

upds

Gestion des PFAS ultracourts : de la caractérisation au traitement

*Christophe Barnier**, PhD, WSP, France

Isabelle Delsarte, PhD, WSP, France

Eva Martin, WSP, France

Frédéric Marias, PhD, Association Record, France

wsp

2025/10/09



1- Introduction et contexte

- **Substances PFAS :** Connaissance encore partielle, freinée par un cadre réglementaire limité et peu de valeurs de référence hors eau potable, ce qui réduit la surveillance dans d'autres matrices.
- **TFA, le composé ultracourt le plus médiatisé :**
    - **Persistance** ;
    - **Omniprésence** dans l'environnement (ressources en eau) ;
    - **Concentrations élevées relevées**

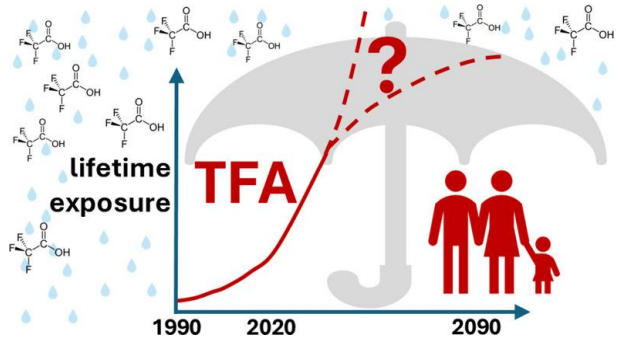
Le Monde Publié le 01 octobre 2025

PFAS : bataille en coulisses à Bruxelles pour définir la dose journalière tolérable de TFA, le plus répandu des polluants éternels

Pesticide Action Network Europe

September 29, 2025 - 07:28

New Report Exposes industry tactics to downplay toxic 'forever chemical' TFA



doi: 10.1021/acs.est.4c06189.

Le TFA, un dérivé de PFAS non surveillé mais potentiellement très présent dans les eaux

Un échantillonnage d'eaux souterraines et superficielles réalisé par Pan Europe alerte sur un des métabolites produits par l'utilisation de pesticides PFAS et les émissions de gaz à effet de serre fluorés, le TFA. Le collectif appelle à son encadrement.

Eau | 27.05.2024 | D. Laperche



L'échantillon prélevé à Paris dans la Seine présente la 2e concentration la plus élevée en TFA, parmi les 23 d'eau superficielle © Alexi Tauzin

Accueil > **Une étude révèle une augmentation alarmante du TFA (acide trifluoroacétique), un produit chimique éternel, dans des vins européens**

Une étude révèle une augmentation alarmante du TFA (acide trifluoroacétique), un produit chimique éternel, dans des vins européens

Le 23 avril 2025

tfa

TFA dans des vins européens - Message dans la bouteille

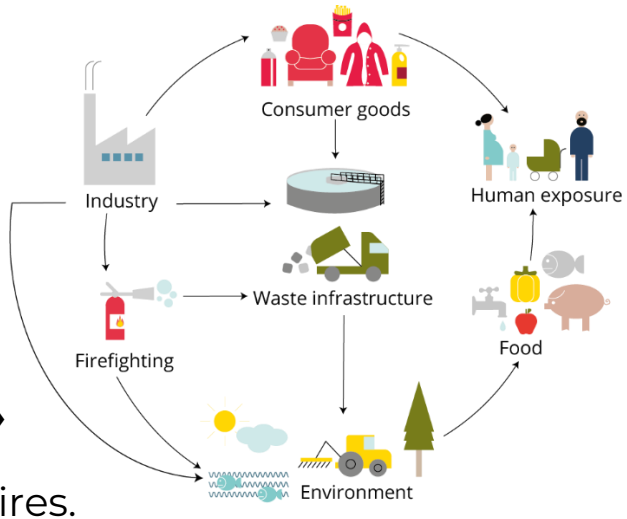
Une nouvelle étude publiée aujourd'hui par le Pesticide Action Network (PAN Europe) met en lumière une contamination de certains vins européens par l'acide trifluoroacétique (TFA), un composé PFAS persistant dans l'environnement. Le rapport intitulé « Message from the Bottle – The Rapid Rise of TFA Contamination Across the EU » révèle des résultats inquiétants qui appellent à une action immédiate des autorités européennes.

L'étude a analysé 49 vins provenant de 10 pays européens, dont 39 vins récents et 10 vins anciens. Les résultats sont sans appel : **tous les vins récents contenaient du TFA**, avec une concentration médiane de 110 microgrammes par litre (µg/l) et des pics atteignant 320 µg/l. Ces niveaux sont environ 100 fois supérieurs aux concentrations déjà préoccupantes mesurées dans les eaux de surface et l'eau potable.

En revanche, **aucune trace de TFA n'a été détectée dans les vins antérieurs à 1988**, confirmant une origine possiblement récente de cette contamination. L'étude révèle également une accélération marquée de la contamination depuis 2010.

1- Introduction et contexte

RECORD
RECHERCHE COOPÉRATIVE EN ENVIRONNEMENT ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE

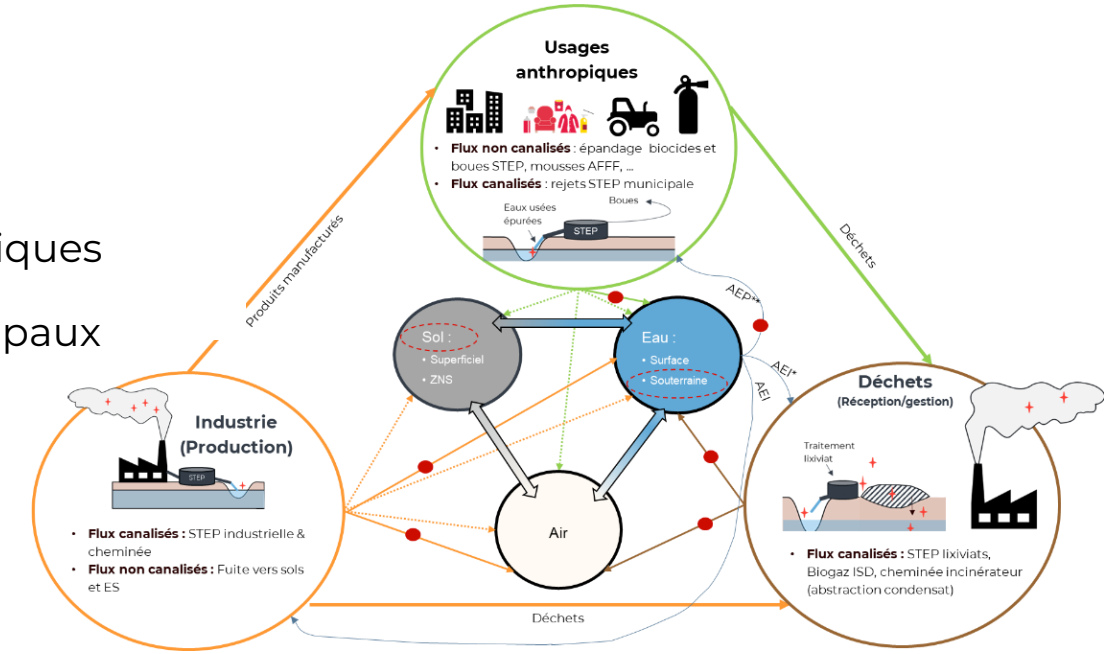


Etude : « Technologie de traitement et d'élimination des PFAS »

- Comprendre leur cycle de vie pour orienter les traitements et les décisions réglementaires.

