



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

Dépollution in-situ combiné des PFAS par pré-traitement microbiologique des précurseurs et élution bio-chimique des sols et aquifères

Combined in-situ Remediation of PFAS, via microbiological pre-treatment of Precursors and biochemical aquifer and soil elution

Frank KARG (Dr. rer. nat. / es Sc. / PhD)

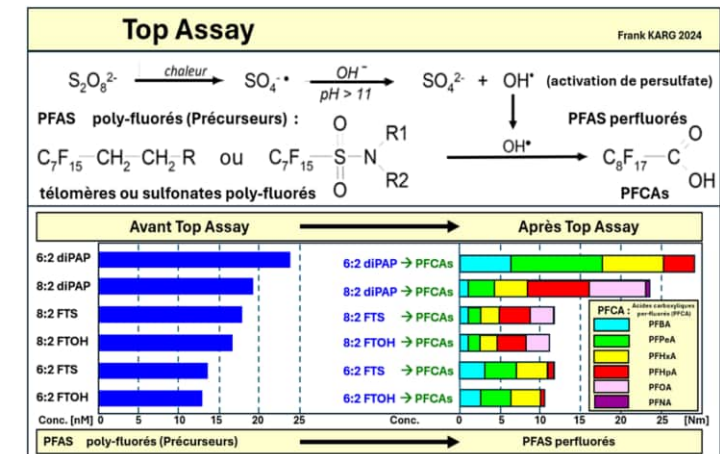
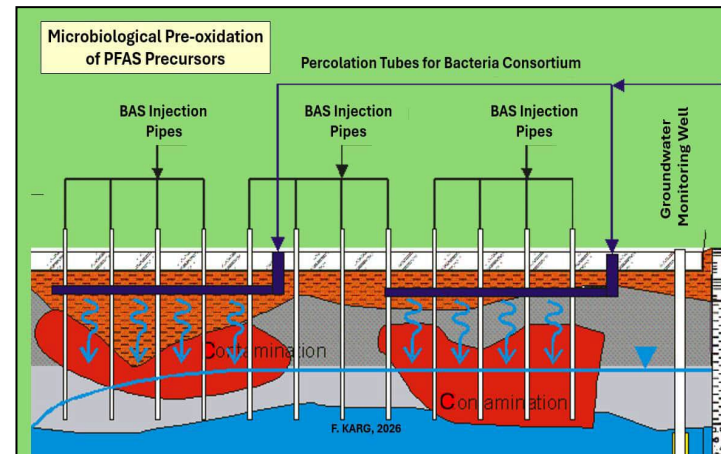
Scientific Director of GINGER Group (HPC International)¹ &

President – CEO of ATLANTIS Development SAS² – Sworn Court Expert (France)

¹Medical Center Perharidy, 29680 Roscoff, France & Dr. Alfred-Herrhausen-Allee 12, 47228 Duisburg, Germany

² ATLANTIS Développement SAS / 17, rue Edouard Corbière, 29 6809 Roscoff

frank.karg@hpc-international.com & frank.karg@atlantis-dd.com / Phone: +33 607 346 916 & +33 620 401 446

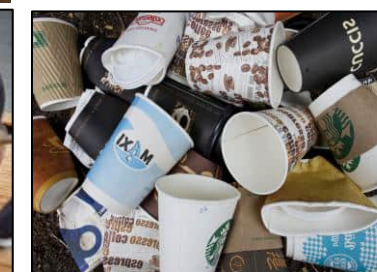
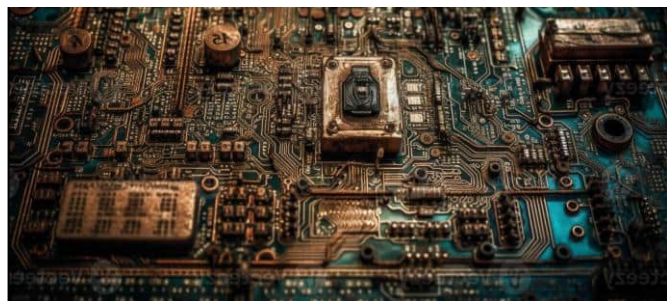


Production & Applications depuis 1960

- **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....**

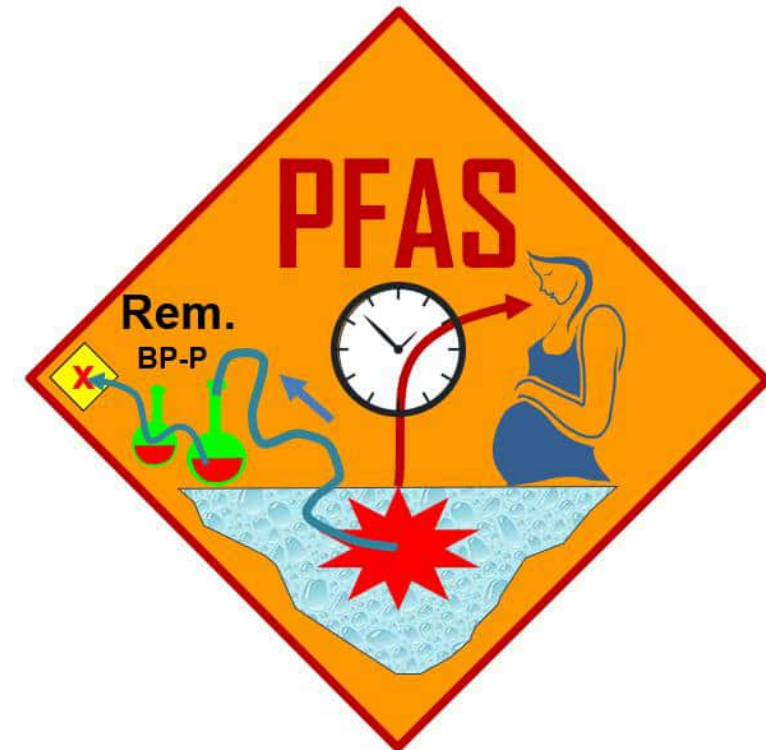


AFFF Use
Airport Fire Fighting Foams
(AFFF): Air Base BA 103



Introduction

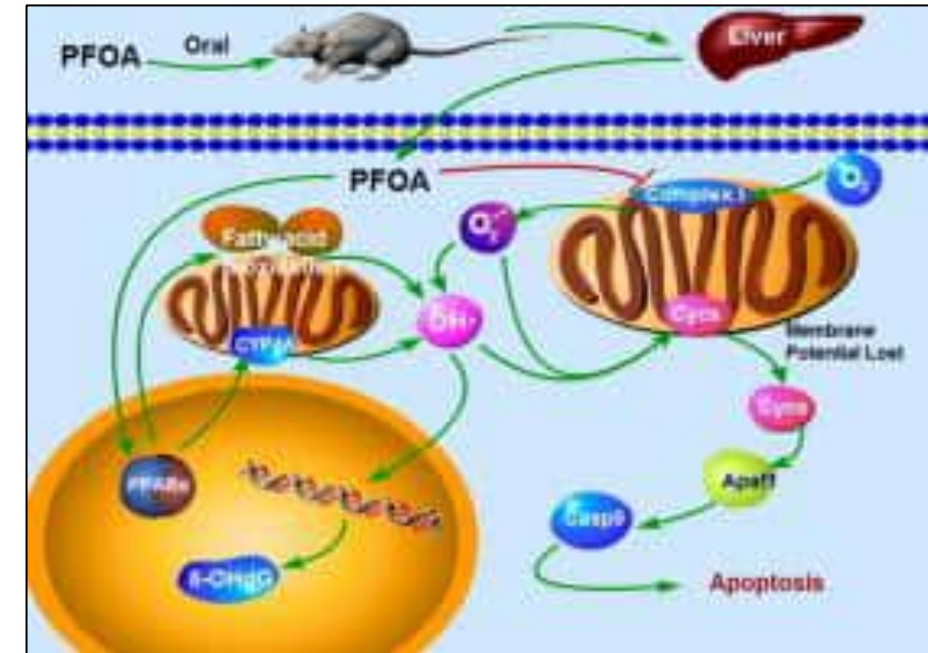
- En raison de leur Toxicité, leur grande Solubilité, de leur stabilité chimique, de leur mobilité dans l'environnement et de leur bioaccumulation les **12 - 15.000 PFAS** représentent une **préoccupation importante en ce qui concerne leur impact potentiel sur l'environnement et la santé.**
- Très peu des technologies de **dépollution in-situ** sont applicables aux PFAS **à part du lavage par des bio-polymères protéiniques** ou les **Béta-cyclodextrines....**



12 000 – 15 000
Substances PFAS

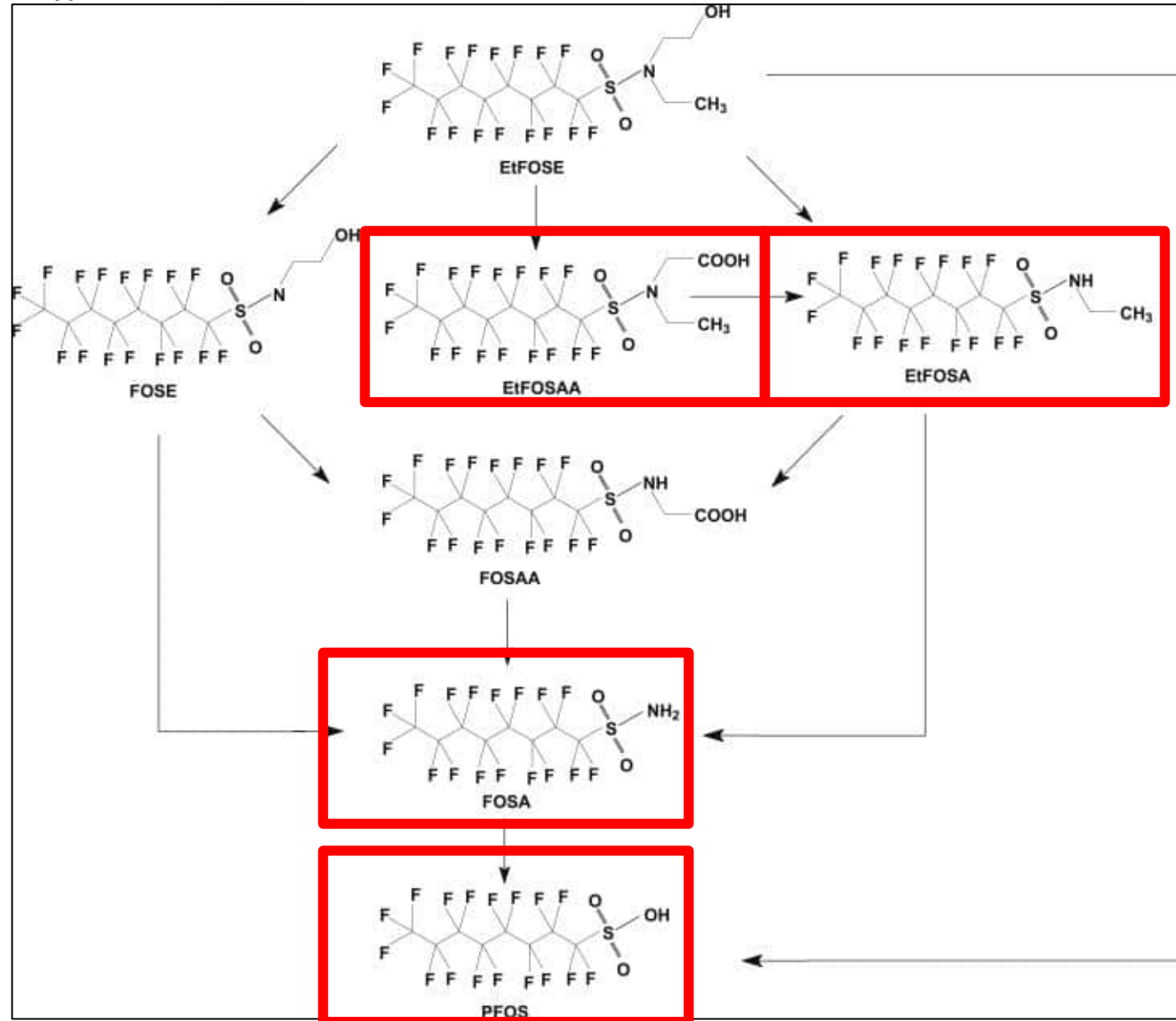
Toxicologie : Par ex. PFOA et PFOS:

- **Perturbations endocriniennes** (sur la production d'hormones stéroïde et la diminution des taux de testostérone, etc.), Reduction du développement des Fœtus : PFOS + FTOH (Alcools fluoro-télomériques),
- **Cancérogénicité**: Développements du Cancer des Seins & Testicules (PFOA...), Cellules épithéliales : PFOA + PFOS → blocage de l'apoptose !
- **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-Toxicity

