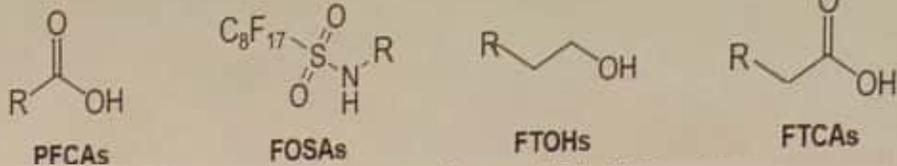
(D.M.J. Shaw et al. 2019, Ying Shi, 2018 et V. Mendez et al. 2022)



PFAS : Chimie Environnementale

Autres PFAS volatils

- **FTOH: Fluorotelomère-alcools** (par ex. les 4:2-FTOH, 4:3-FTOH, 6:2-FTOH, 6:3-FTOH, 8:2-FTOH, 10:2-FTOH),
- **FASE: Per-fluoroalkane-sulfamide-ethanole** (par ex. N-MeFOSE, N-EtFOSE),
- **FTI: Fluorotelomère-iodite** (par ex.. 6:2-FTI, 8:2-FTI, 10:2-FTI),
- **FTAC: Fluorotelomère-acrylates** (par ex. 4:2-FTAC, 6:2-FTAC, 8:2-FTAC, 10:2-FTAC),
- **FTMACS: 6:2-Fluorotelomère-méthylacrylates** (par ex. 4:2-FTMAC, 6:2-FTMAC, 8:2-FTMAC, 10:2-FTMAC),
- **PFADiI: Perfluoroalkyl-di-iodites** (par ex. PFBuDiI, PFH_xDiI, PFODiI),
- **TFMB: Trifluorométhylbenzenes** (z.B. BTFM_{BB}: 1-Brom-3,5-bis(trifluoro-méthyl)benzene).



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

Increasing or Reduction of Solubility and Extractability of some PFAS-Fluorotelomers

Erhöhung bzw. Erniedrigung der Polarität & Löslichkeit einiger PFAS-Fluortelomere

Example: Sea water Impact to Groundwater (HH): Analyses by DIN 38407-42 (solid-liquid extraction) F. KARG 

Acid

pH 6,7

→ to →

pH 7,3

Basic

6:2-FT(S)AB = Capstone B (Fire Fighting Foam)

6:2 Fluorotelomer sulfonamido propyl betaine

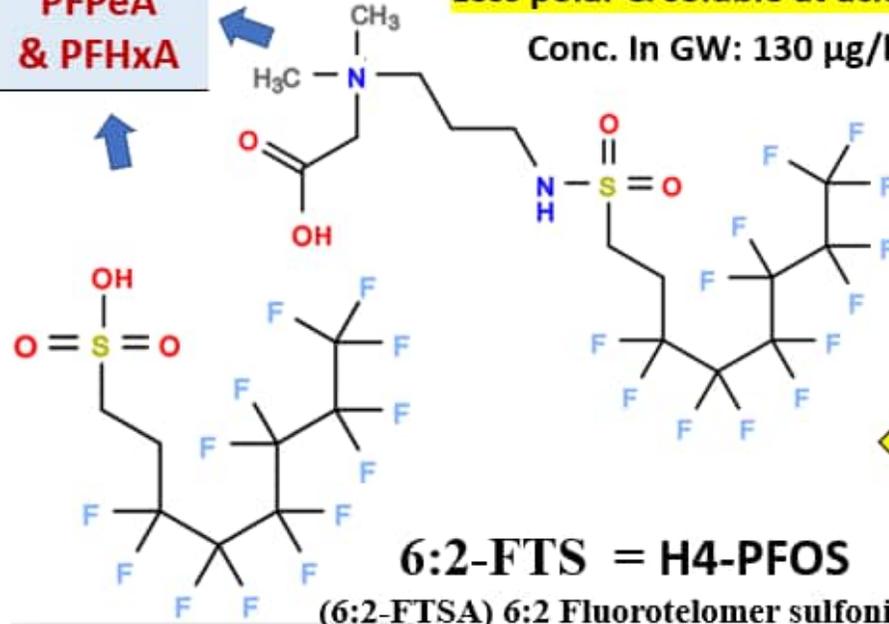
1-Propanaminium, N-(carboxymethyl)-N,N-dimethyl-3-[[[3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluorooctyl)sulfonyl]amino] and inert salt

N-(Carboxymethyl)-N,N-dimethyl-3-[[[3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluorooctyl)sulfonyl]amino]-1-propanaminium and inert salt

**PFPeA
& PFHxA**

Less polar & soluble at acid pH

Conc. In GW: 130 µg/l



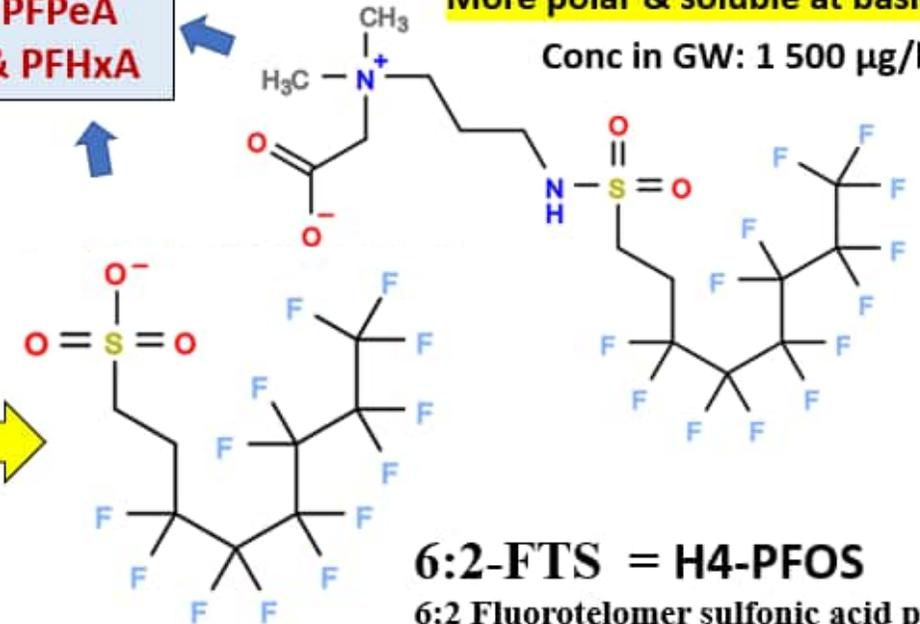
6:2-FT(S)AB = Capstone B (Fire Fighting Foam)

