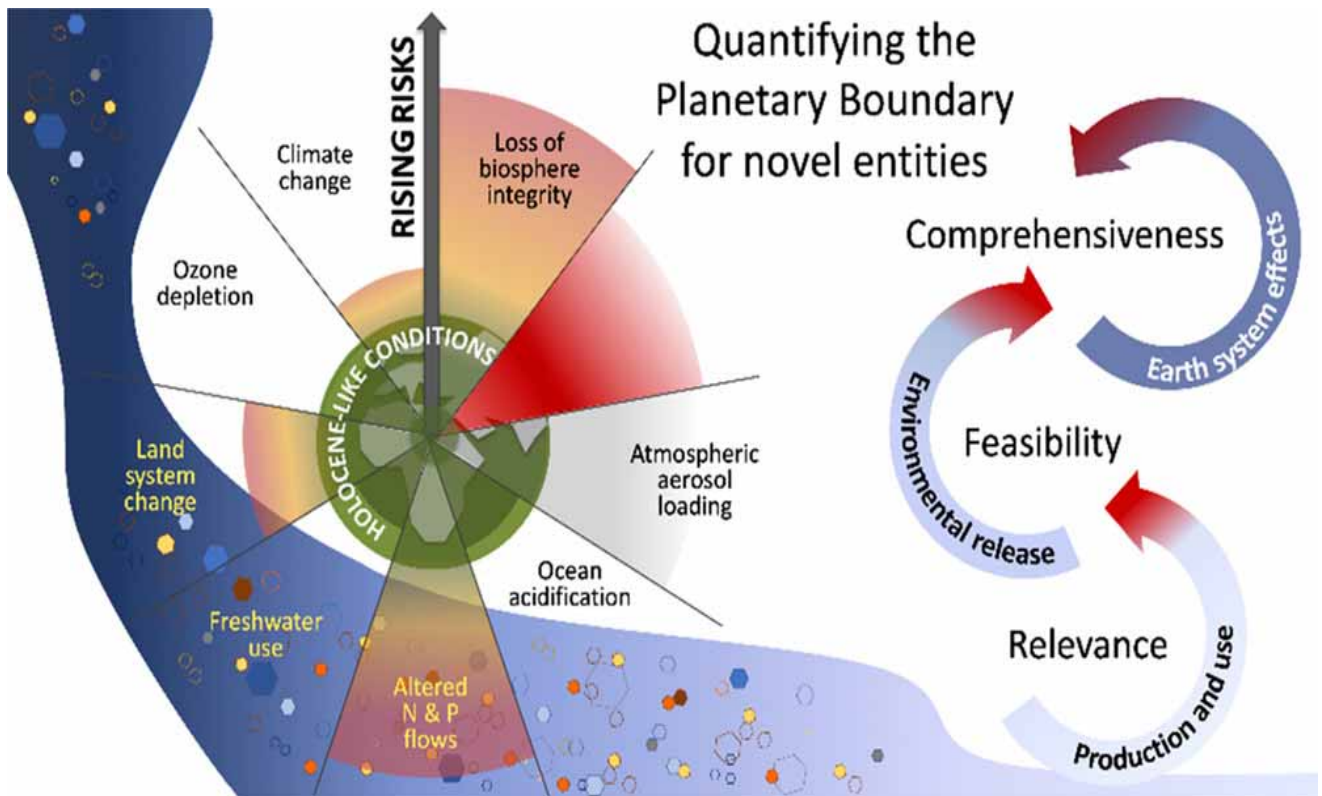
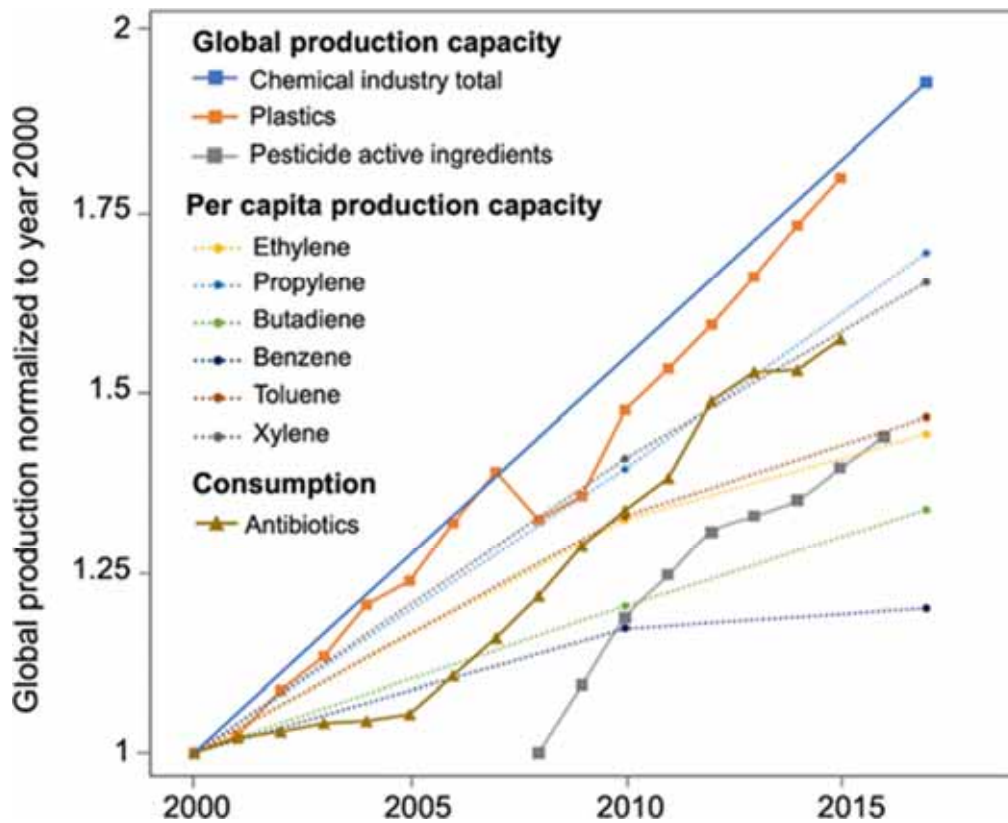