(Kan Li et al. 2017)



PFAS: Chimie environnementale

**Bio-transformation
du EtFOSE, EtFOSA &
FOSA vers PFOS**

W. Zhang et al. 2021
S. Chen et al. 2021

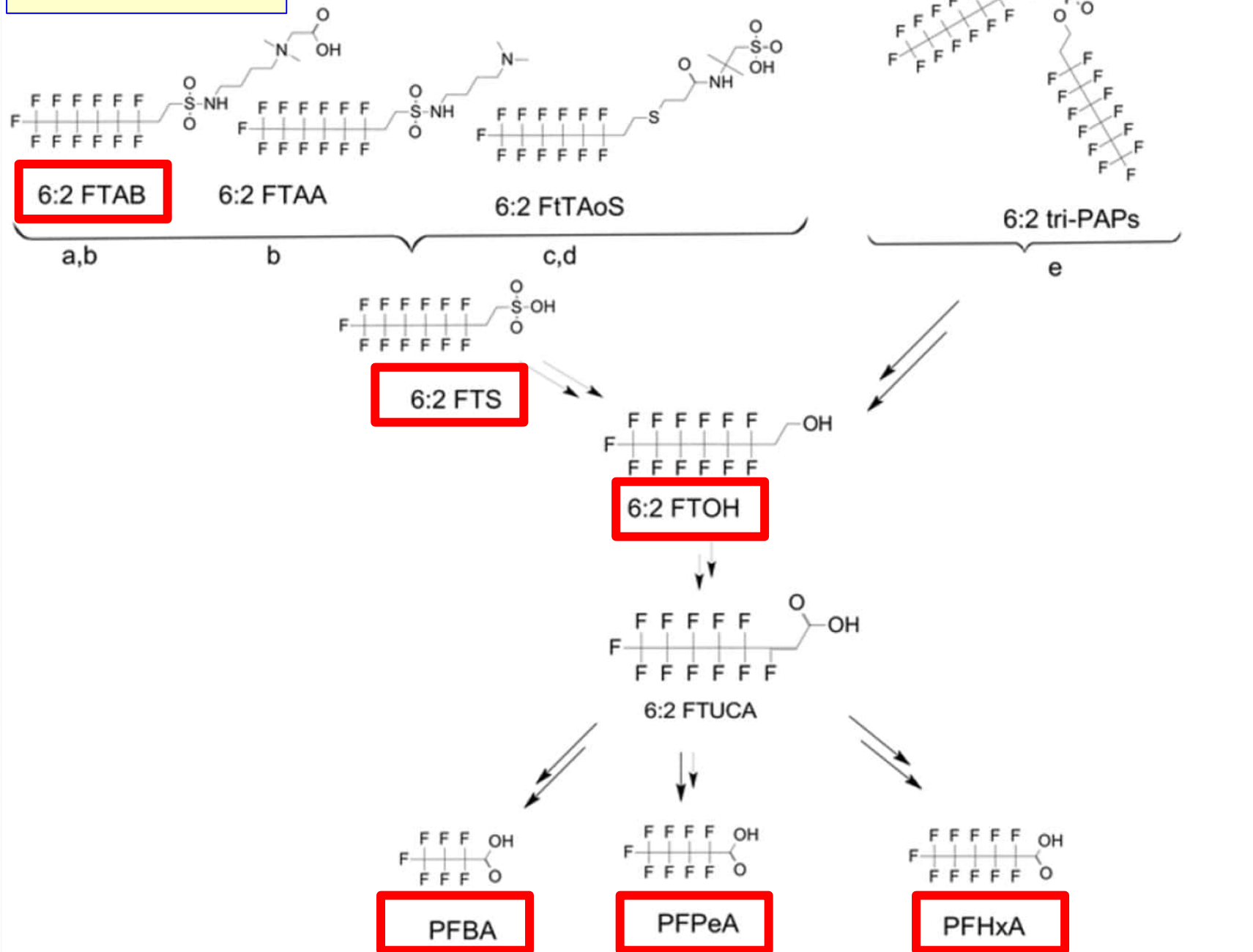
Scotchban FC 807 :

= 100 % (N-)EtFOSAA + (N-)EtFOSA

**Impregnation des papiers, cartons et
des textiles**

PFOS

6:2-FTAB



treatment of



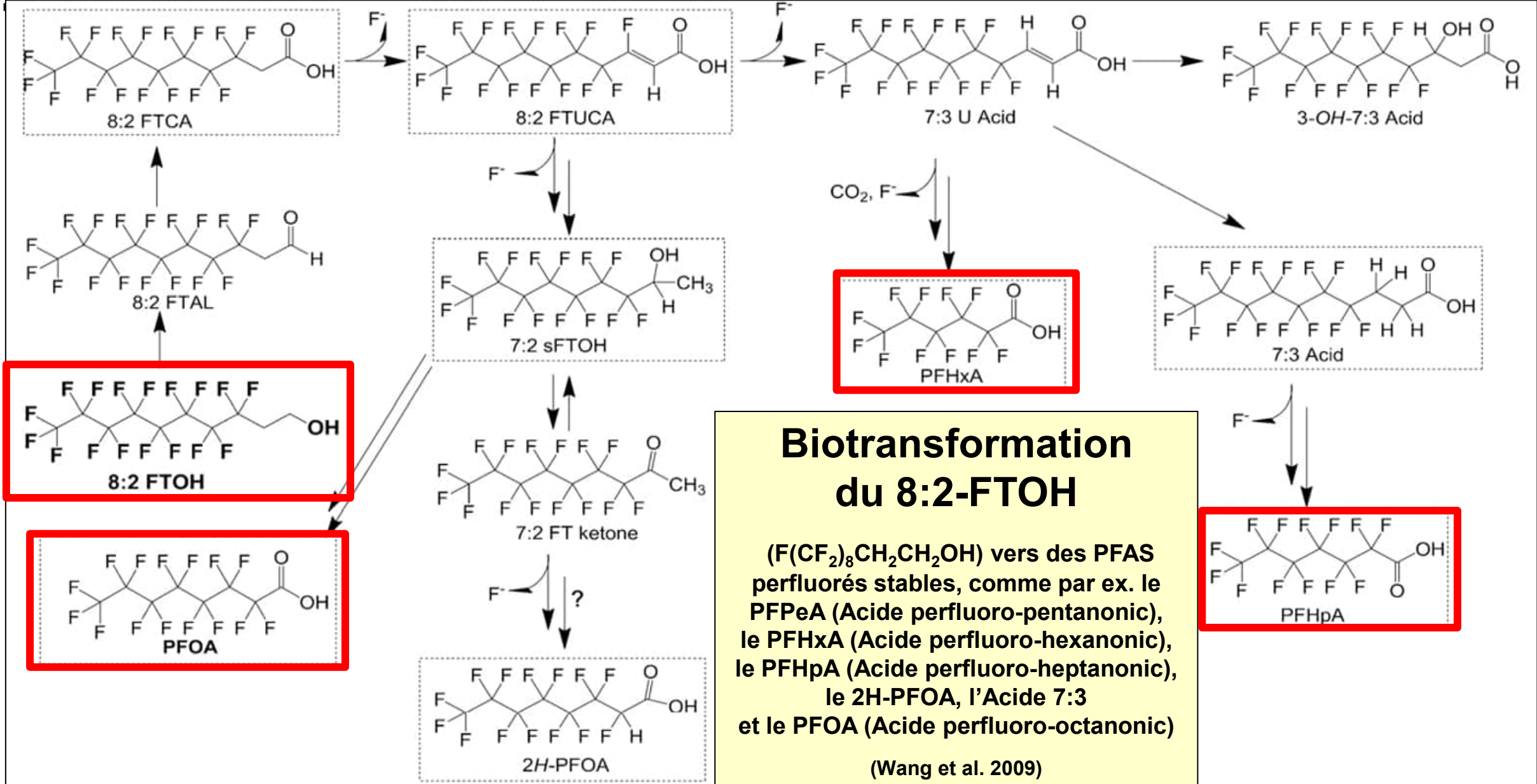
HPC INTERNATIONAL SAS



**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**

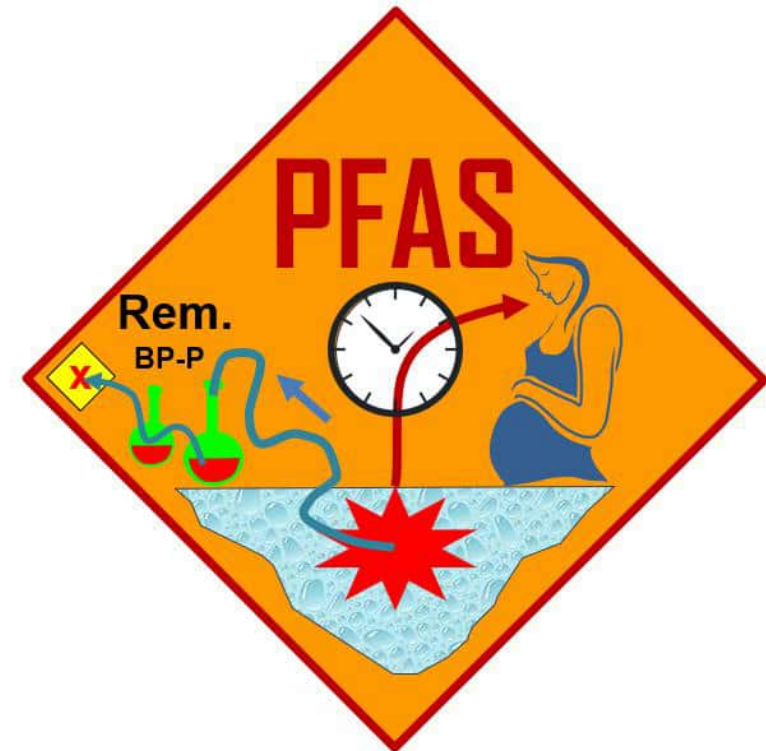
(LaFond et al. 2023, D.M.J.
Shaw et al. 2019 ,Ying Shi,
2018 et V. Mendeza et. al.
2022)

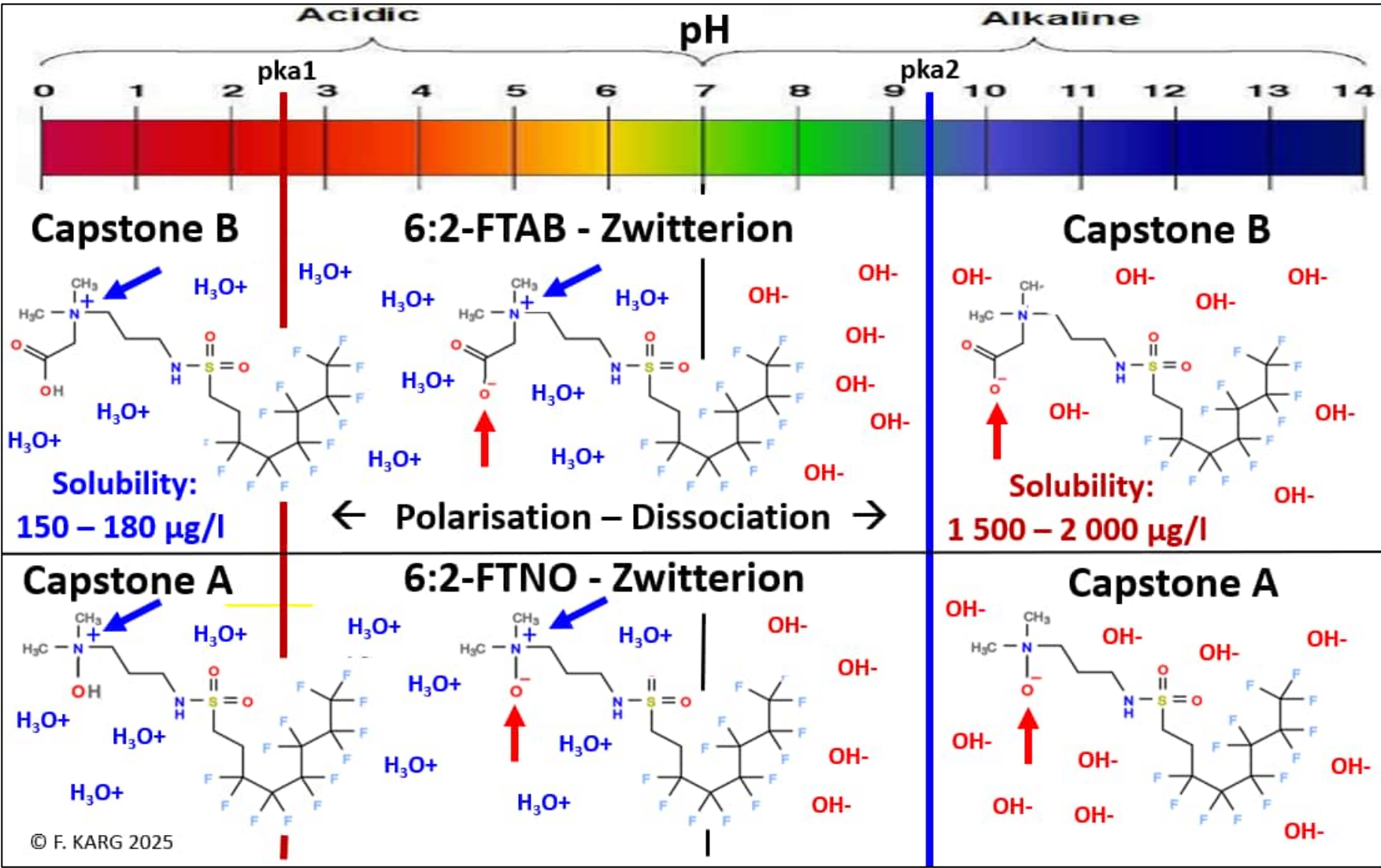
Combined in-situ Remediation of PFAS, via microbiological pre-treatment of Precursors and biochemical aquifer and soil elution