Méthode :

- Analyse des propriétés et interactions environnementales
- Évaluation de l'efficacité des technologies disponibles
- Modélisation des performances à partir de données physico chimiques
- Proposition des chaines de traitements efficaces sur les flux principaux

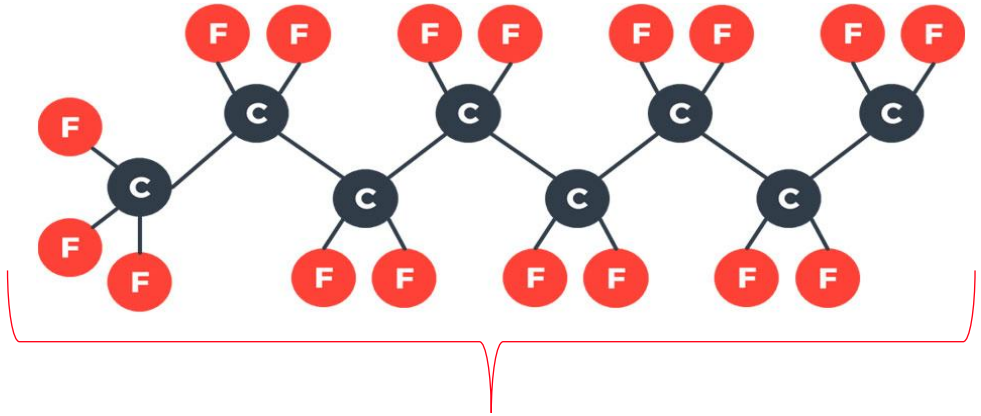


2- Diversité des molécules PFAS

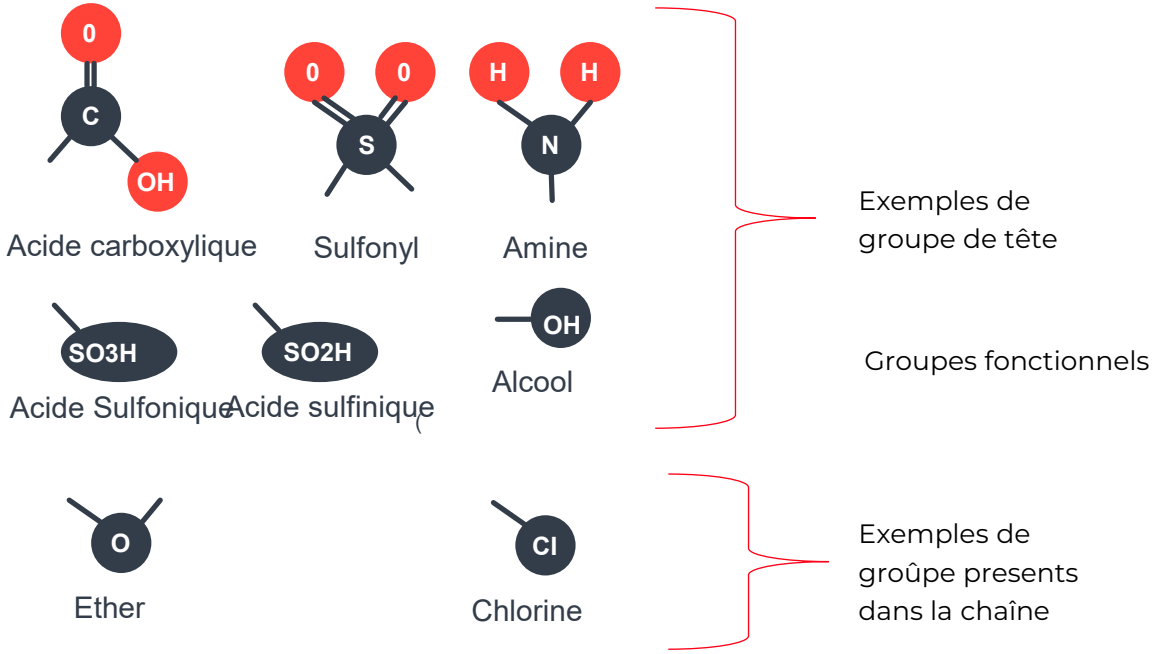
Les PFAS sont des composés contenant des fluorocarbures (liaisons C-F et C-C) de toute longueur.

- La liaison C-F n'est pas présente dans la nature.
- Ces liaisons sont difficiles à rompre (résistantes à la chaleur et aux produits chimiques).