6:2 Fluorotelomer sulfonamido propyl betaine inert salt

More polar & soluble at basic pH

Conc in GW: 1 500 µg/l

**PFPeA
& PFHxA**



PFAS (PFC, PFT):

1. PFAS ?: Description des polluants
2. Sources des Contaminations & des Pollutions
3. Chimie environnementale
4. **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 (IX: échange d'ions, les Résines absorbantes, Argiles modifiés, Biopolymères et injection du Charbon Actif Colloïdal in-situ), l'osmose inverse.
- **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.



M. Sorengard et al. 2019

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

Exemples de technologies de traitement (ESO & Lixiviats):

ESO (Eaux souterraines) & Lixiviats des lavages des sols: Adsorption par des Polymères protéiniques & RemBind (Kaolinites, Acides Humiques), Coagulation chimique via $Al(OH)_x$ et résines d'échanges d'ions (in- & ex-situ): SENSATEC - HPC INTERNATIONAL



➤ Adsorption sur
Charbon Actif liquide
(in & ex-situ):
Regnesis + Others

➤ Concentrations
via air/water Inter-
face Foam (ex-situ):
ALLONIA

➤ Concentrations
via Floculants bio-
dégradables :ex-situ
Cornelsen/TRS

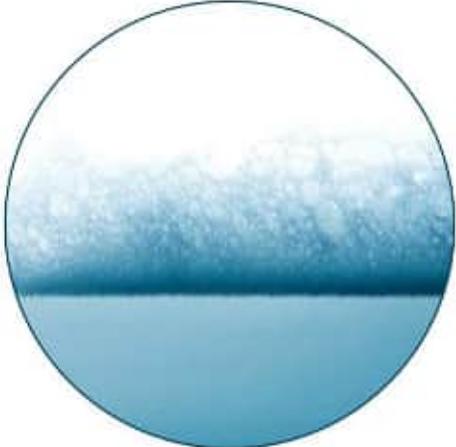
➤ Argiles modifiés
Adsorbés (ex-situ):
CETCO
& ETEC2