Mobilité et Solubilité des PFAS différents:

- Les PFAS poly-fluorés des types sulfobétaïnes et sulfonates: (N-)EtFOSA, (N-EtFOSAA), Capstones (6:2-FTNO, 6:2-FTAB, 6:2-FTS (ou H4PFOS) sont très difficiles à lessiver des sols (surtout en présence de minéraux argileux et sesquioxydes).
- Cette situation change suite à la biotransformation ou de l'oxydation de ces molécules en PFAS per-fluorées finaux; acides perfluoro-sulfoniques et -carboxyliques beaucoup plus solubles.
- Suite à l'oxydation microbiologique ou chimique la dépollution in-situ des sols saturés et non-saturés est plus facilement applicable via le lavage par des bio-polymères protéiniques ou les bêta-cyclodextrines....



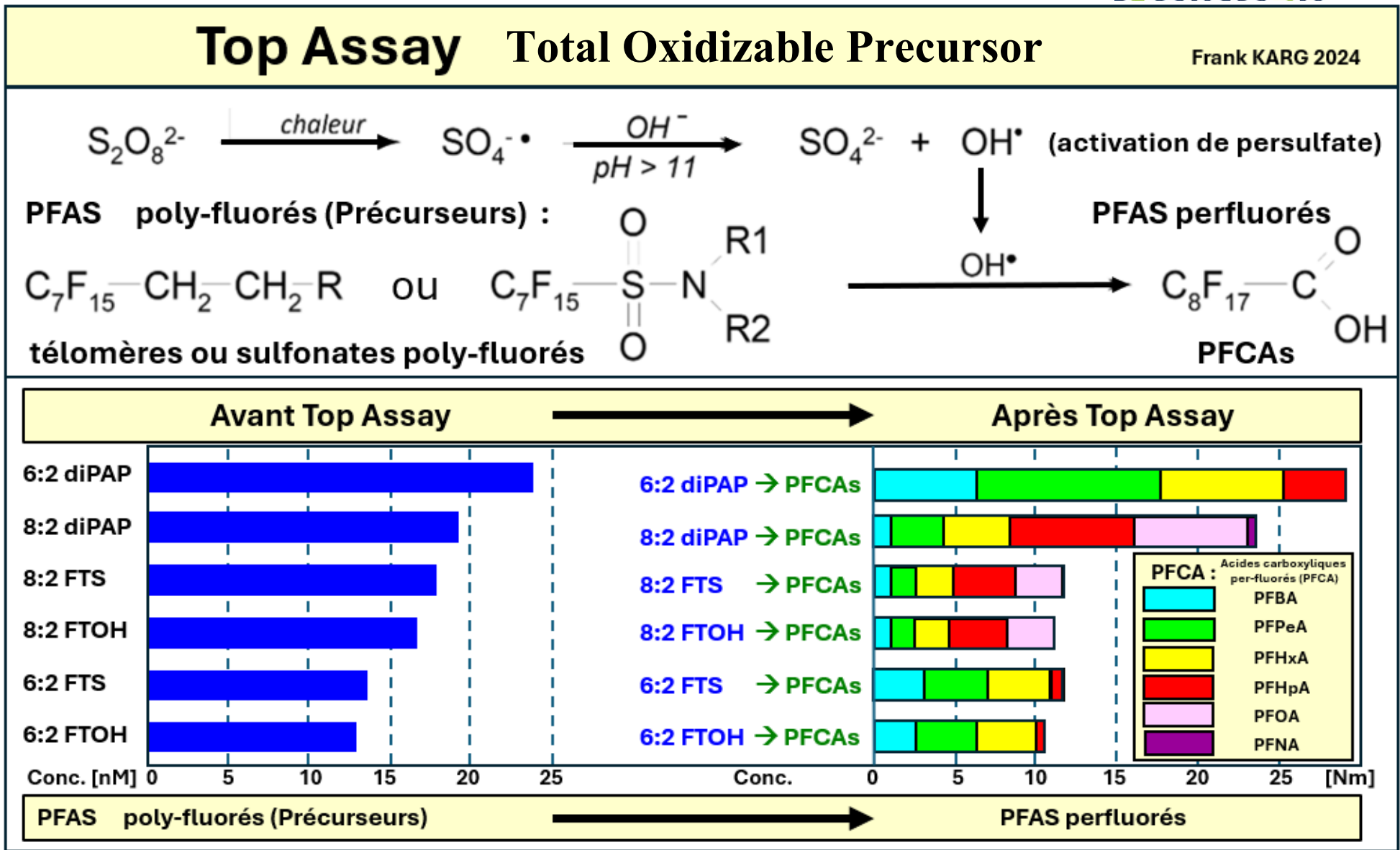


Environmental Chemistry according pH of Capstone A & B

Solubilization & Evaporation reinforced in alkaline conditions

Biotransformation via FTOHs reinforced in aerobic conditions

Prise en compte
de l'ensemble
des PFAS
poly-fluorés
transformables
en PFCAs per-
fluorés:

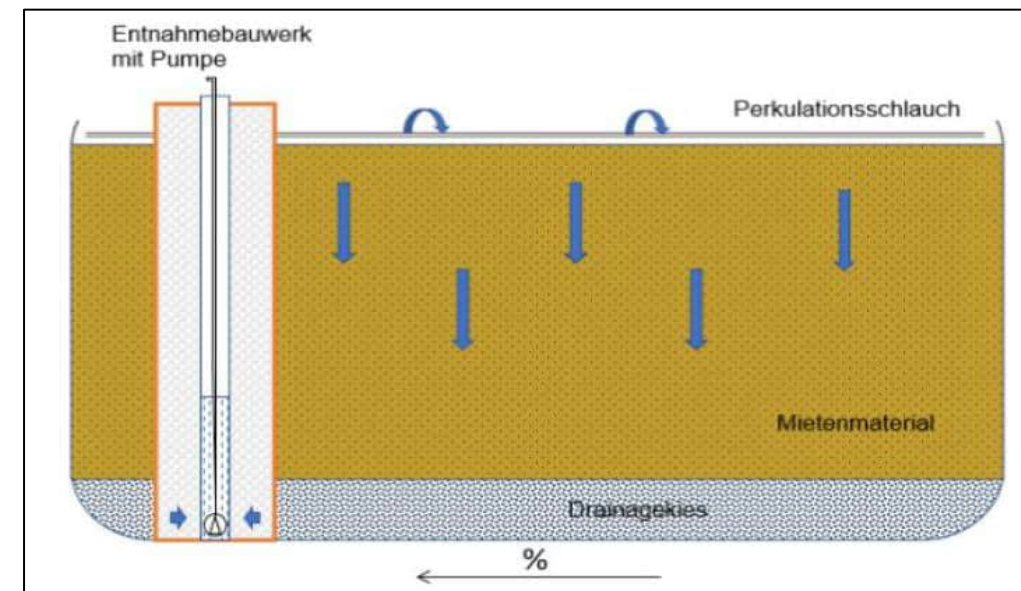
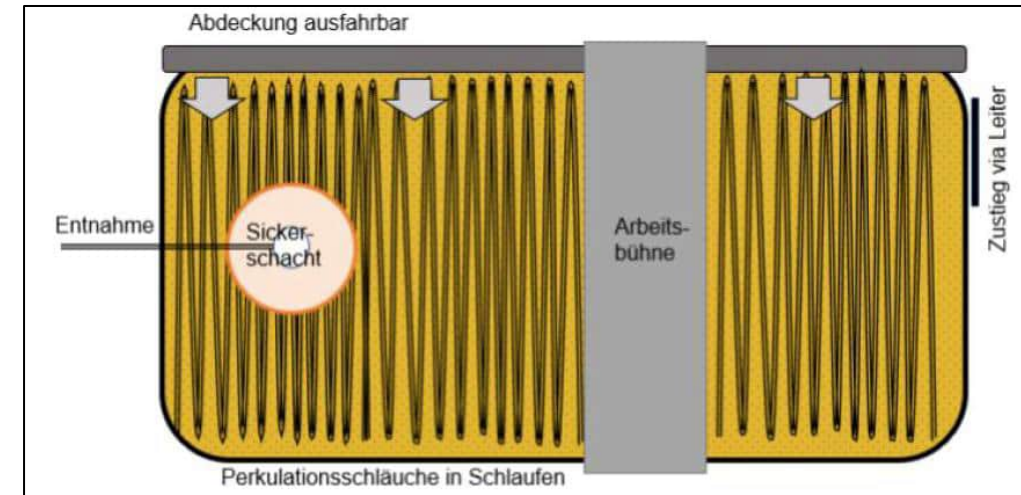
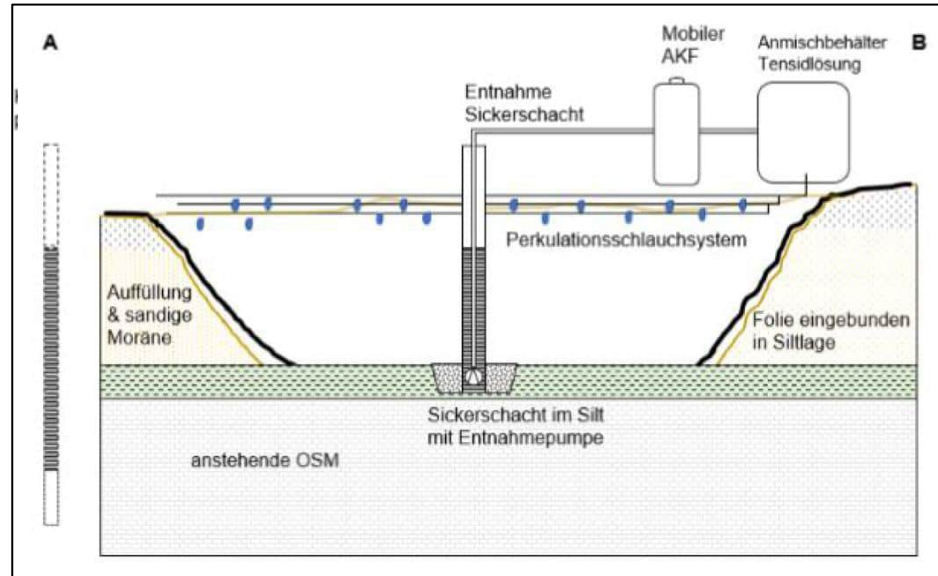


Tests Pilotes de lavages par percolation avec et sans mélanges des BPP : Bio-polymères protéiniques



Dispositifs de lavage in-situ sur un site à pollution AFFF et Scotchban/ EtFOSAA (HPC & Sensatec).