Forme Classique des PFAS non polymères



Chaîne partiellement ou entièrement fluorée

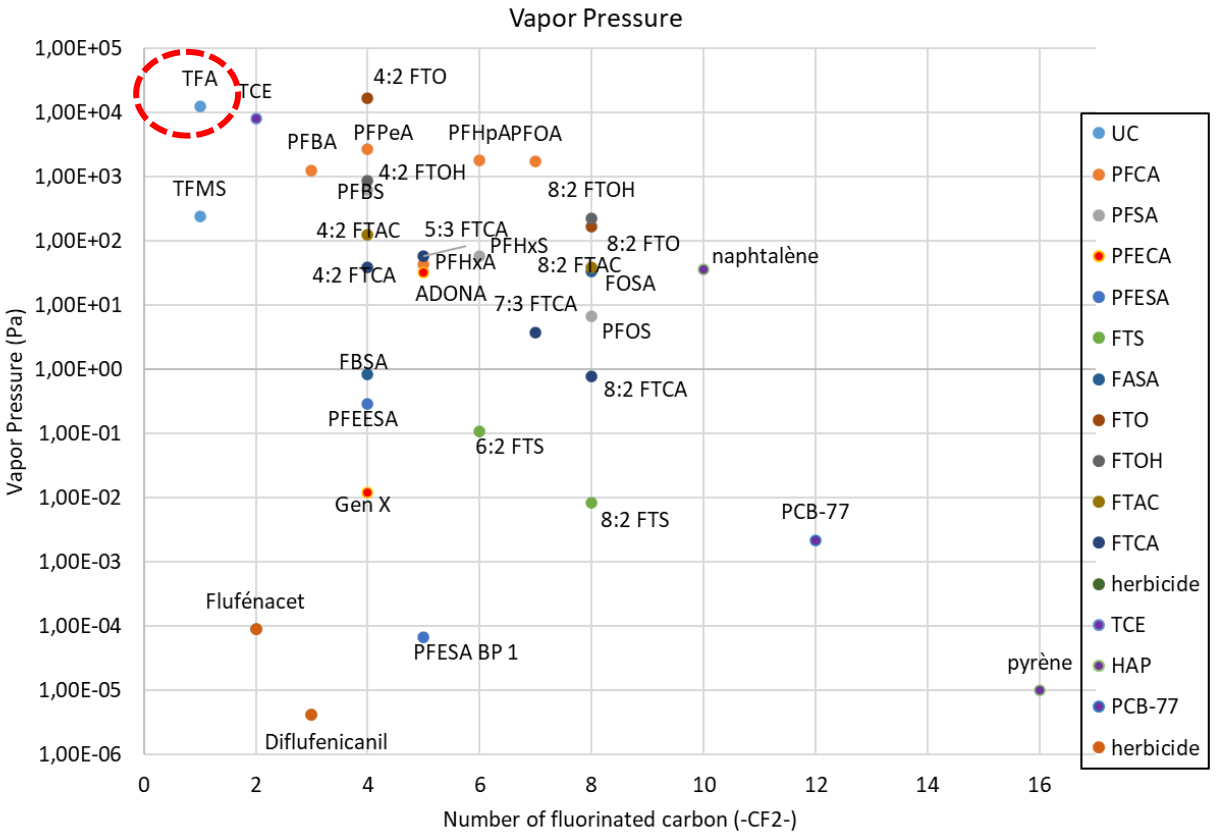


Il existe des milliers de PFAS, dont beaucoup sont largement utilisés dans le commerce :

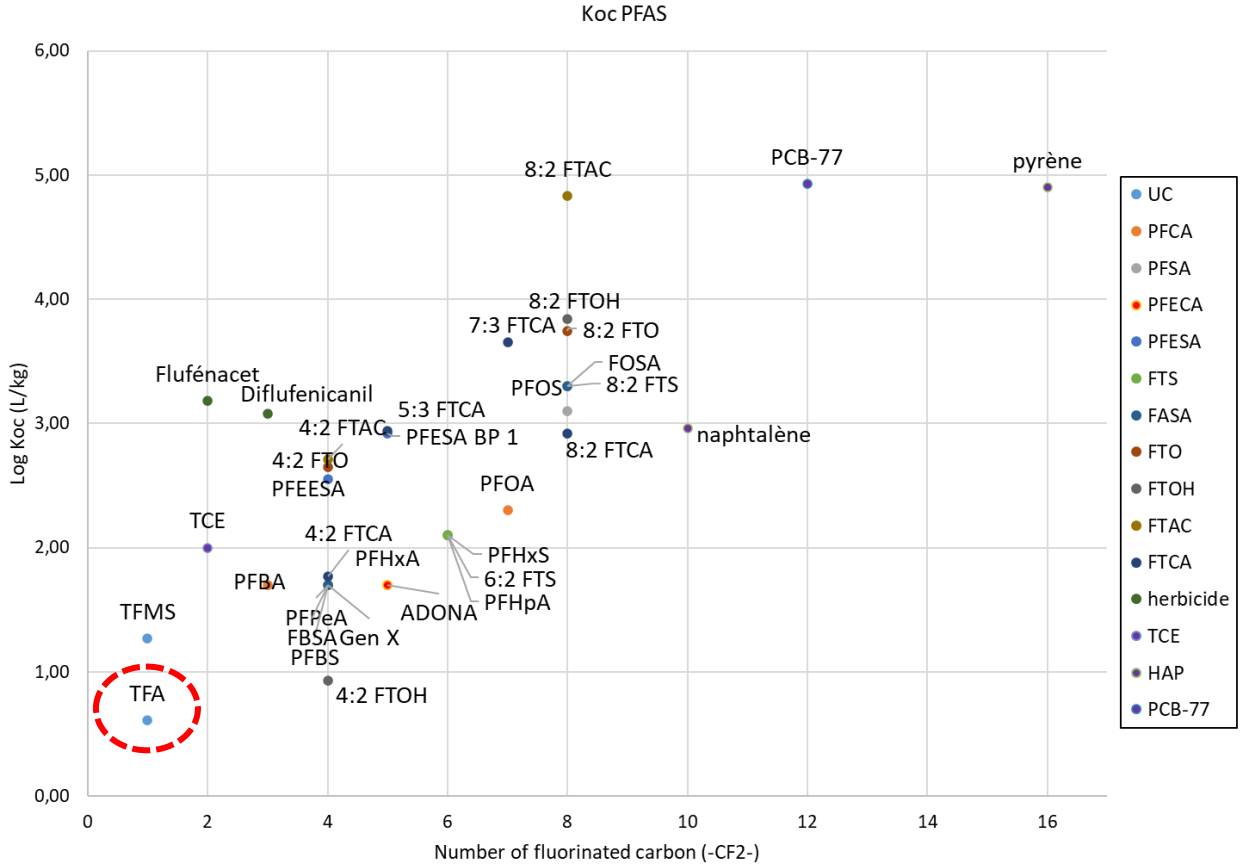
- La longueur de la chaîne de carbone varie (cycles possibles)
- Les groupes de substitution de la chaîne de carbone varient
- Les groupes fonctionnels varient