PLUME STOP
Liquid Activated Carbon



Courtesy of Regenesis

SAFF®
Foam Fractionation



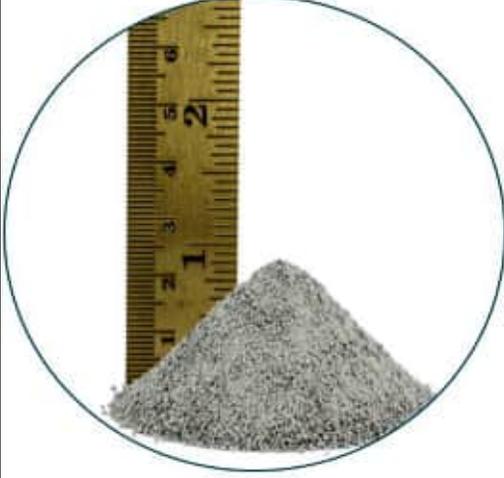
Courtesy of Allonnia

PerfluorAd®



Courtesy of Cornelsen/TRS

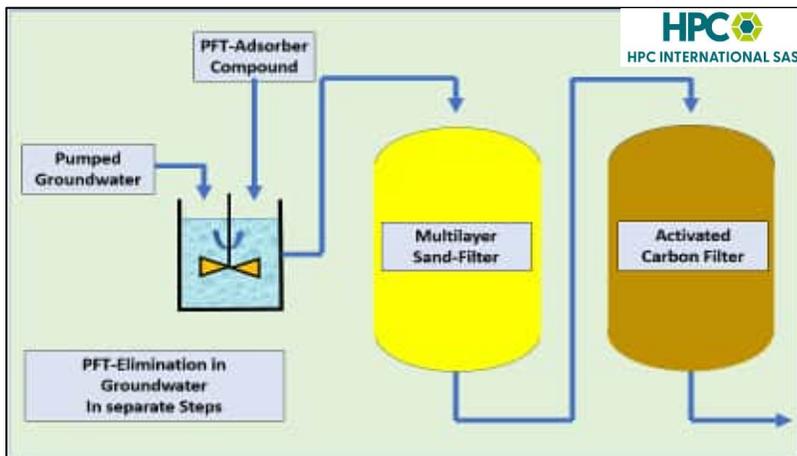
FLUOROSORB®



Courtesy of CETCO



Dépollution des eaux souterraines



SENSATEC
Traitement PFAS



Elimination des PFAS via
P&T

→ Phase flottante 

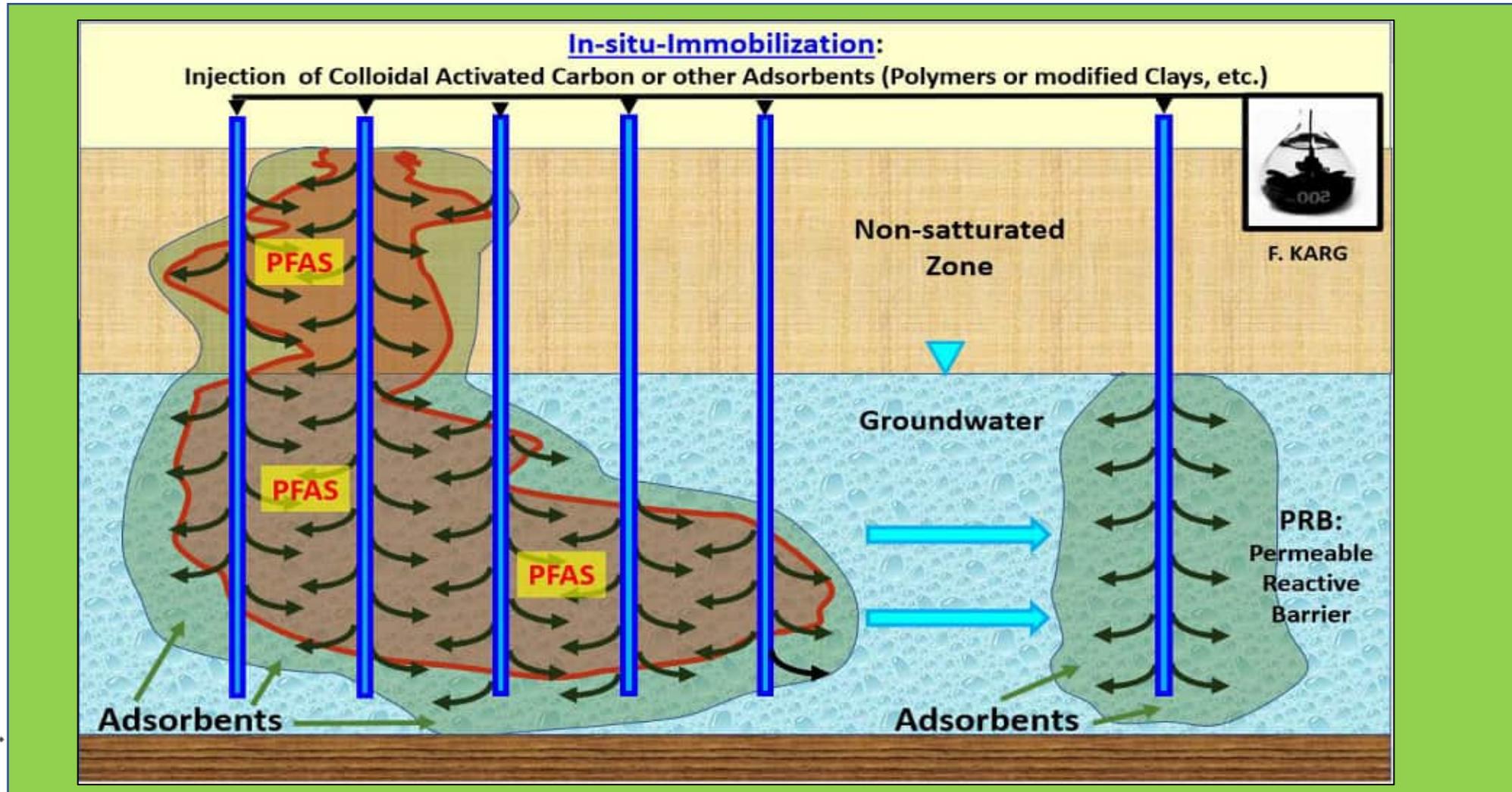


Autres traitements :

Sorbix A3F resin, Purofine® PFA694, AmberliteTMPSR2 Plus,
Purofine®PFA694E, CalRes 2301, Sorbix PURE LC, ResinTech SIR-
110-HP, etc. ou des Résines d'échanges d'ions combinées.

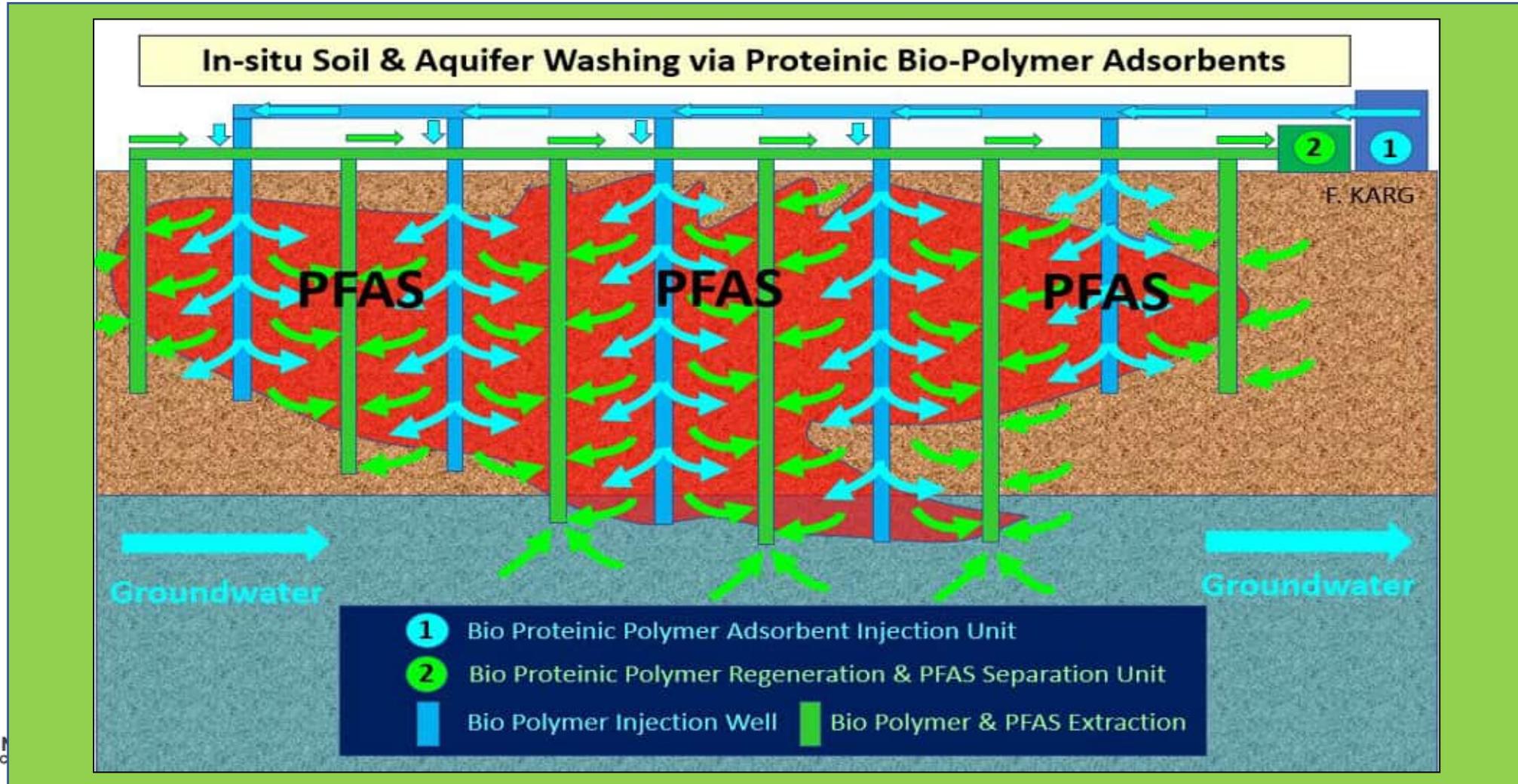
Dépollution in-situ :