Lavages par percolation avec et sans mélanges des BPP : Bio-polymères protéiniques

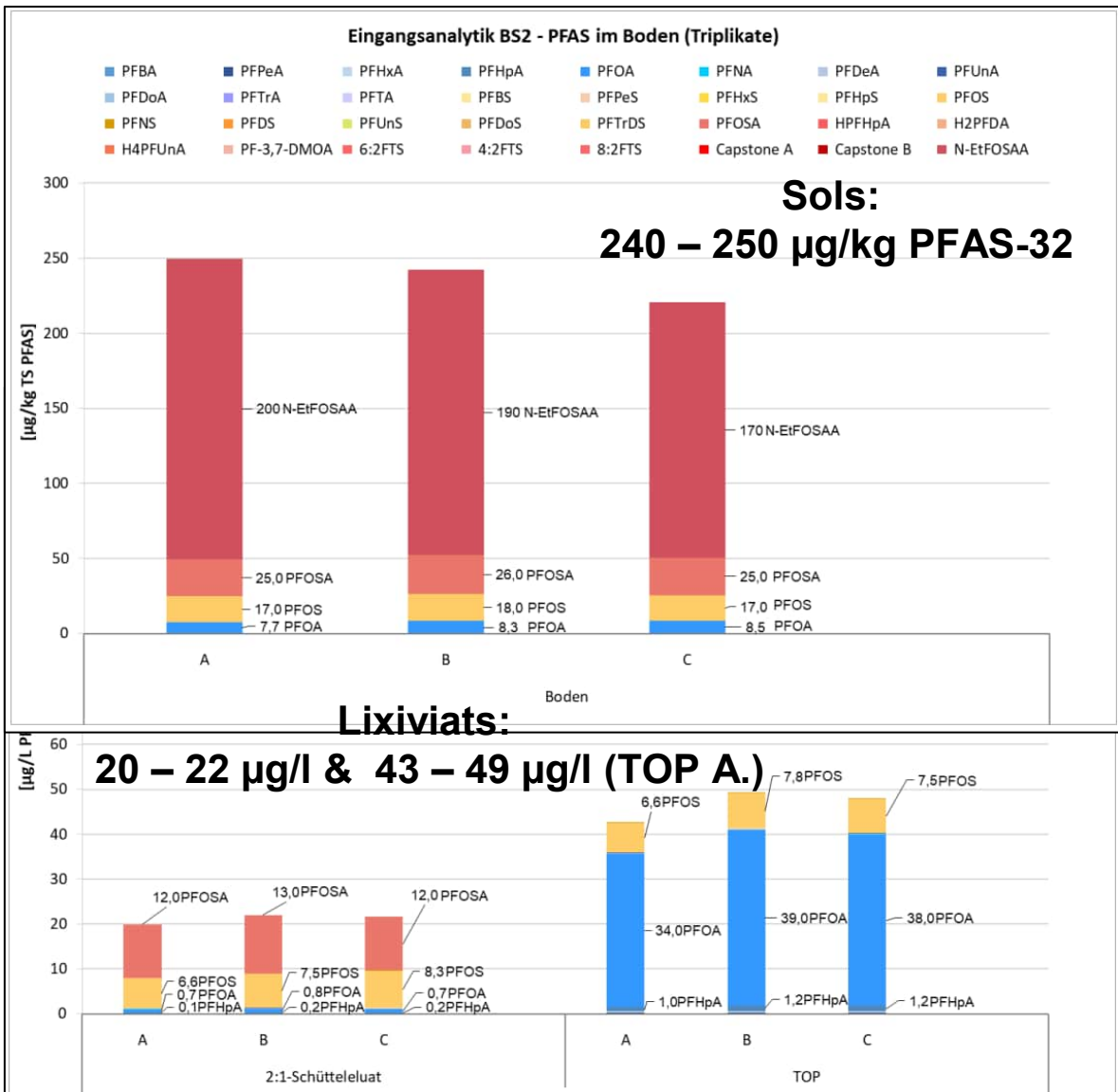
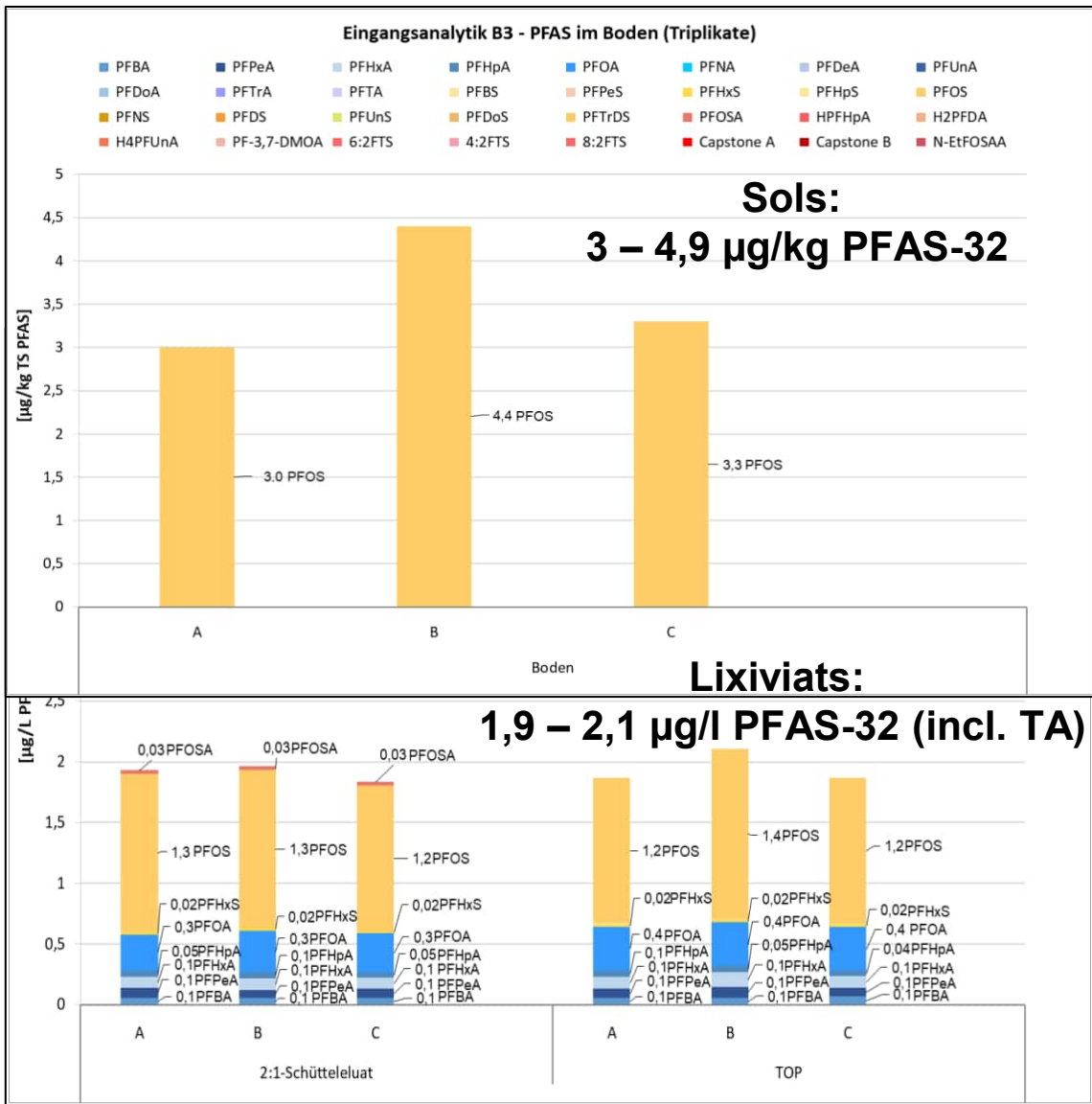


**Dispositifs de lavage in-situ sur un site à pollution AFFF et Scotchban (HPC & Sensatec).
Lavages par percolation avec et sans mélanges des BPP : Bio-polymères protéiniques**



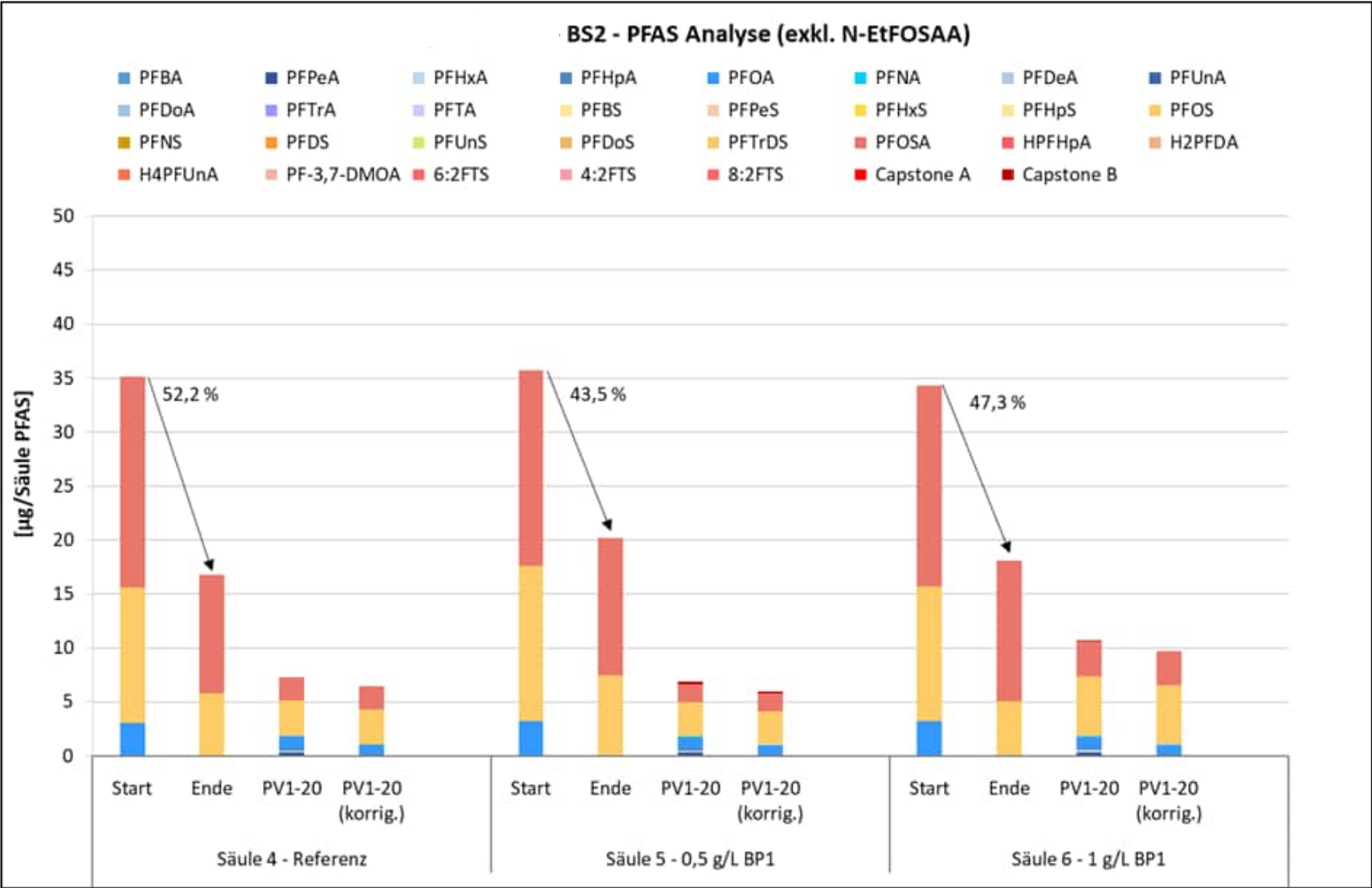
Combined in-situ Remediation of PFAS, via microbiological pre-treatment of Precursors and biochemical aquifer and soil elution

Concentrations en PFAS avant traitement par Elution via BP-P après 3 jours)



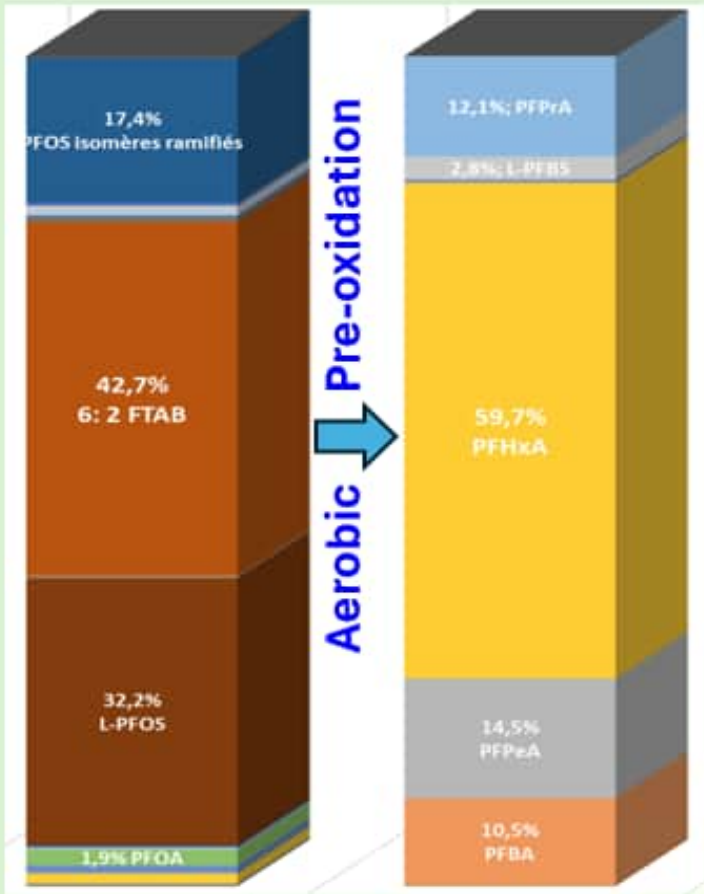
Rendements des lavages par percolation avec mélanges des BPP sans bio-oxydation au préalable.