2- Diversité des molécules PFAS

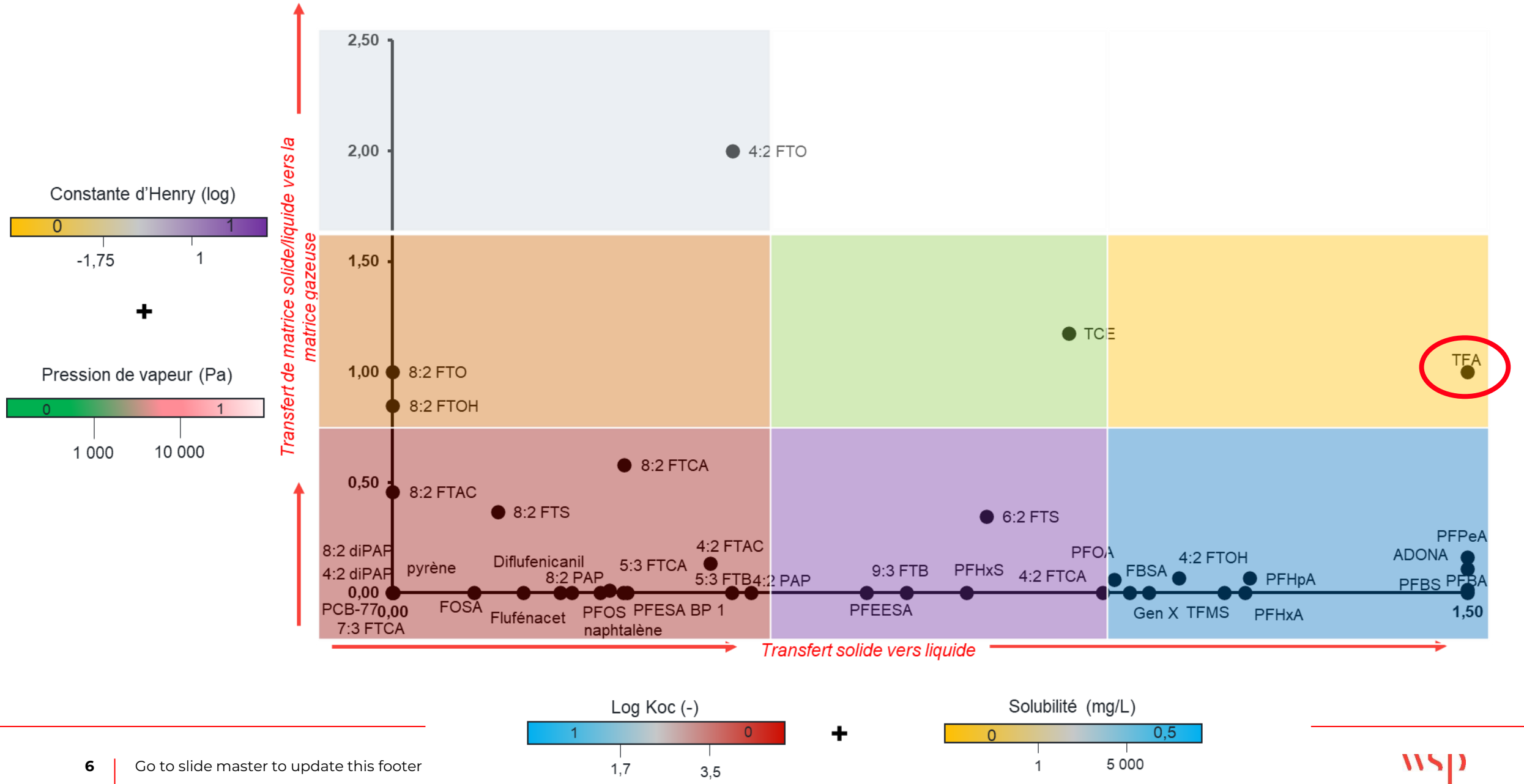
Pression de vapeur saturante (Pv) : Pression exercée, à l'équilibre, par les molécules volatilisées au-dessus du composé liquide pur



Coefficient de partage eau – carbone organique (Koc) : décrit la tendance d'un PFAS à s'associer/sorber avec la matière organique du sol



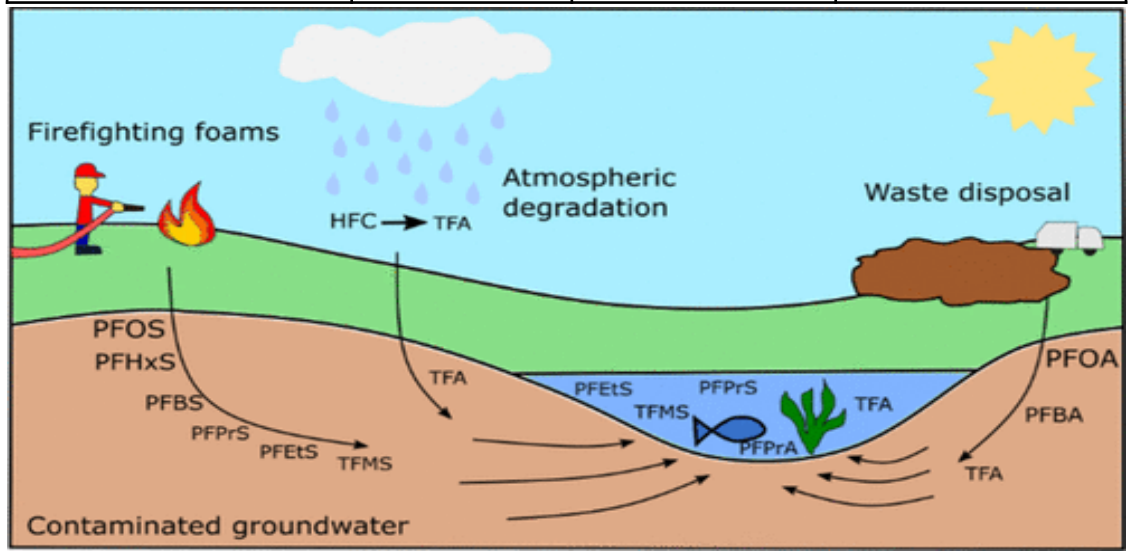
2- Diversité des molécules PFAS

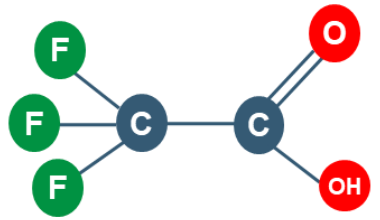


3- Particularités générales des PFAS

Spécificités chimiques induisant un comportement spécifique dans les matrices de l'environnement nécessitant des traitements spécifiques

Propriétés	PFOA	PFBA	TFA
Masse molaire (g/mol)	414	214	**114**
Solubilité (at 25°C)	9,5 x 10^3 mg/L	4,90 x 10^4 mg/L	**Miscible**
Point d'ébullition (°C)	192	121,8	**72,4**
Pression de vapeur (à 25°C)	1 720 Pa	1 260 Pa	**12 400 Pa**