➤ Immobilization in-situ via Charbon Actif Colloïdal (HPC)



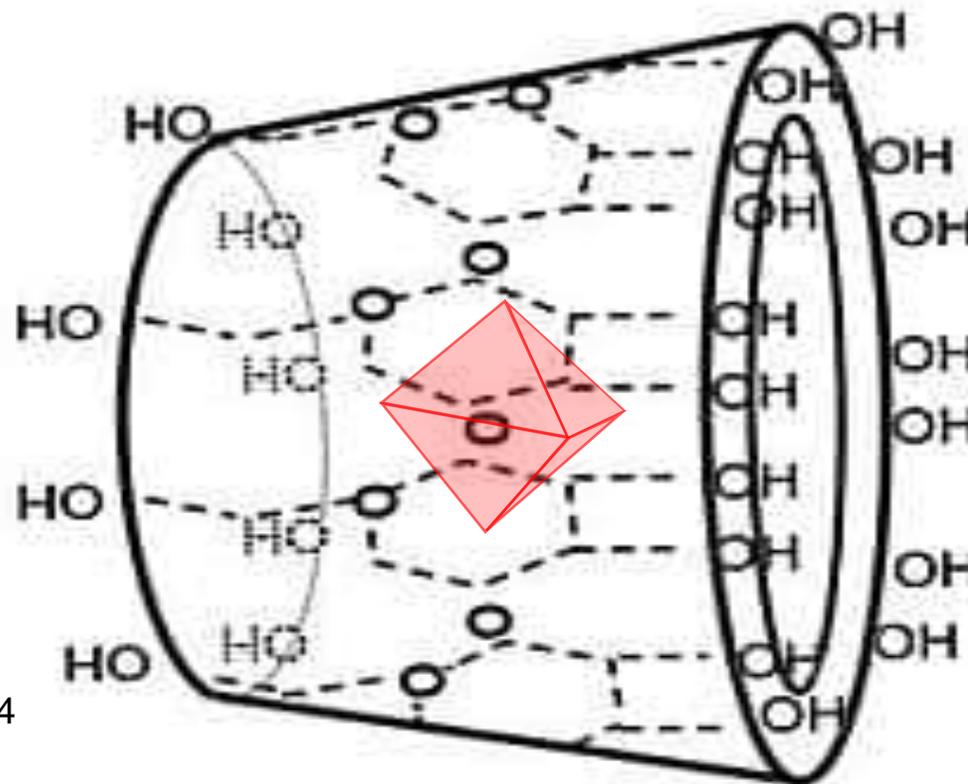
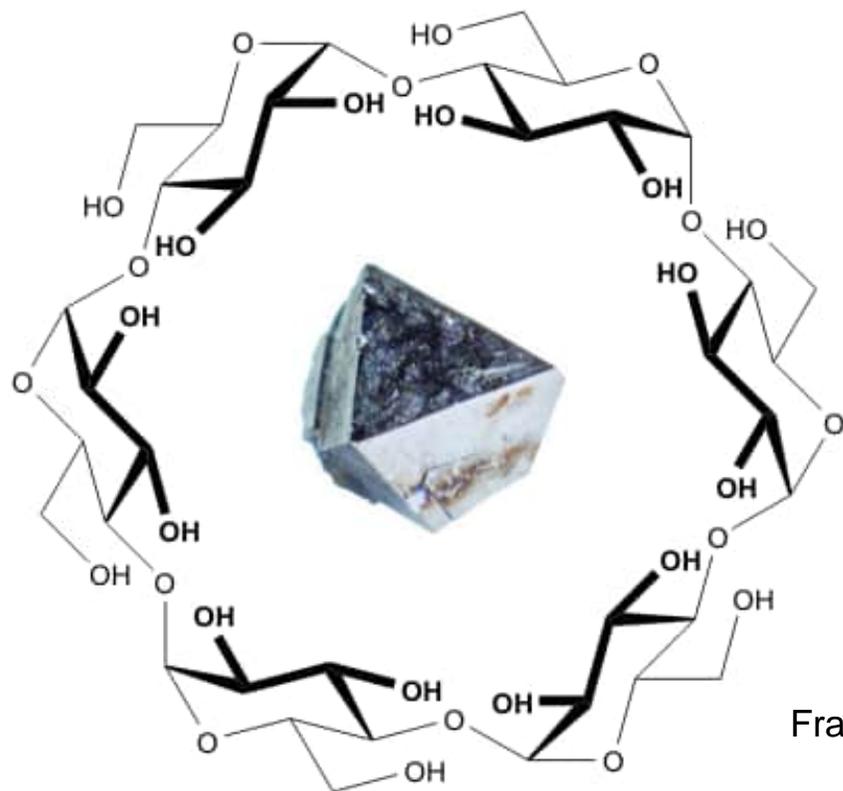
Dépollution in-situ :