Pollution chimique : sur neuf limites planétaires, la cinquième a été dépassée en 2022



Persson et al., Environ. Sci. Technol. 2022
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>

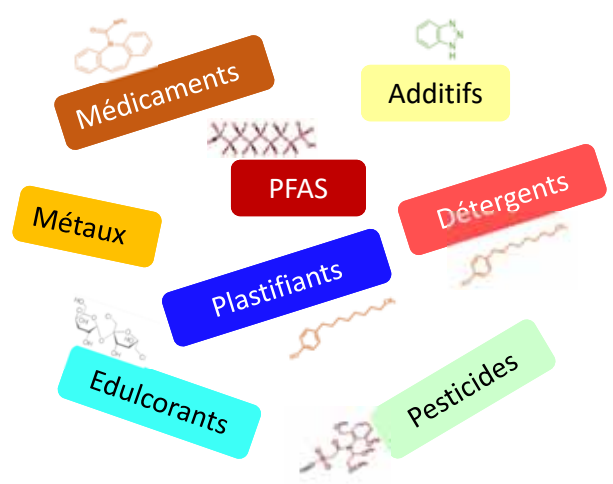
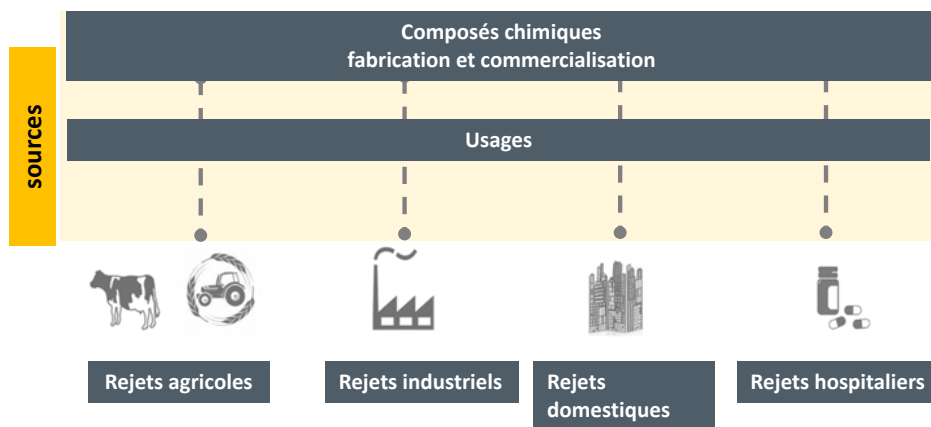
3