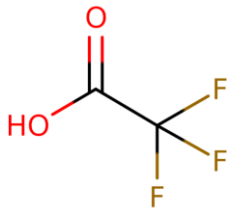


TFA

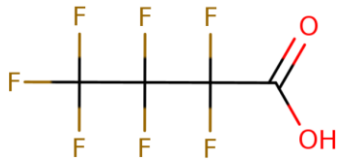
Acide trifluoroacétique

- TFA = **PFAS ultracourts**
- TFA a une **solubilité élevée**
- TFA a une **pression de vapeur élevée**
- TFA est un **problème nouveau et mondial** car :
  - Toutes les matrices sont impactées (eau, plantes, animaux etc.)
  - **Nombreuses sources** telles que la transformation atmosphérique des réfrigérants, la dégradation des pesticides CF3, la combustion de fluoropolymères

Particularités des PFAS : Stabilité chimique



TFA



PFBA

- Liaison carbone – fluor (C-F) est l'une des plus stables en chimie organique
- TFA : molécule très courte : un -CF3 lié directement à un –COOH
- PFBA : Chaine linéaire de 4 carbones entièrement fluorés + un –COOH
- TFA molécule compacte dominée par –CF3 → Liaison C-C très peu accessible aux attaques chimiques/biologiques
- PFBA, les liaisons C-C entre les carbones de la chaine fluorée peuvent théoriquement être ciblées par certaines techniques avancées



Énergies de dissociation des liaisons covalentes les plus courantes (O'Hagan 2008).

Liaison	Energie de dissociation de la liaison (kcal mol-1)
C-F	105,4
C-H	98,8
C-O	84
C-C	83,1
C-Cl	78,5
C-N	69,7

5- Situation réglementaire

- **UE – Eau potable (2020/2184/UE)**
    - 0,10 µg/L (20 PFAS) ou 0,5 µg/L (tous les PFAS)
    - TFA non inclus dans la liste des 20

- **UE – Eaux de surface & souterraines potable (compromis septembre 2025)**
    - Nouvelle liste élargie : 24 PFAS **+ TFA**
    - Norme de qualité environnementale UE (valeur à préciser dans le texte final)
    - Transposition : d'ici 2027

- **Allemagne**
    - Valeur guide **TFA** eau potable : **60 µg/L**
    - Proposition de classification TFA comme reprotoxique 1B et substances PMT/vPVM
    - Objectif de réduction (Projet TFA-Trink) : 10 µg/L

Le TFA devient le nouveau défis PFAS à relever : persistant, mobile, difficile à traiter, en voie d'intégration réglementaire stricte en Europe

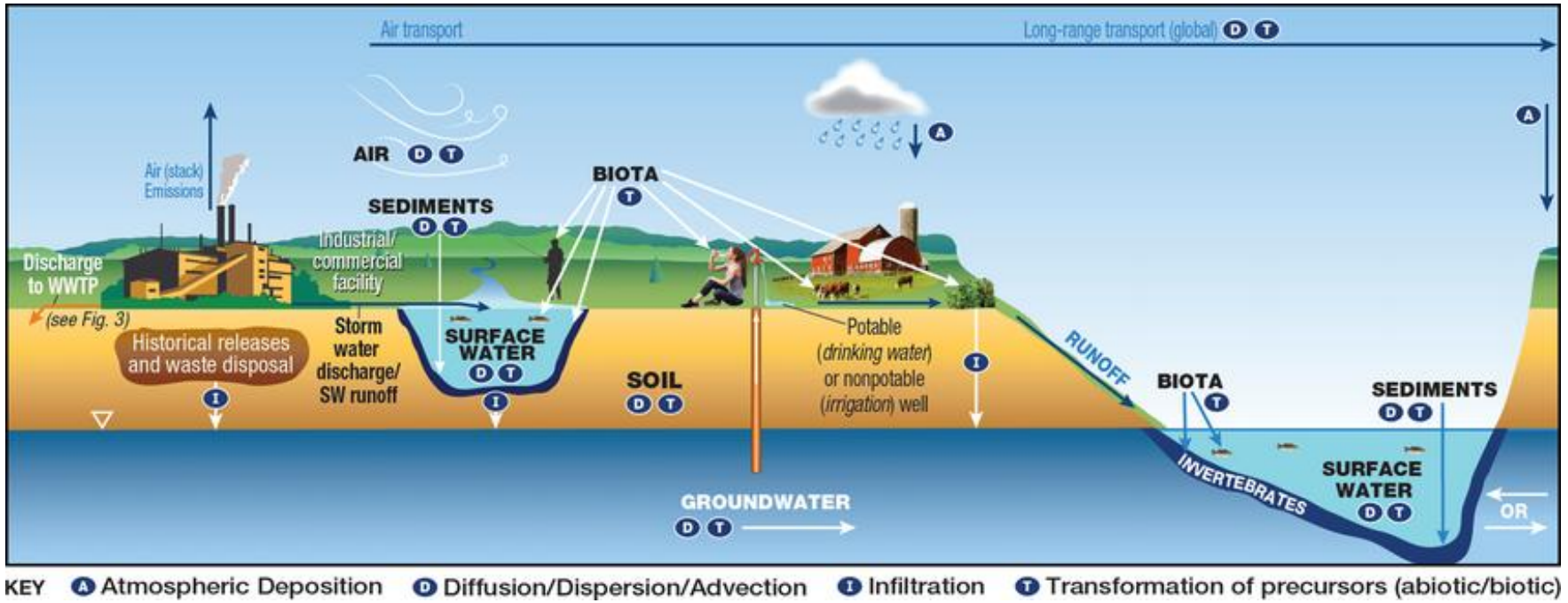
6- Caractérisation des milieux impactés

Besoin de caractériser toutes les matrices environnementales et tous les types d'effluents:

- **Sols**
- **Eaux souterraines**
- **Air Ambiant**
- **Effluents aqueux**
- **Effluents gazeux**

Besoin d'adapter les procédures et protocoles





6- Caractérisation des milieux impactés

- **Intercomparaison sur 4 laboratoires réalisée en 2024**
  - LQ de 0,5 à 5 µg/L – Eaux
  - LQ de 0,1 mg/kg - Sol
- **Composition de la matrice**
  - Interférences possibles : **chlorures, sulfates, matière organique dissoute**
  - Impact direct sur la **LQ**
- **Cas spécifique du TFA**
  - Présence dans certains composants **LC-MS/MS** → risque de surestimation
- **Défis analytiques**
  - Large gamme de concentrations à couvrir
  - Capacités analytiques des laboratoires en évolution rapide
- **Analyses indiciaires AOF et TOF non adaptées à l'analyse du TFA -**

Matrice	Méthode analytique	Variabilité (%)		
		Faible valeur (<500 µg/l)	Valeur intermédiaire	Valeur élevée (>20 000 µg/l)
Eau	LC/MS-MS	44 - 180	10 – 27	31 – 49
Sol	LC/MS-MS	30-50		