Analyses des sols avant et après lavages, mesurés par nombres des volumes des porosités.

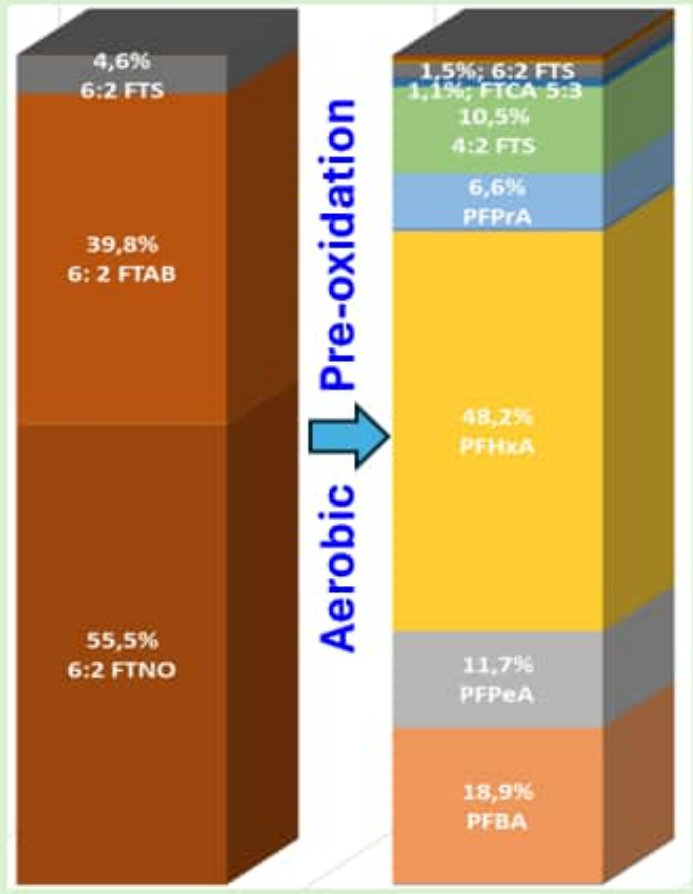


Combined in-situ Remediation of PFAS, via microbiological pre-treatment of Precursors and biochemical aquifer and soil elution

PFAS Contamination by Hydral 3 – AFFF before and after aerobic Pre-oxidation



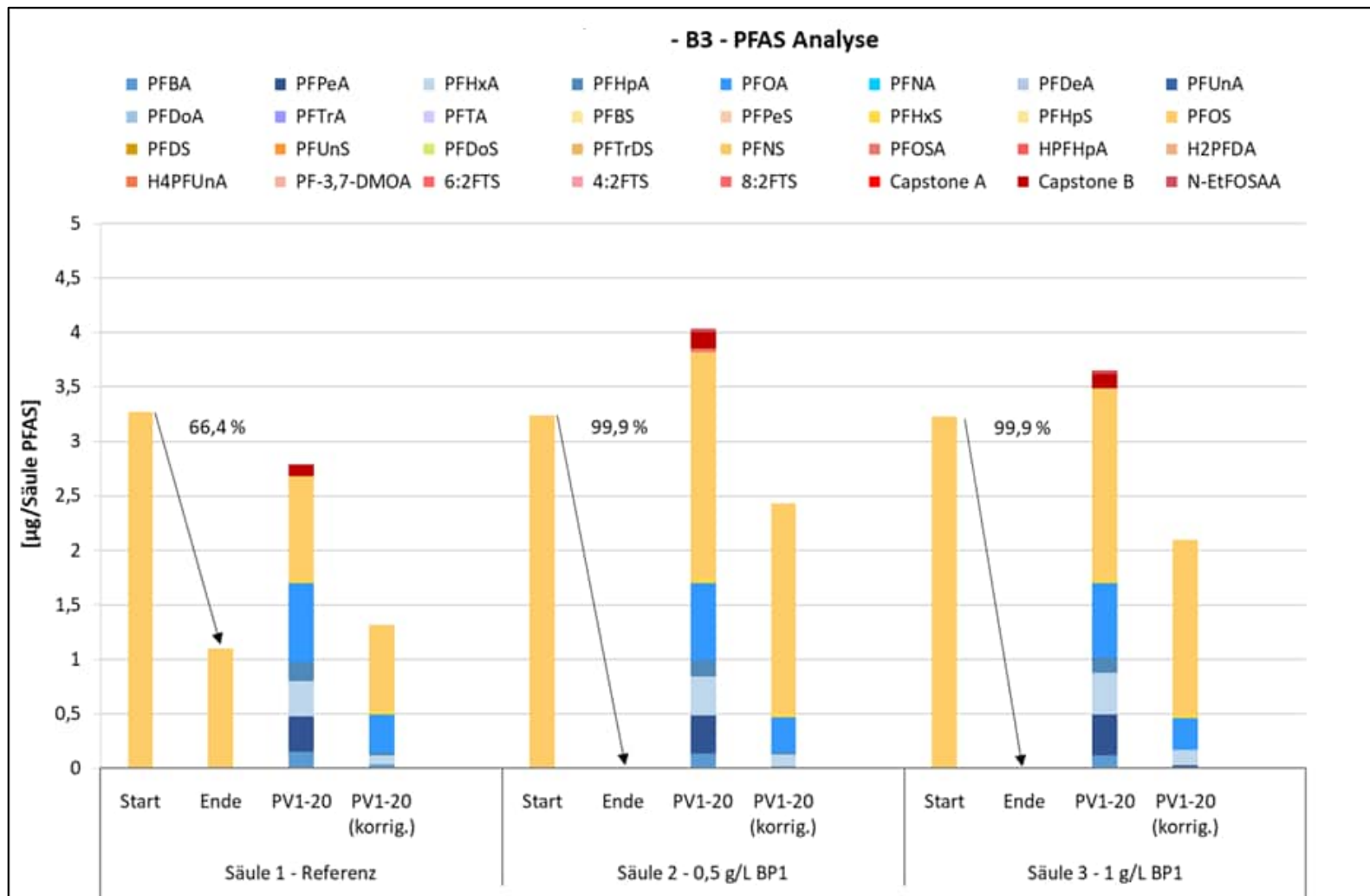
PFAS Contamination by Profilim – AFFF before and after Aerobic Pre-oxidation

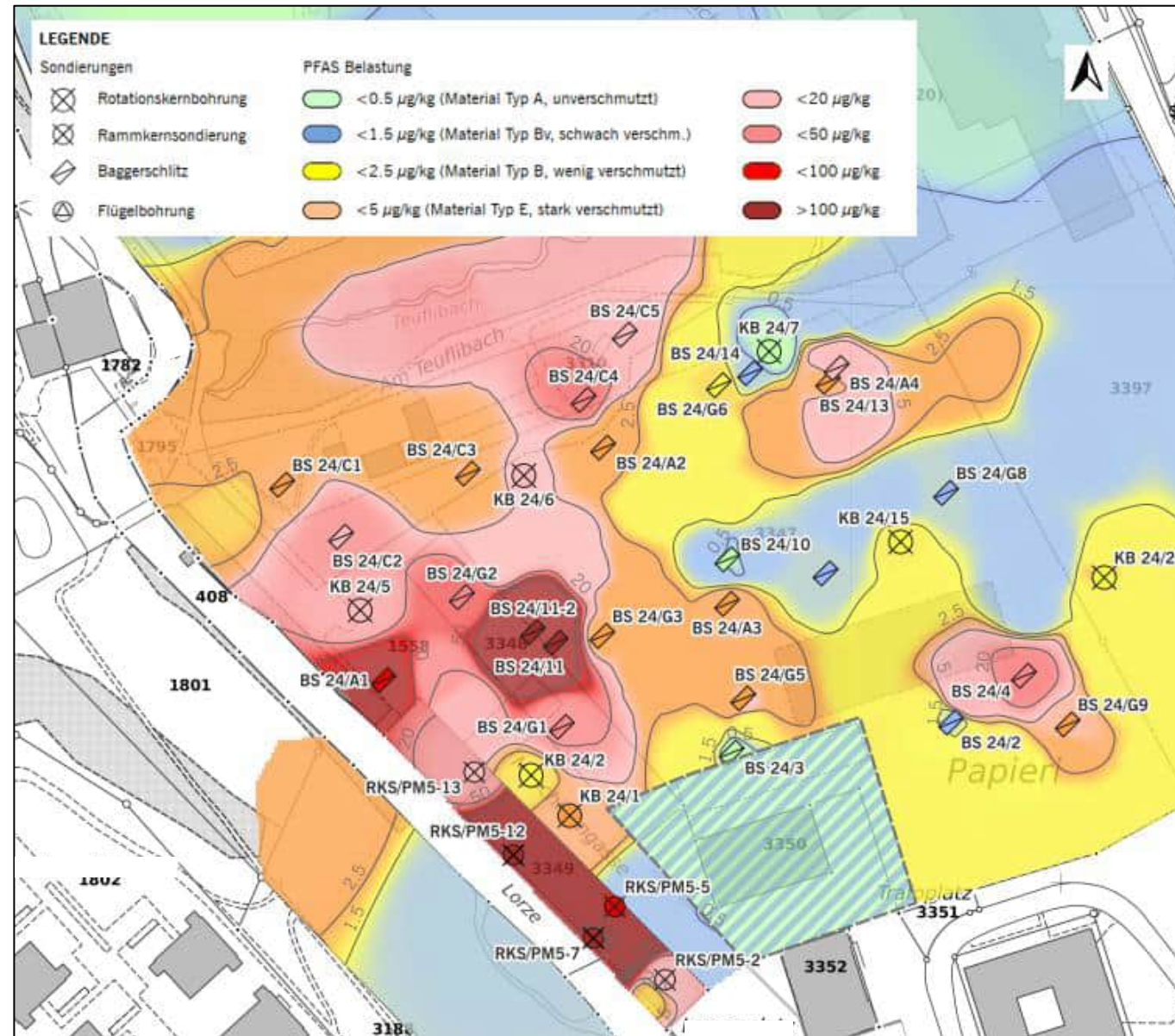


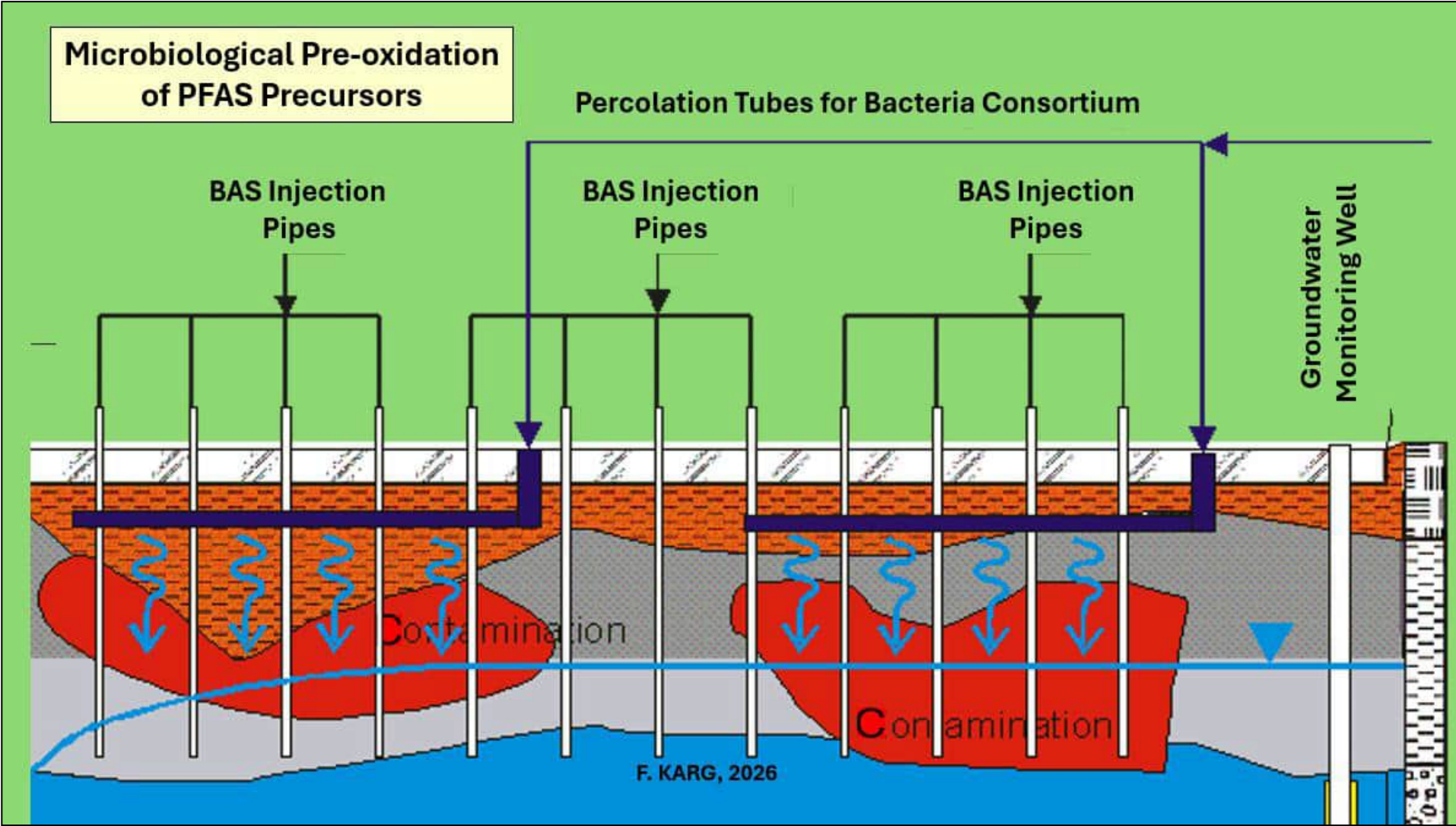
Lavages par percolation avec mélanges BPP : Bio-polymères protéiniques

+ MB pré-T.