➤ Lavage in-situ par Bio-polymers protéiniques (HPC)

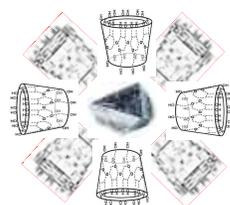


Gestion des PFAS: Per- & Polyfluoro-Alkyl Substances: Pollutions environnementales et Risques pour la Santé

n-Magnetite Crystals coated by Tunnel - Beta-Cyclodextrins

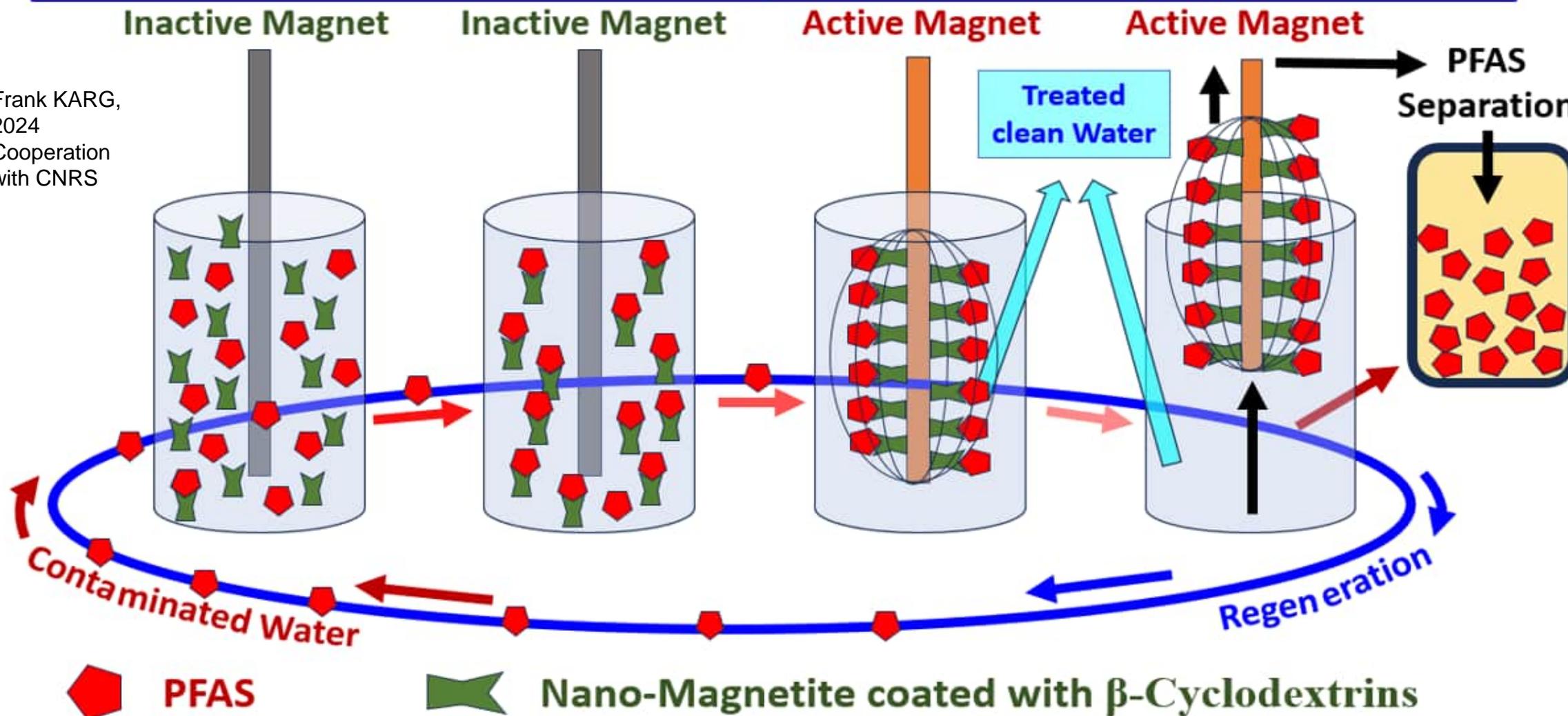


Frank KARG, 2024



PFAS Water Purification via Nano-Magnetite coated with β -Cyclodextrins

Frank KARG,
2024
Cooperation
with CNRS

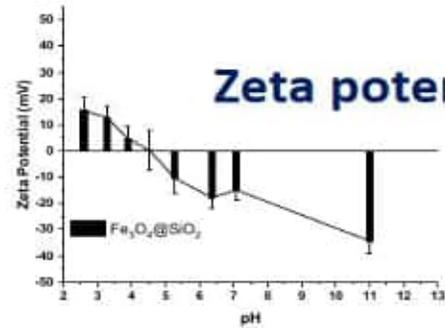


Colloque

PFAS : enjeux et alternatives

cnrs

Magnetite Nanoparticles with Immobilized β -Cyclodextrins as Innovative Green Tool for PFAS Water Remediation