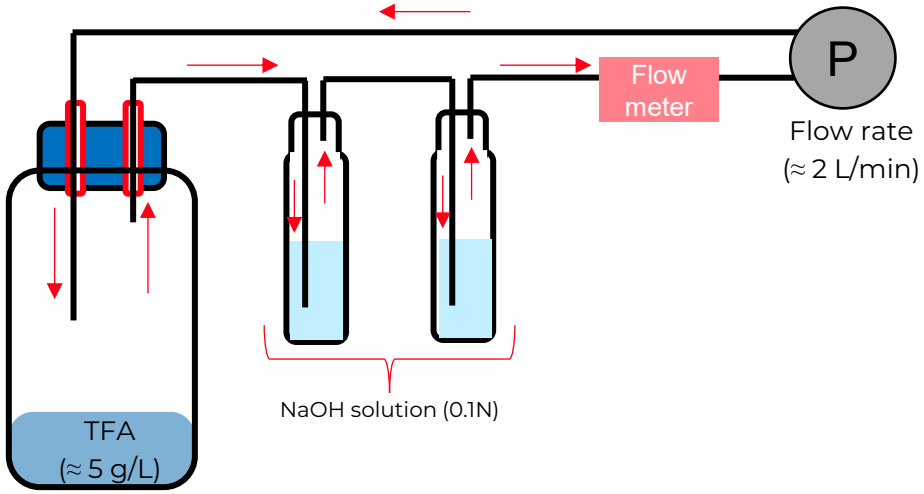
	TFA	AOF	TOF
	mg/L	mg/L	mg/L
Echantillon Eau	10,4	0,25	0,04

TOF théorique 100 à 200 fois supérieure au TOF mesuré

6- Caractérisation des milieux impactés

- Air ⟶ Actuellement pas d'intercomparaison + Etudes des différentes méthodes de prélèvement

	Méthodes			
	OTM-45 Series de filtres et de sorbants	OTM-50 Canister sous vide ou tube adsorbant thermiquement désorbable	Barbottage dans une solution de NaOH.	Filtre gel de silice
	Pas adaptée	Pourrait convenir au TFA	Applicable	Applicable
Testé par WSP	-	-	En cours	En cours



Tests laboratoire interne WSP

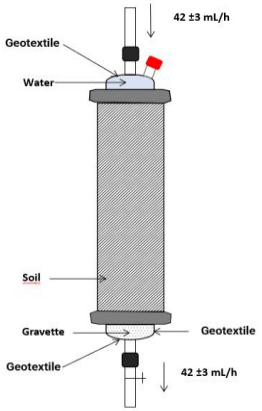
	Température (°C)	Concentration TFA théorique (mg/m³)	Concentration TFA mesurée (mg/m³)
Test 1	20	26	20
Test 2	40	46	73

- **Concentrations mesurées sont du même ordre de grandeur que celles calculées théoriquement avec la constante d'Henry**

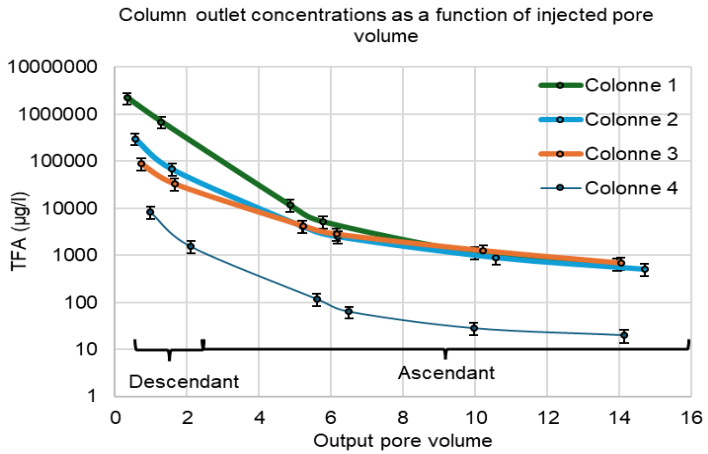
7- Plan de gestion – évaluation du risque environnental

Tests laboratoire interne WSP

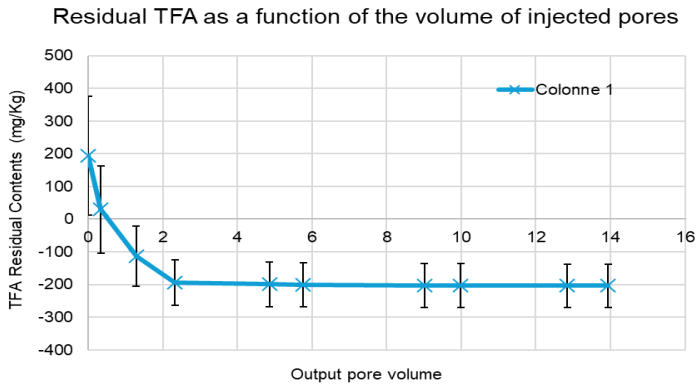




Lixiviat



Sol



- Essais réalisés sur 4 sols ([TFA] compris entre 2 et 200 mg/kg)
- Résultats : TFA totalement lixivié après 3-5 volume de pore
- Les essais en colonne ne permettent pas de définir un seuil
- Comportement particulier du TFA
- Besoin d'améliorer la modélisation du comportement et le devenir du TFA dans la ZNS – Thèse CIFRE en cours par Leonard Botella

8- Choix des solutions de gestion – Vue d'ensemble des technologies de traitement des PFAS

	Matrice		
Séparation/ concentration	Liquide	Solide	Gazeuse
Adsorption sur charbon actif (GAC et PAC)	x		x
Adsorption sur résines échangeuses d'ions (IX et R-IX)	x		
Adsorption via d'autres adsorbants (zéolites, biochar, minéraux argileux)	x		
Osmose inverse / nanofiltration	x		
Fractionnement par mousse	x		
Coagulation/Floculation	x		
Lavage des sols ex situ		x	
Lavage des sols in situ		x	
Désorption thermique		x	
Phytoextraction	x	x	
Destruction	Liquide	Solide	Gazeuse
Incinération (oxydation thermique)	x	x	x
Combustion dans des fours à ciment	x	x	
Pyrolyse / thermolyse / gazéification		x	
Smoldering	x	x	
Oxydation en eau supercritique (SCWO)	x	x*	
Traitement alcalin hydrothermal (HALT)	x	x	
Oxydation électrochimique	x		
Destruction en Plasma non thermique	x		
Oxydation sonochimique	x		
Autres techniques de réduction ou d'oxydation	x	x*	
Ball milling		x	
Bioremédiation	x	x	
Immobilisation/confinement			
Stabilisation / BPR		x	
Confinement	x	x	