Analyses des sols avant et après lavages, mesurés par nombres des volumes des porosités.



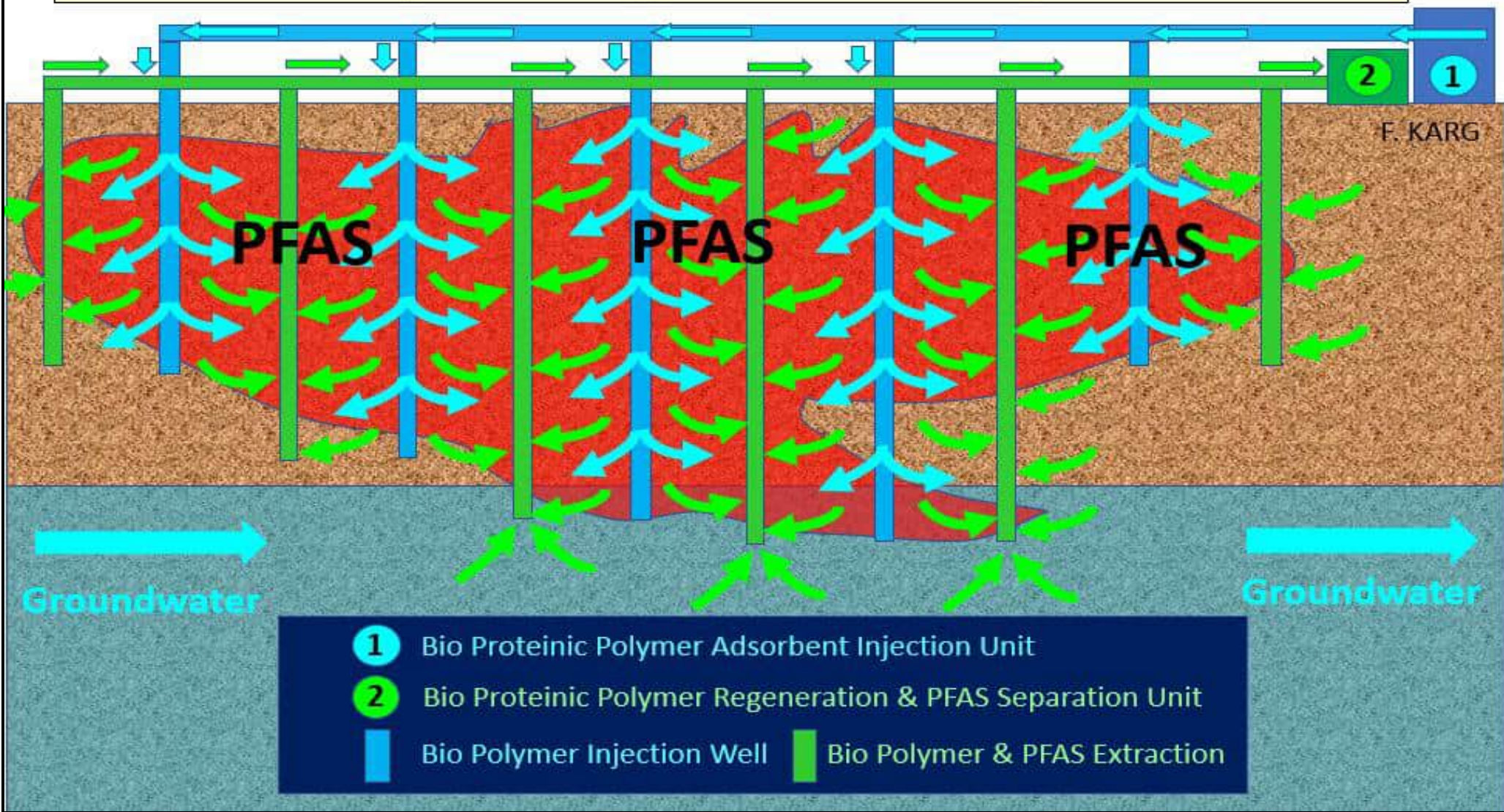




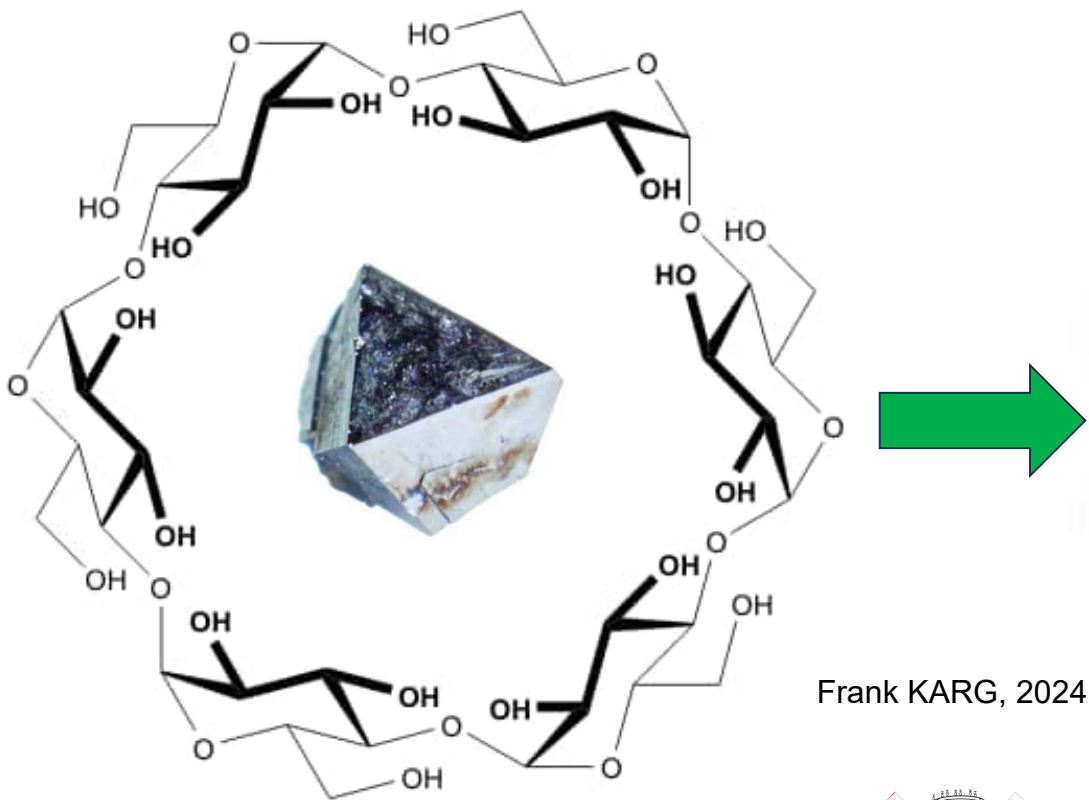
Prétraitement microbiologique aerobie par BAS, puis Lavages par percolation avec mélanges des BPP sans bio-oxydation au préalable



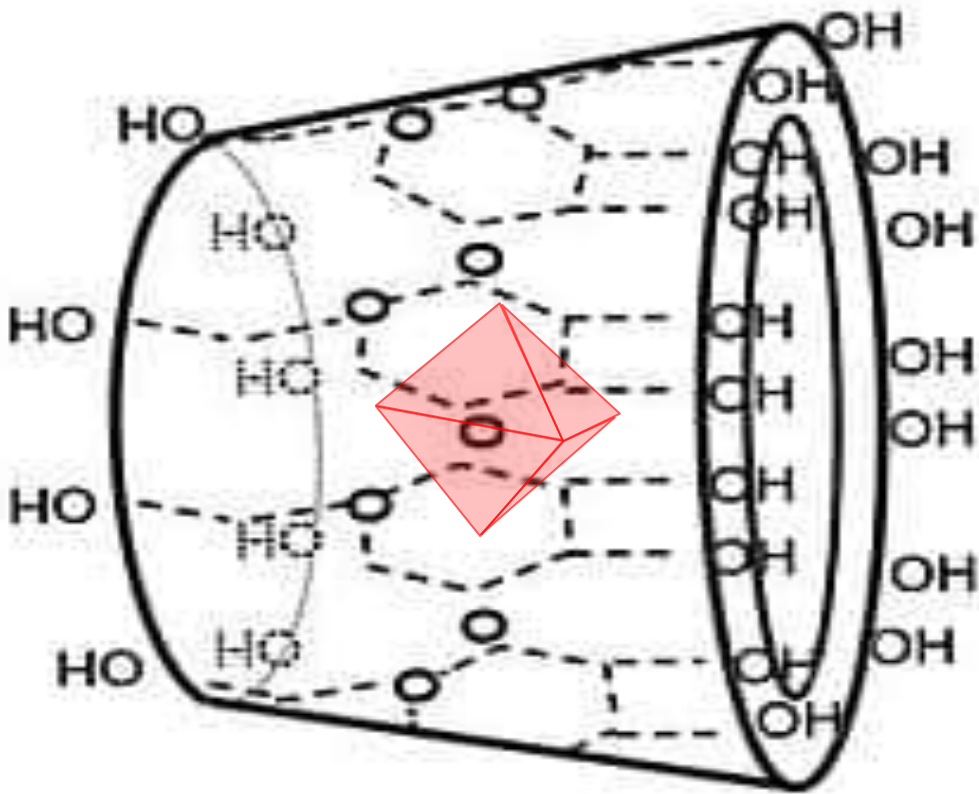
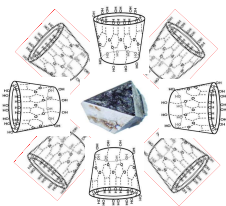
In-situ Soil & Aquifer Washing via Proteinic Bio-Polymer Adsorbents