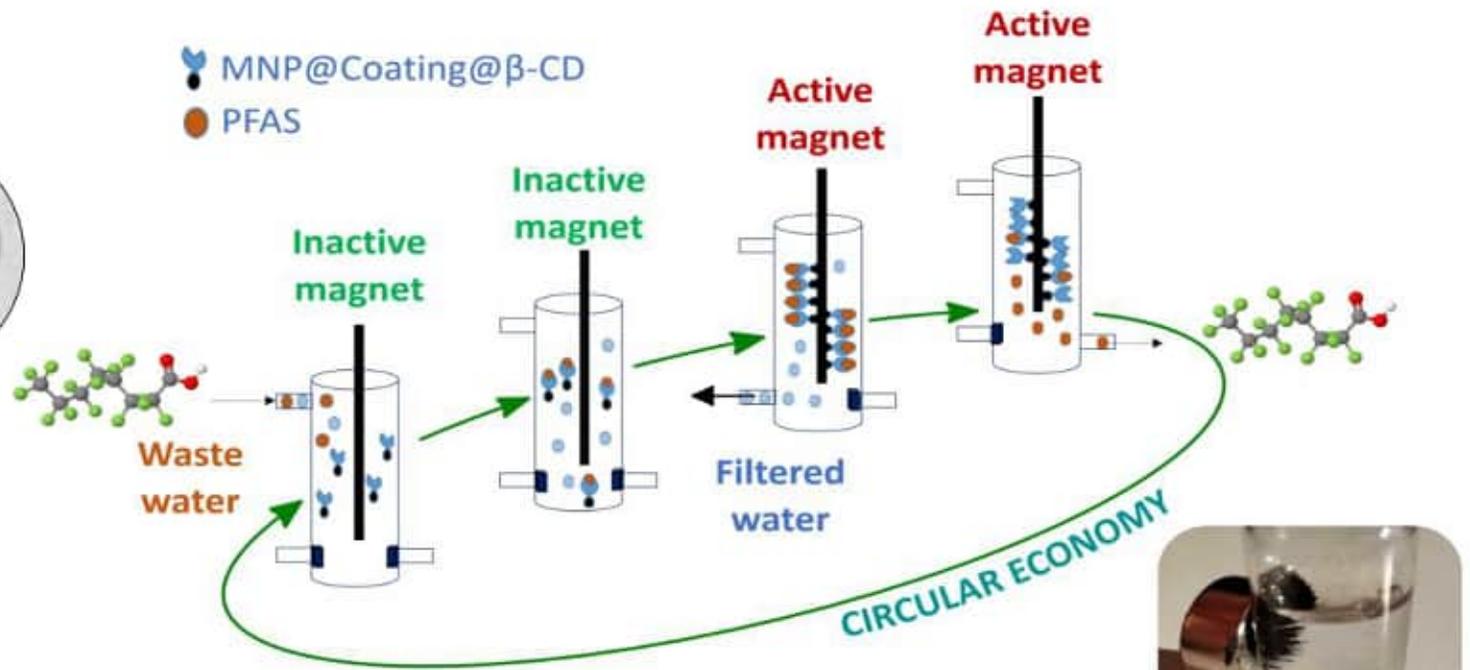


TEM



MNP@Coating@ β -CD
PFAS

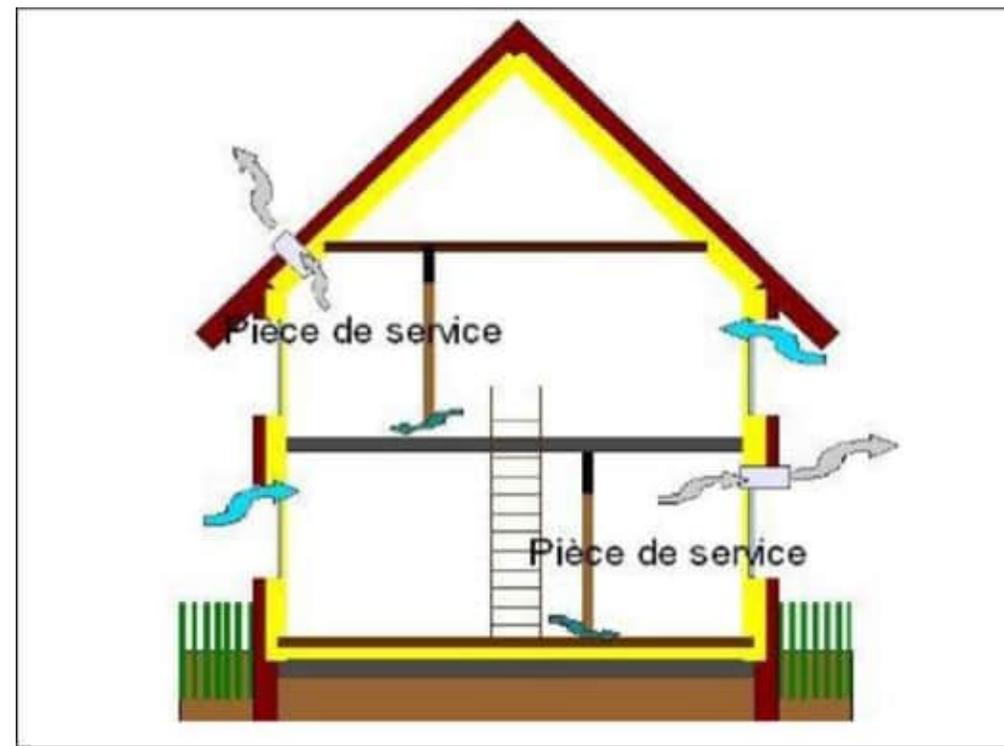
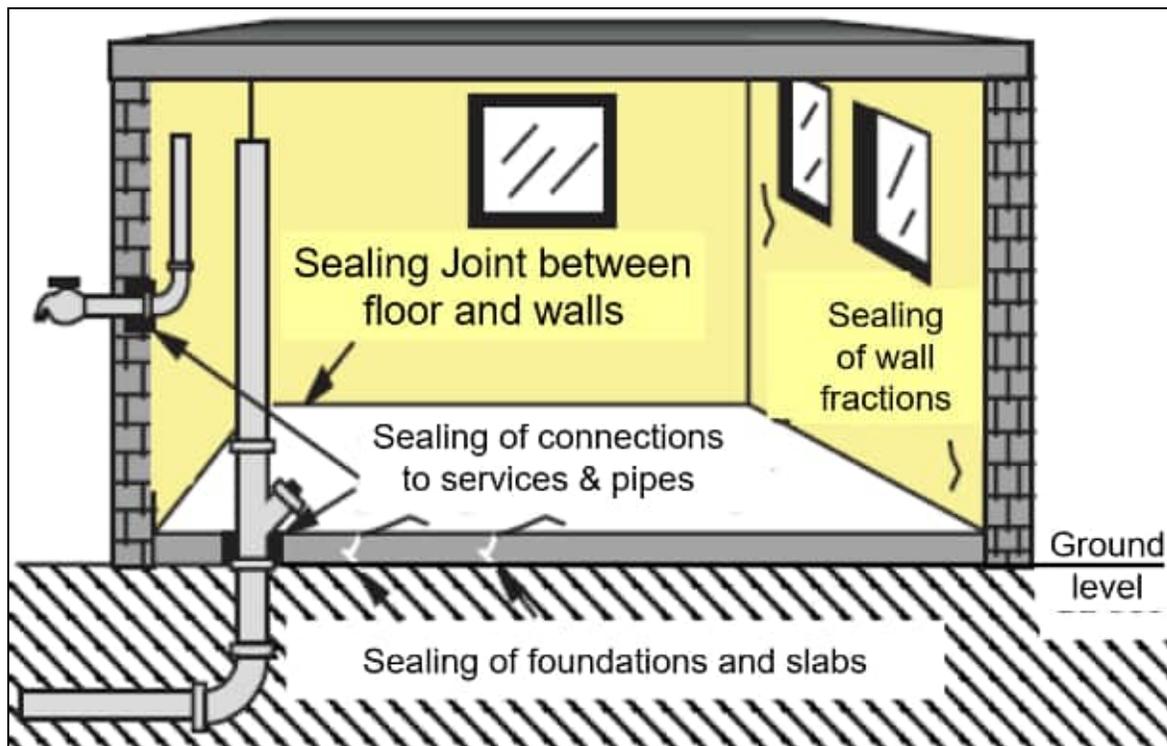
LC-MS