La production de produits chimiques a été multipliée par 50 depuis 1950. Et elle devrait encore tripler d'ici 2050. La production de plastique à elle seule a augmenté de 79 % entre 2000 et 2015

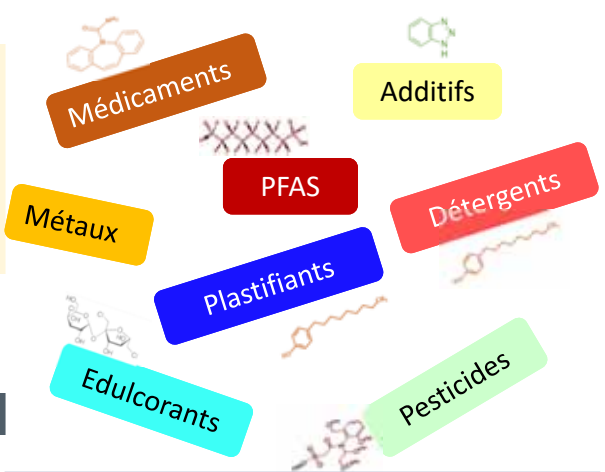
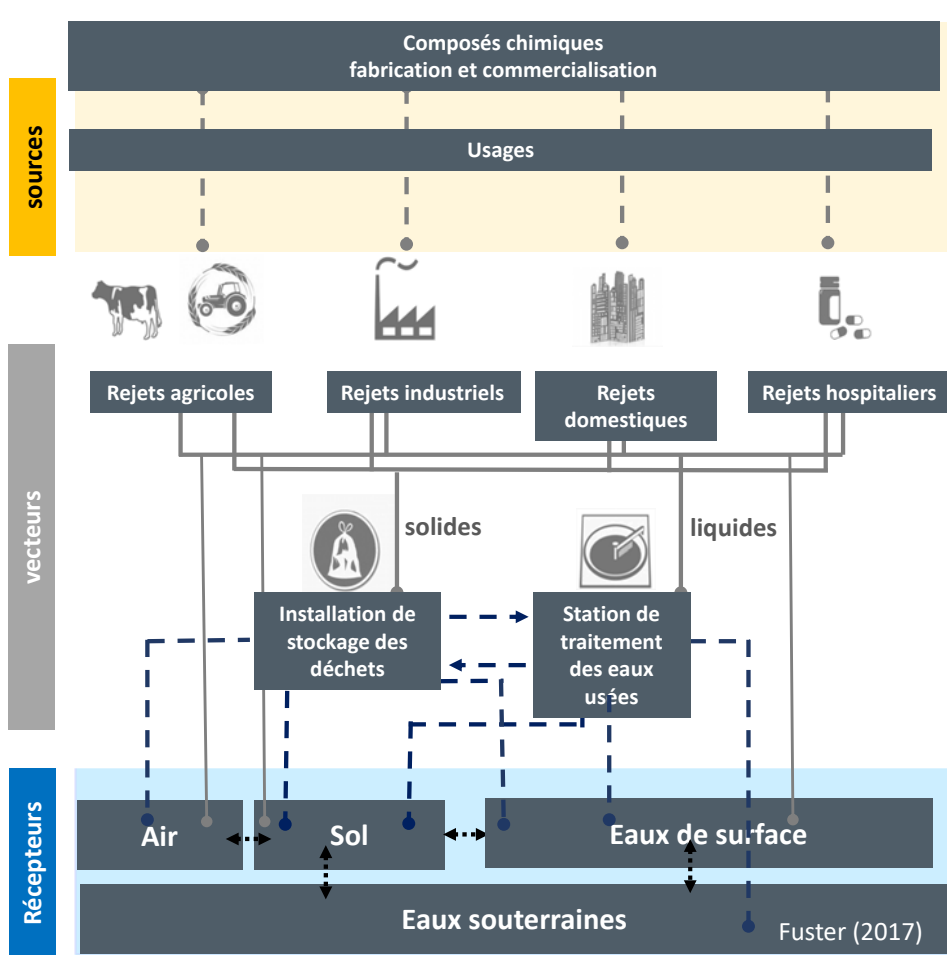
Persson et al., Environ. Sci. Technol. 2022
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>

4



Fuster (2017)