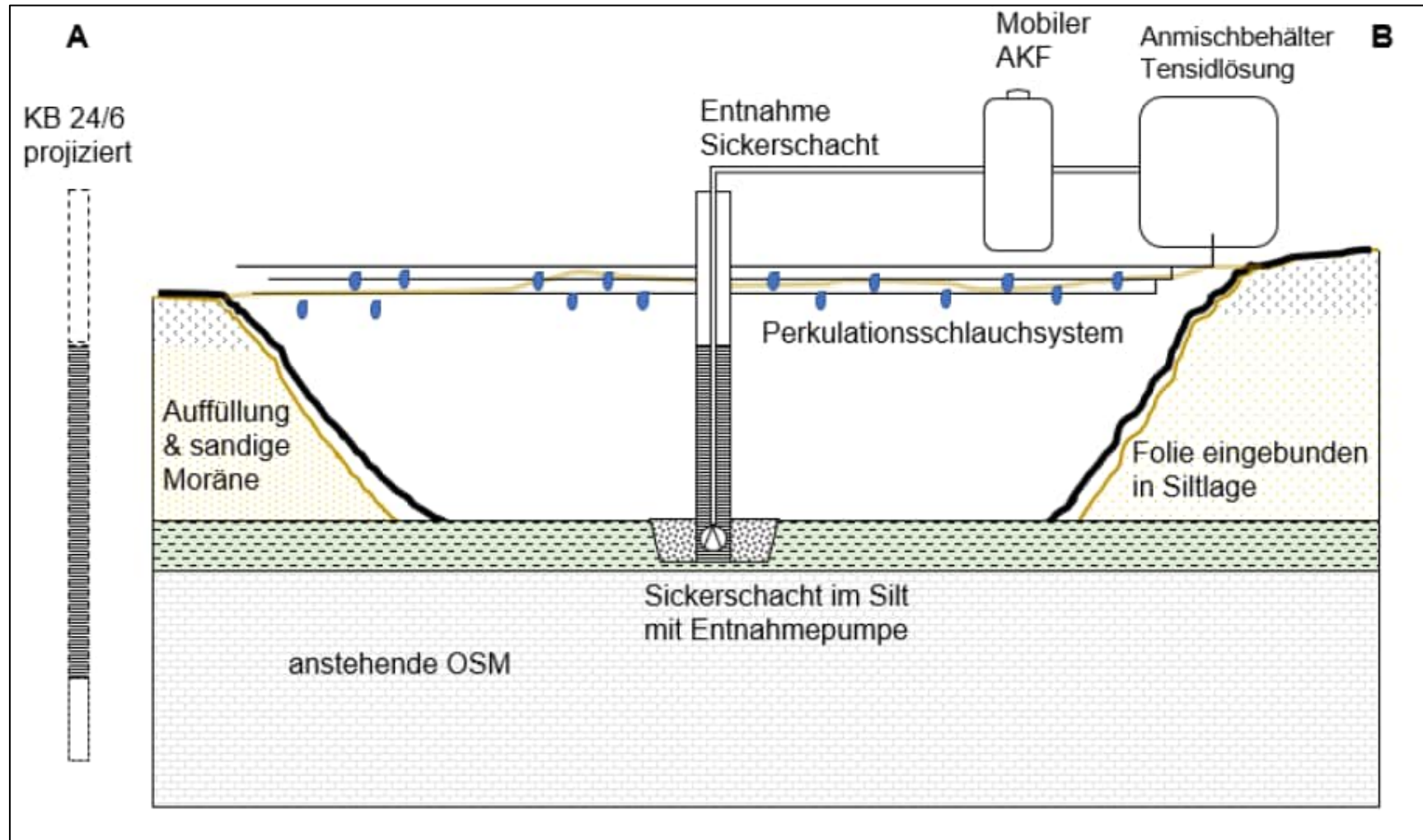
n-Magnetite Crystals coated by Tunnel - Beta-Cyclodextrins



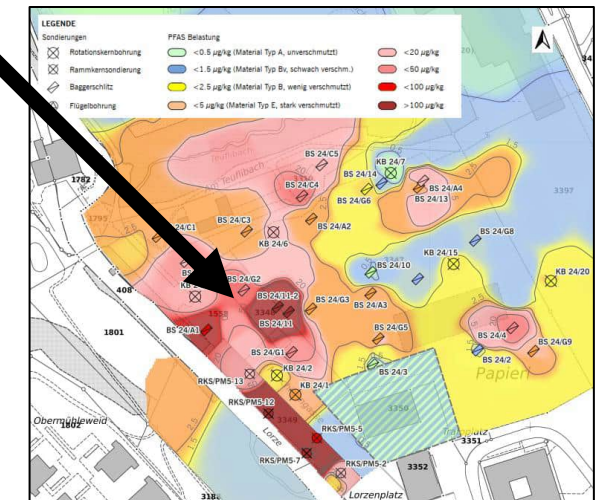
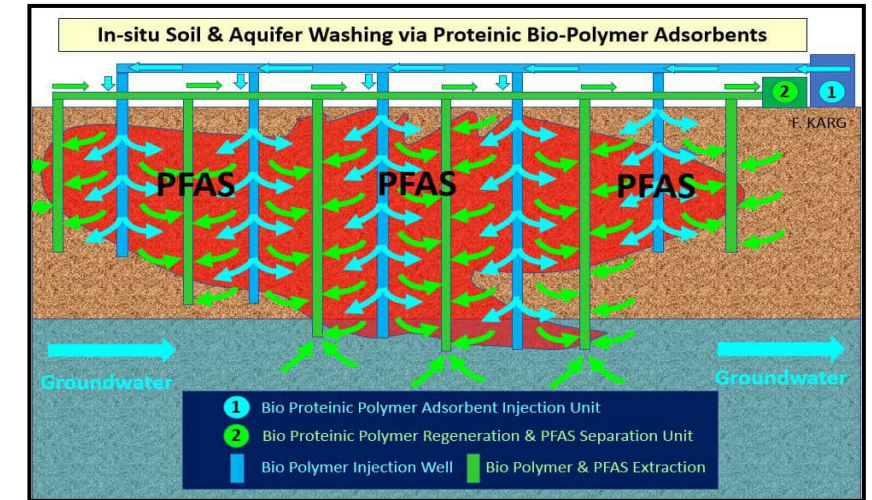
Frank KARG, 2024




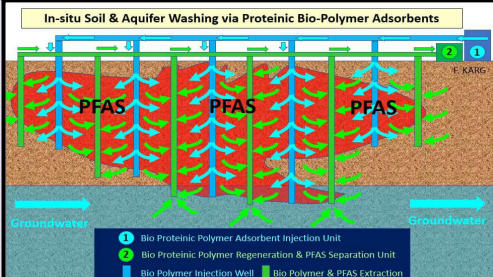


Lavage au BPP via percolation et récupération des eaux et traitement des ESO en même temps







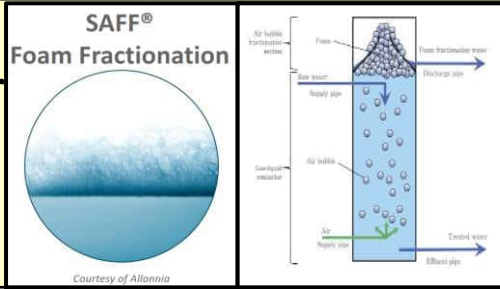
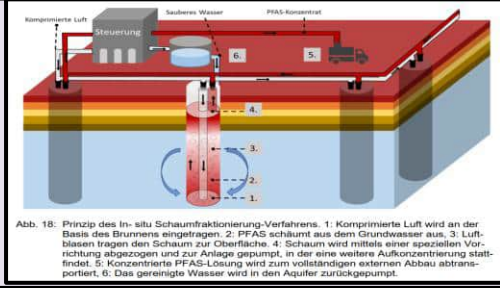
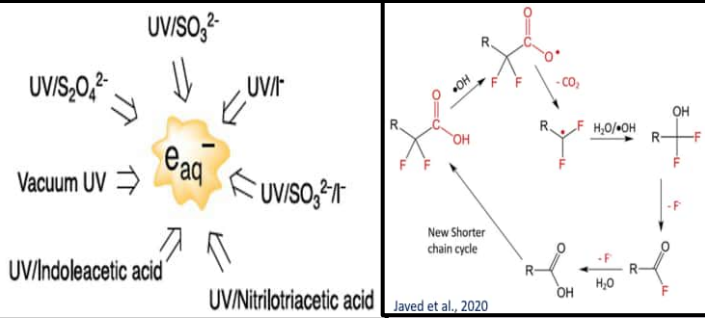
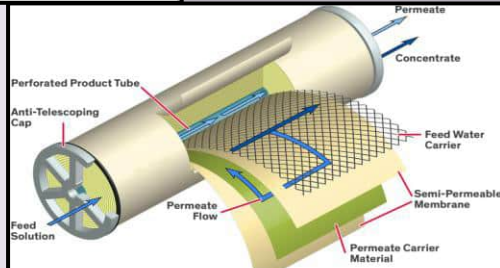
- Les acides carboxyliques perfluorés à chaîne courte (comme le PFBA, le PFPeA, etc.) peuvent être lavés des sols en utilisant simplement de l'eau comme ingrédient de lavage.
- Les acides carboxyliques (PFCA-I) à chaîne plus longue \geq C8 (PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, etc.) et les acides sulfoniques (PFOS, PFNS, etc.) sont moins mobiles.
- La technologie de lavage avec des bio-polymères protéiniques prouve clairement que les PFCA-longues et les Sulfonates & les Sulfobétaines peuvent être mobilisés au moyen des biotensides spécialement développés (BPP & béta-CDs).


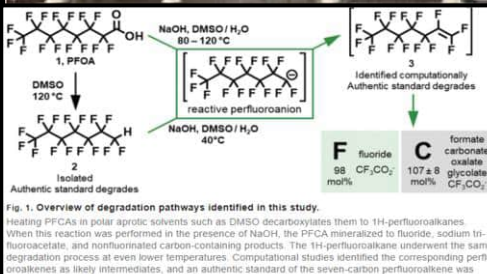
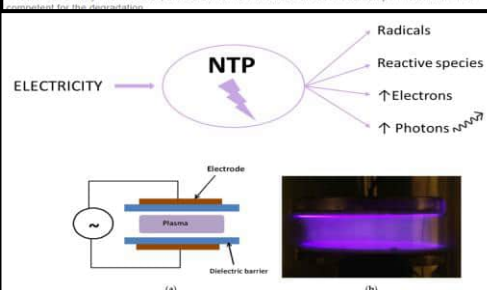
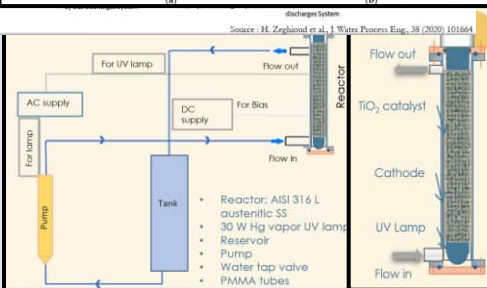


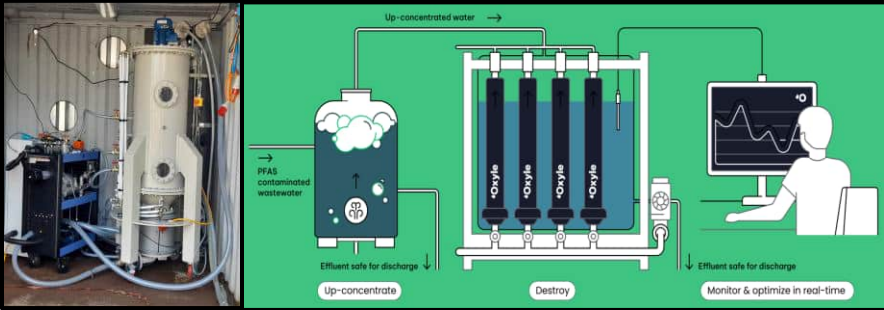
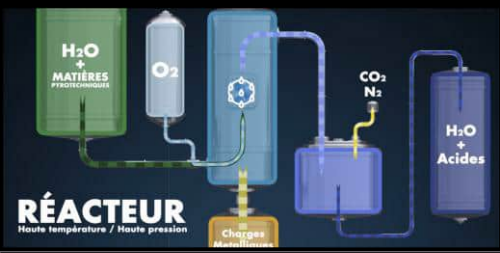

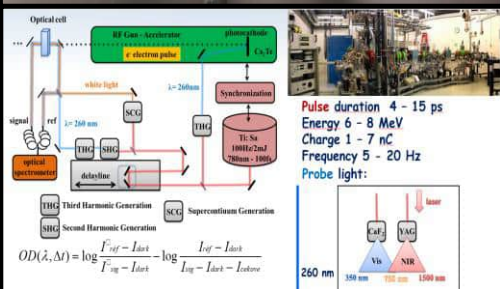
Matrice	Technologie		Advantage	Inconvénients	Remarques
5. Soil	On-site & off-Site: ➤ Thermal Desorption up to 1 200 °C: JACOBS – William DiGuseppi et al.		Relatively rapid Site Remediation.	Expensive. Needs excavation. No sustainable solution (off-gas, CO ₂ ...).	Lots of Authorities don't accept PFAS soils. https://www.enviro.wiki/images/5/50/DiGuseppi2019.pdf
6. Soil	Off-site: ➤ Incineration up to 1 200 °C		Relatively rapid Site Remediation.	Very Expensive. Needs excavation. No sustainable solution (off-gas, PFDD-F Emissions)	Lots of Incinerators don't accept PFAS contaminated soils.
7. Soil	In-Situ: ➤ Immobilization with colloidal activated carbon (CAC): Plume Stop/ Regenesis or MattCARE		In-situ-Site Remediation by injection of CAC.	A feasibility study must show the needed adsorption capacity & aquifer needs	Feasibility Study is needed concerning sub-soil conditions.
8. Soil & Aquifer	In-situ & ex-situ: ➤ In-situ soil Washing with proteinic Bio-polymers, beta-Cyclodextrines, etc.: Sensatec, HPC-INTERNATIONAL		Avoid excavation. Applicable for saturated & non-saturated Zones.	Needs technical-economic Feasibility Study.	Washing detergents or Agents must be tested.