Gouriou, L. &
Gouhier, G.: 2024

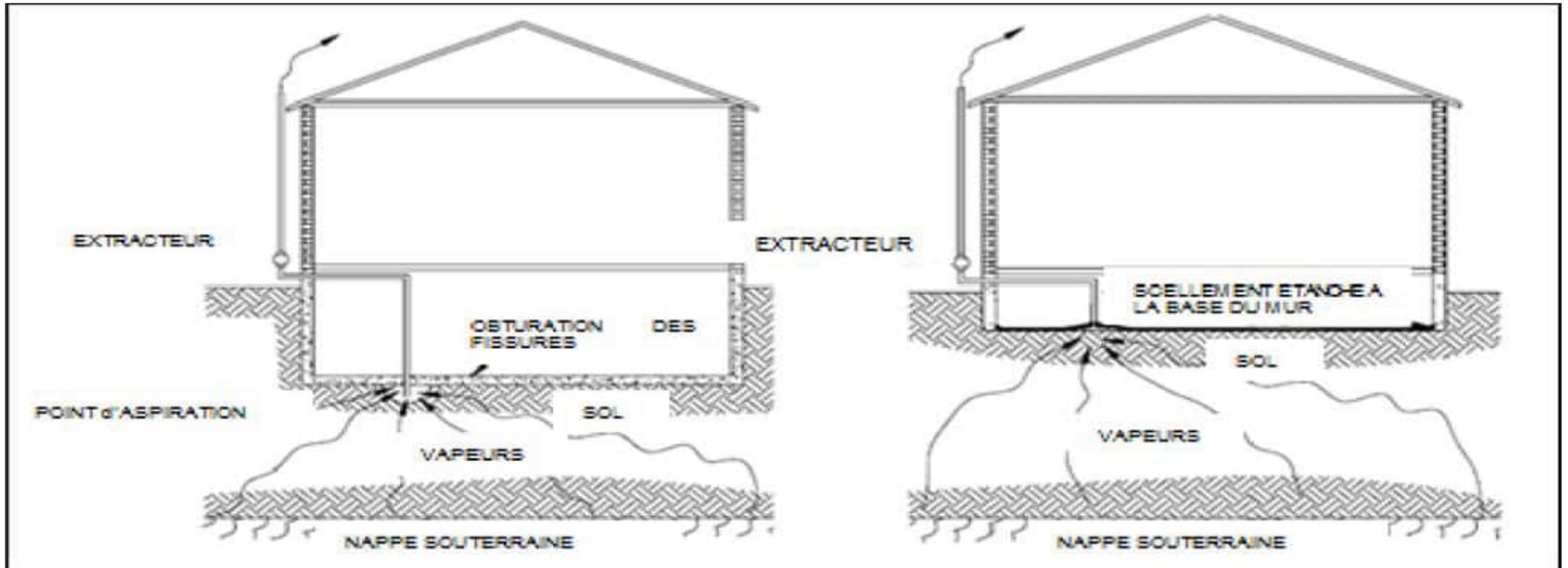


Mesures constructives de protection de l'Air Ambiant contre les Gaz du Sol (FTOH, COHV, etc.): Etanchéifications, Ventilations, Extractions



(ROBE & BRGM 2014)