** Solide mélange avec du liquide (80% de liquide minimum)*

Xx	Technologie consolidée
Xx	Technologie émergente
Xx	Technologie expérimentale

Technologie consolidée : réalisée à l'échelle industrielle et éprouvée

Technologie émergente : testée à l'échelle du laboratoire et l'échelle pilote, mais présentant des applications grande échelle limitées et en cours de développement commercial

Technologie expérimentale : en phase de recherche à l'échelle du laboratoire ou pilote

8- Choix des solutions de gestion – Vue d'ensemble des technologies de traitement des PFAS

	Matrice		
Séparation/ concentration	Liquide	Solide	Gazeuse
Adsorption sur charbon actif (GAC et PAC)	x		x
Adsorption sur résines échangeuses d'ions (IX et R-IX)	x		
Adsorption via d'autres adsorbants (zéolites, biochar, minéraux argileux)	x		
Osmose inverse / nanofiltration	x		
Fractionnement par mousse	x		
Coagulation/Floculation	x		
Lavage des sols ex situ		x	
Lavage des sols in situ		x	
Désorption thermique		x	
Phytoextraction	x	x	
Destruction	Liquide	Solide	Gazeuse
Incinération (oxydation thermique)	x	x	x
Combustion dans des fours à ciment	x	x	
Pyrolyse / thermolyse / gazéification		x	
Smoldering	x	x	
Oxydation en eau supercritique (SCWO)	x	x*	
Traitement alcalin hydrothermal (HALT)	x	x	
Oxydation électrochimique	x		
Destruction en Plasma non thermique	x		
Oxydation sonochimique	x		
Autres techniques de réduction ou d'oxydation	x	x*	
Ball milling		x	
Bioremédiation	x	x	
Immobilisation/confinement			
Stabilisation / BPR		x	
Confinement	x	x	

* *Solide mélange avec du liquide (80% de liquide minimum)*

- Comparer les options disponibles
- Evaluer les coûts
- Identifier les contraintes techniques

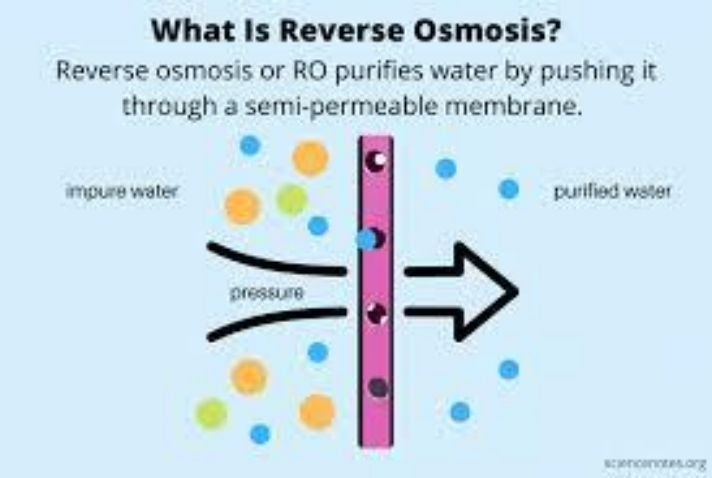
9- Vérification de la faisabilité de la méthode – *REX matrice Liquide*

CONCENTRATION

- Pour l'effluent brut $[TFA]_{moyenne}$ = 10 mg/L

Osmose Inverse

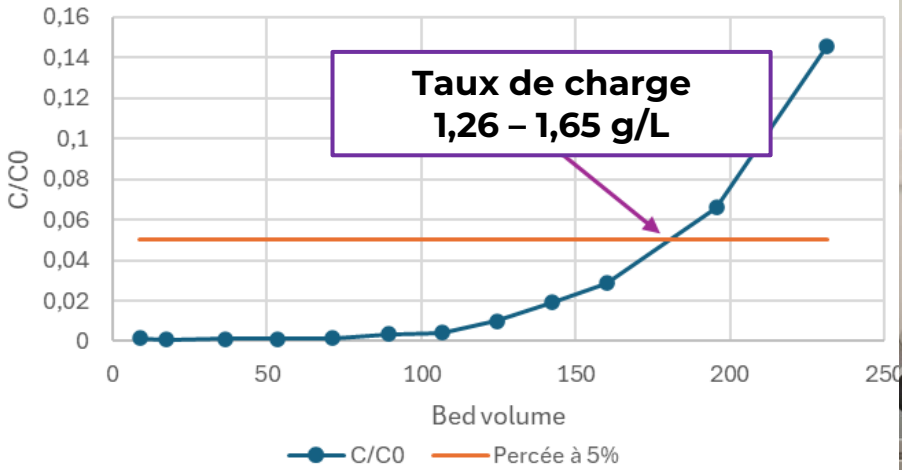
- Validation avec une unité à deux étape et une seule passe
- FCV de 10 et une concentration en perméat de 0,5 mg/L.



Résines échangeuses d'ion (IX)

- Résine testée : non-régénérable
- Effluent en sortie <50 µg/L

Tests laboratoire interne WSP



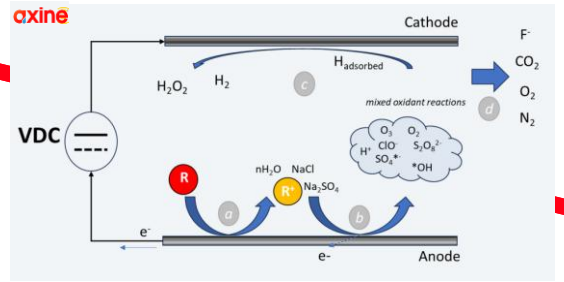


9- Vérification de la faisabilité de la méthode – *REX matrice Liquide*

DESTRUCTION



Incinération – hors site

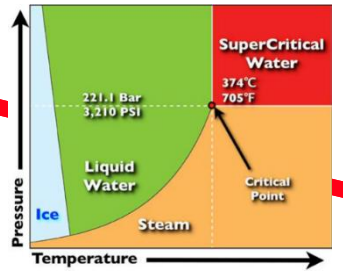


Electro-oxydation

Aquagga



Traitement hydrothermal Alcalin (HALT)



374WATER°
AirSCWO

GENERAL ATOMICS
iSCWOTM

BATTELLE
ANNIHILATOR®

US

Aquarden TECHNOLOGIES
SuperOx® Danemark

arianeGROUP
ELIXIR™

Oxydation d'eau supercritique (SCWO)