Combined in-situ Remediation of PFAS, via microbiological pre-treatment of Precursors and biochemical aquifer and soil elution

Matrice	Technologie		Advantage	Inconvénients	Remarques
9. Soil	In-Situ & ex-situ: ➤ <u>Immobilization with Clays and Zeolites:</u> CETCO & ZEOCEL and by DND Biotech –Italy	Natural Modified Zeolites 	In-situ-Site Remediation by injection of Clays or Zeolites	A feasibility study must show the needed adsorption capacity & aquifer needs	Feasibility Study is needed concerning sub-soil conditions.
10. Water	Ex-situ: ➤ <u>Extraction by biodegradable Flocculant & Precipitation:</u> PerfluorAd / Cornelsen-TRS,	 <p>Courtesy of Cornelsen/TRS</p>	Efficient Water treatment, useable also for soil & sediment washing.	Needs P&T & technical-economic Feasibility Study (pH, salinity, co-pollutants + GAC Polishing ?...).	Different Agents must be tested.
11. Water	Ex-situ: ➤ <u>Modified Clay / Adsorbents:</u> CETCO & ETEC2: Fluorosorb		Efficient Water treatment.	Needs P&T & technical-economic Feasibility Study (pH, salinity, co-pollutants...).	Different Agents must be tested.
12. Water	Ex-situ: ➤ <u>Ion Exchange Resins (IX)</u> Lewatit® TP 108 DW (+for short PFAS) & Lewatit® K 6362 (Wastewater) & Lewatit® MP 62 WS/LANXESS, Sorbix A3F resin & Sorbix LC4 & Sorbix RePure LC / ETEC₂, Purofine® PFA-694 & Purofine®- PFA694E/ Pyrolite & ECOLAB, Amberlite PSR2 Plus / DuPont, CalRes 2301/Calgon Carbon Corp., SIR-110-HP/ Resin Tech Inc., Fluoro-Sorb® / CETCO, RemBind™ / ZILTEC		Efficient Water treatment if pH is not alkaline. Depends on salinity, co-pollutants.	Needs P&T & technical-economic Feasibility Study: pH, salinity, co-pollutants, GAC needs, ?	Different Agents and IX (mixtures) must be tested. A: Single used IX: → Incineration need B: Regenerable IX → With alkaline pH

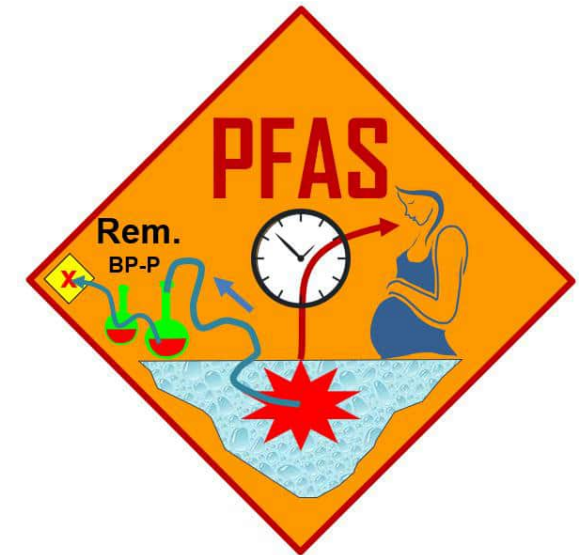
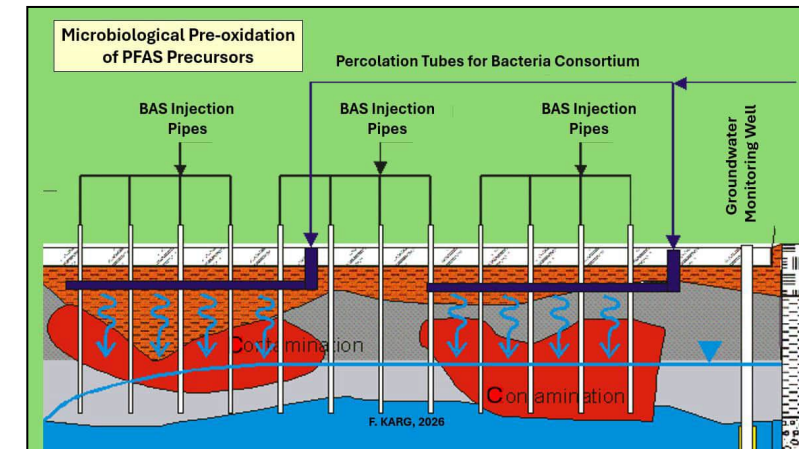
Matrice	Technologie		Advantage	Inconvénients	Remarques
13. Water	Ex-situ:	<p>➤ Foam Fractioning / Air-Water Interface Foam / Concentration in Bubble Interfaces: ALLONIA, SAFF®, etc.</p> 	Efficient Water treatment, useable also for soil & sediment washing.	Needs technical-economic Feasibility Study. Principally for PFAS > C6.	Different Agents must be tested.
14. Water	In-situ:	<p>➤ Downhole Foam Fractioning: OPEC Systems / Australia</p>  <p>Abb. 18: Prinzip des In-situ Schaumfraktionierungs-Verfahrens. 1: Komprimierte Luft wird an der Basis des Brunnens eingetragen; 2: PFAS schäumt aus dem Grundwasser aus; 3: Luftblasen tragen den Schaum zur Oberfläche; 4: Schaum wird mittels einer speziellen Vorrichtung abgezogen und zur Anlage gepumpt, in der eine weitere Aufkonzentrierung stattfindet; 5: Konzentrierte PFAS-Lösung wird zum vollständigen externen Abbau abtransportiert; 6: Das gereinigte Wasser wird in den Aquifer zurückgepumpt.</p>	Potentially Efficient Water treatment.	Needs P&T & technical-economic Feasibility Study.	Only one provider in 2024
15. Water	Ex-situ:	<p>➤ Photolysis by UV/ H₂O₂ / Advanced Reduction Process (ARP): Tree Water</p> 	Mineralization via hydrated OH-Radicals.	Experimental Status in 2024. Needs technical-economic Feasibility Study.	Creation of hydraed electrons (e ⁻ _{aq}).Pro-duction by adding a reducing agent (iodides, thiosulfate, sulfite, etc.).
16. Water	Ex-situ:	<p>➤ Reverse Osmosis (RO): (Wastewater): SIMPEC (+SARPI-VEOLIA)</p> 	Efficient Water treatment in dependance of organic load.	Needs P&T & technical-economic Feasibility Study (organic Imoad, etc.).	10mS·cm ⁻¹ -conductivity and a total organic carbon concentration of 1100 mg·L ⁻¹ could be treated by RO

Matrice	Technologie		Advantage	Inconvénients	Remarques
17. Water	Ex-situ (+ in-situ injections): ➤ <u>Activated Carbon (GAC), Powdered Activated Carbon (PAC) & Biochars</u> : Purolite, etc. (+Sensatec)		Efficient Water treatment depending of pollutant Cocktail (ultra short PFAS ?)	Needs technical-economic Feasibility Study: pH, salinity, co-pollutants, + GAC needs?	Different combinations (+ Adsorption Resins ?) must be tested.
18. Water	Ex-situ: ➤ <u>Low Temperature Mineralization – Decarboxylation & Defluorination</u> (80° - 120°C – Heating with NaOH & DMSO Solv.		Efficient Water treatment in Dimethyle-sulfoxide, useable for soil & sediment washing.	Needs technical-economic Feasibility Study. Commercial Availability not granted.	Advanced Research Status: Brittany TRANG et al. 2022 (https://www.science.org/doi/10.1126/science.abm8868).
19. Water	Ex-situ: ➤ <u>Non-Thermal Plasma (NTP) Destruction</u> : Tectero BV / Belgium LSPM / Sorbonne		Efficient Water treatment under conditions.	Needs technical-economic Feasibility Study (Co-polluants, alkanity...?). Electricity Costs ?	Advanced Research Status with pilots (2024).
20. Water	Ex-situ: ➤ <u>Photo-electrocatalytic Advanced Oxidation (PEC) Processes</u> : Capture – Italia		Efficient PFAS Destruction & Mineralization Process (> 99 %).	Needs technical-economic Feasibility Study: pH, salinity, co-pollutants. Pilot exist(2024).	Usable for contaminated Groundwater and for WWTP (Wastewater Treatment Plants).

Matrice	Technologie		Advantage	Inconvénients	Remarques
21. Water	Ex-situ: ➤ Catalytic Remediation: Oxyle/CIMO		Efficient PFAS Destruction & Mineralization Process (> 99 %).	Needs technical-economic Feasibility Study: pH > 7, salinity, co-pollutants, Catalysts Case Studies exist.	Case Studies in Switzerland (2024).
22. Water	Ex-situ: ➤ Supercritical Destruction: ELIXIR / Arianne Group		Efficient Water treatment for all kind of organic pollutants.	Needs technical-economic Feasibility Study (Co-pollutants, alkanity...?). Very expensive / Electricity Costs !	Advanced Research Status with some references (2024).
23. Water	Ex-situ & in-situ: ➤ Sonolysis (Ultrasonic): SERDP – ESTCP Craig Divine, Ph.D. / Sonolysis in Situ Reactor for Treatment within an HRX well https://serdp-estcp.mil/projects/details/b178d35c-2f5a-443b-a2d1		Efficient Water treatment by 700-kHz sonolysis	Needs technical-economic Feasibility Study (Co-pollutants, etc.).	some references (2024). HRX-well (low permeability) P.R. Kulkarni . 2022 https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0002064
24. Water	Ex-situ (& in-situ): ➤ Ionization Radiation / Radiolysis / E-Beam (e⁻)... : Univ. Paris-Saclay / CNRS /Mehran MOSTAFAVI, IBA, etc. https://www.inc.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/comment-booster-la-degradat		Efficient Water treatment by 6 – 8 MeV RaAdiolysis	Needs technical-economic Feasibility Study (Co-pollutants, etc.).	Research Status (2024). HRX-well Mehran MOSTAFAVI: 2024 https://www.inc.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/comment-booster-la-degradation-des-pfas-par-radiolyse

Conclusion :

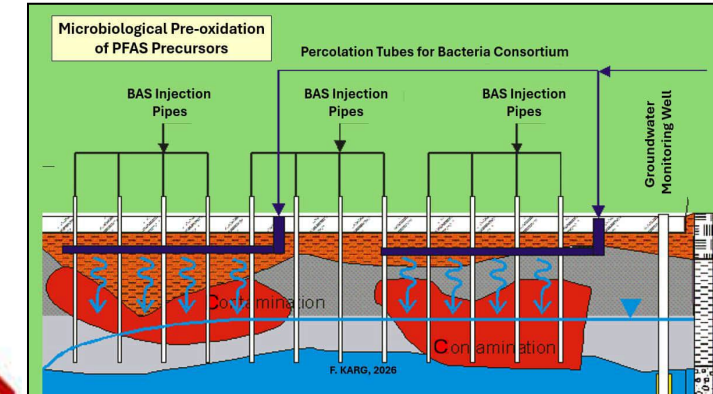
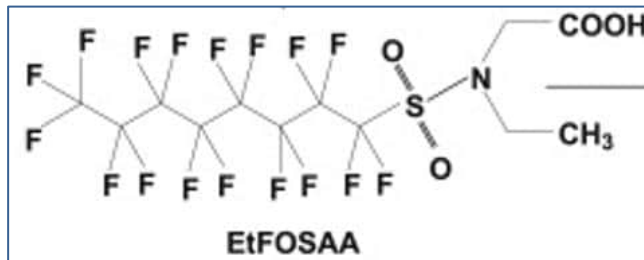
- Des tests lysimétriques et sur le terrain ont montrés qu'une réduction de 99,9 % de la concentration en PFAS dans le sol est obtenue en appliquant la nouvelle technologie de lavage aux BPP + oxydation microbiologique ou chimique. Sans ce prétraitement les PFAS-Sulfonates et Sulfobétaïnes pourront être récupérés seulement à 43 – 52 %.
- Des applications sur le terrain ont permis de réduire les concentrations de PFAS de plus de 80 – 90 % en l'espace 1-3 semaines.
- En comparaison par une analyse « coût-avantages », les traitements de lavage in-situ ou on-site sont environ 30 – 40 fois moins chers que les excavations et éliminations ou le P&T : Pump and Treat des ESO en milieu de l'aquifère (sols saturés).
- La technologie est également applicable aux PFAS volatiles, comme les FTOH (alcools fluorotélomères, etc.).
- Les des études de faisabilité technico-économiques et tests au laboratoire et sur le terrain (Tests pilotes) sont nécessaires.





Merci !

**Questions ?
Remarques ?**



Dr. (PhD) Frank Karg
CEO-President of HPC INTERNATIONAL
CEO- President of ATLANTIS Développement

Email: frank.karg@hpc-international.com / +33 607 346 916
frank.karg@atlantis-dd.com / Phone: +33 620 401 446