Mesures constructives de protection de l'Air Ambiant contre les Gaz du Sol (FTOH, COHV, etc.) : SVE / Venting & Extraction sous Dalle



(ROBE & BRGM 2014)

Dans le cas des dépassements des CMA et en Prévention

→ I. Mesures constructives: Et.: Etanchéifications



**Et. Fissures
muraux**



**Et. des sols par béton
spécial**



**Et. via des polyanes en
PEHD, PE, etc.**



**Et. Par peintures
étanches**



Et. par Polymères



**Et. latéraux par
polyanes**



Et. Via Spraying

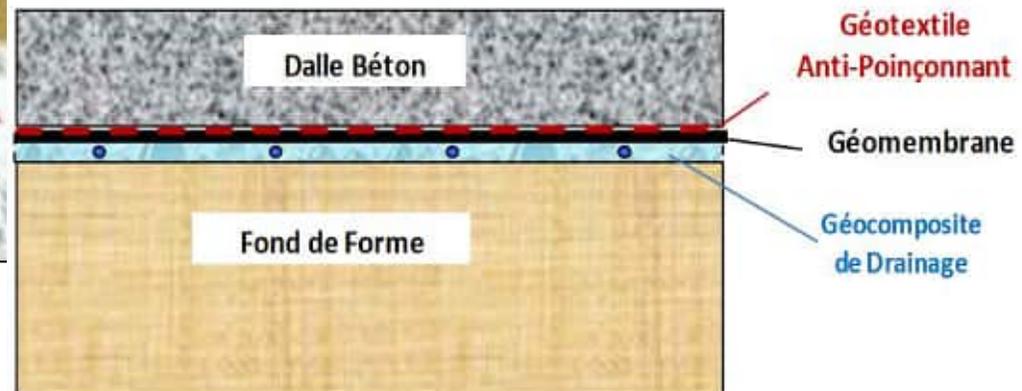
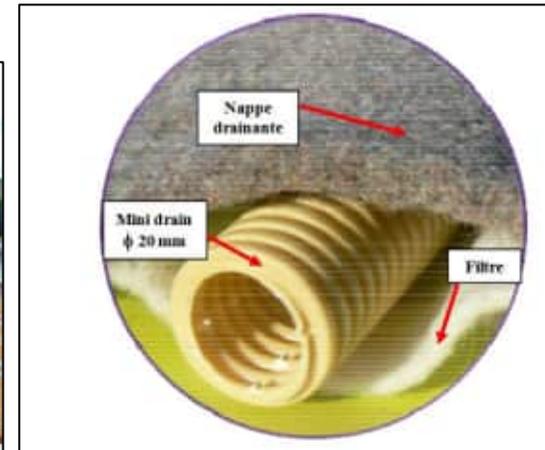


Et. des fondations

Dans le cas des dépassements des CMA et en Prévention

→ II. Mesures constructives: Drainages des Gaz

Drainages des Gaz sous Géotextiles

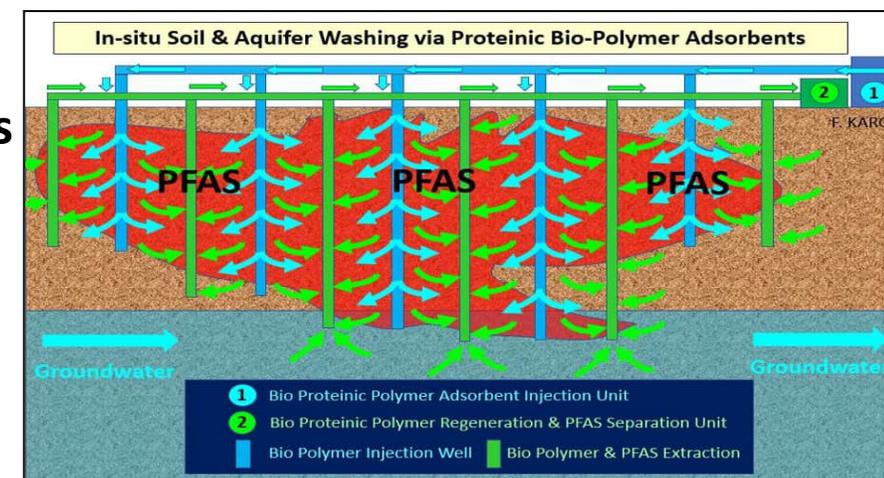
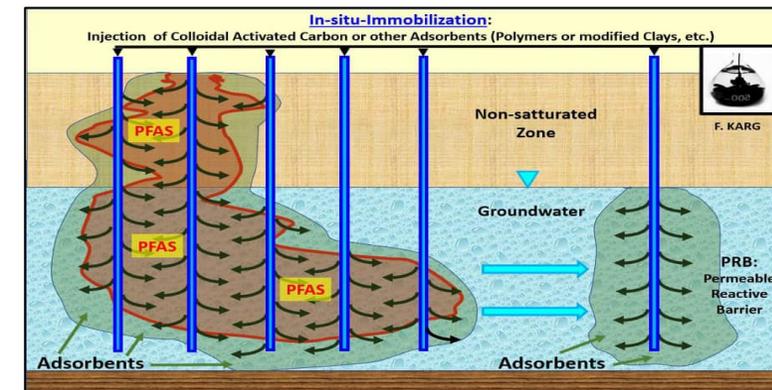


P. Gendrin et al. 2011

Conclusion :

- Il existe plus que 9 000 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....
- Les évaluations des risques et des Bilans Coût-Avantages sont nécessaires pour la définition des Objectifs de dépollution !
- Des études de faisabilité technico-économiques sont nécessaires pour la définition des meilleures technologies de traitement applicables..
- Les dépollutions in-situ par lavages via des Bio-polymers protéiniques sont les technologies les plus avancées pour le traitement des sites pollués.

Contact: frank.karg@hpc-international.com



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 / Phone: +33 607 346 916