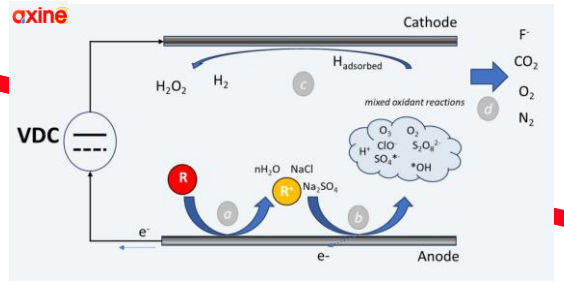
9- Vérification de la faisabilité de la méthode – *REX matrice Liquide*

DESTRUCTION



Incinération – hors site

- Seule technologie éprouvée
- Taux d'abattement élevés PFAS (manque de données pour le TFA)
- Limités aux composés analysés
- Absence de Bilan de masse complet



Electro-oxydation

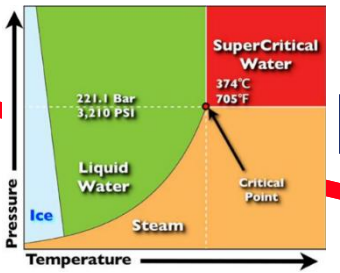
- Maturité variable
- Coûts supplémentaires - *Ex : gestion perchlorates*
- Flux traité jusqu'à 3,63 m³/h *(donnée Aclarity)*
- Essais en cours – Résultats prometteurs

Aquagga



Traitement hydrothermal Alcalin (HALT)

- En déploiement commercial
- Coût d'investissement initiaux élevés
- 220 KWh/m3 ; 2% NaOH ; 250 – 300 °C
- Flux traité jusqu'à 0,25 m³/h
- >99,9 % d'élimination du TFA
- Absence de sous-produits



374WATER°
AirSCWO

GENERAL ATOMICS
iSCWOTM

BATTELLE
ANNIHILATOR®

US

Aquarden TECHNOLOGIES
SuperOx® Danemark

arianeGROUP
ELIXIR™

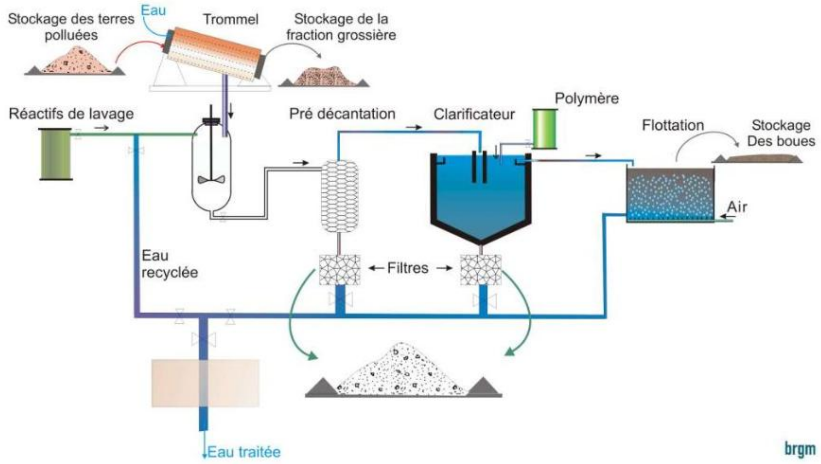
Oxydation d'eau supercritique (SCWO)

- Maturité variable
- Coûts supplémentaires - *Ex :* Apport de carbone
- Flux traité - AirSCWO jusqu'à 0,04 m³/ ; SuperOx : 0,2 m³/h

9- Vérification de la faisabilité de la méthode – *REX matrice solide*

SEPARATION

Lavage de sol

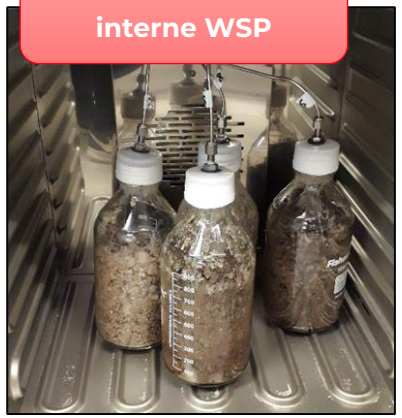




Désorption thermique

Désorption thermique (10 jours, 120 °C)

Tests laboratoire interne WSP



	Moyenne initiale	Post désorption	Variation
PCE (mg/kg MS)	346 ± 29%	<1,0	-100%
Somme des COHV (mg/kg MS)	368 ± 28%	<1,0	-100%
1,2-DCE (mg/kg MS)	6 100 ± 16%	6,95 ± 52%	-100%
TA / TFMS (mg/kg MS)	**10,7 ± 7%**	**10,1 ± 5%**	**-5%**
TFA (mg/kg MS)	**95,1 ± 19%**	**68,10 ± 17%**	**-28%**
TFMB (mg/kg MS)	216,0 ± 38%	ND	-100%
TFMBxB (mg/kg MS)	28,6 ± 25%	ND	-100%

Conclusion et Perspectives

La bonne gestion des milieux impactés nécessite :

- Caractérisation approfondie (mais optimale) des milieux avec le programme analytique adapté
- Prise en compte de la spécificité de chaque PFAS dans l'évaluation des techniques disponibles
- La vérification de la faisabilité de la méthode pour chaque projet nécessite :
  - ✓ une analyse coût/bénéfice préliminaire avant pilote avec les éléments suivants à considérer :
    Volume de sol/eau ; Type de sol ; Type de PFAS ; Teneurs ; Place et temps disponible etc.
  - ✓ Des tests de faisabilité en laboratoire spécifiques à chaque effluent
- Suivi de l'opération avec le monitoring des PFAS dans chaque matrice , y compris gazeuse

Il reste beaucoup de développement à fournir - Tout est question d'énergie

Notre équipe PFAS, expertise & projets en France



Dr. Christophe Barnier - Lyon
Directeur technique



Dr. Isabelle Delsarte - Bordeaux
Cheffe de projet



Camille Déchelette - Lyon
Ingénieure d'études SSP



Eva Martin - Lyon
Ingénieure d'études SSP



Léonard Botella - Bordeaux
Doctorant

Projets & Expertise

- Laboratoire interne à Lyon : test de traitabilité (résine, charbon actif en grains [GAC], flottation [FF]...)
- RECORD : Élaboration d'un document d'orientation/rapport avec un benchmark sur l'efficacité des différentes techniques de traitement face à la diversité des PFAS
- Doctorat en collaboration WSP / Université de Bordeaux : Modélisation des PFAS dans la zone vadose
- Expertise spécifique sur les PFAS ultracourts (comportement, analyses, traitabilité)
- Différents projets en cours de gestion des PFAS dans l'eau pour l'industrie chimique et manufacturière



Merci

Christophe.Barnier@wsp.com