Multi-usages – Multi-sources – Multi-classes – Multi-composés



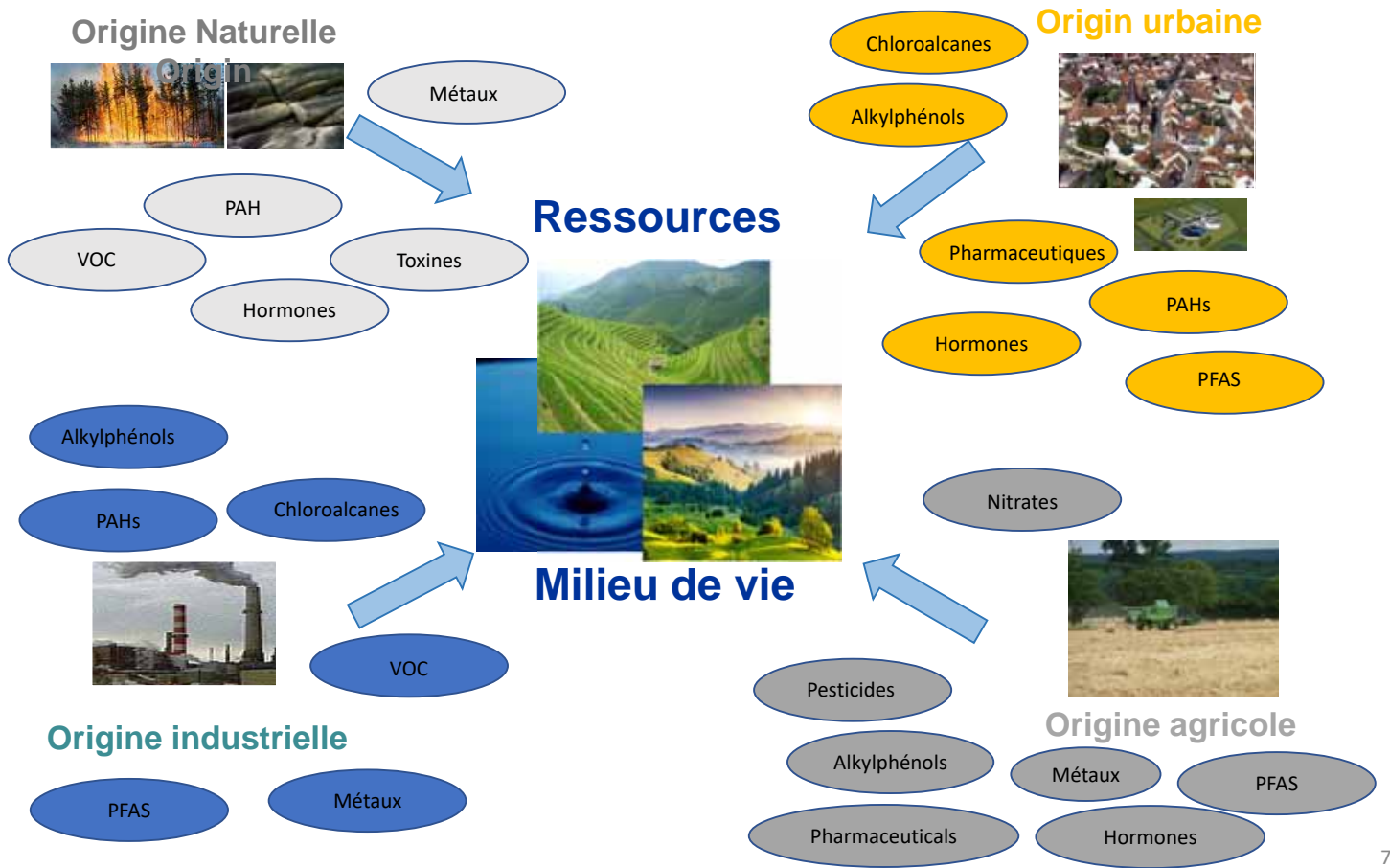
Composés chimiques
 Reg. 1907/2006/CE : REACH
 Reg. 1107/2009/UE : produits phytosanitaires
 Reg. 528/2012/UE : biocides
 Dir. 2001/82-89/CE : médicaments à usages vétérinaires/humains

Emissions et Rejets
 Dir. 2010/75/UE « IED » : émissions industrielles
 Reg. 166/2006 « E-PRTR » : déclaration des rejets : 91 molécules
 Dir. 91/271/CEE « ERU » collecte, transport et traitement des eaux urbaines

Milieux
 Dir. 2000/60/CE : DCE
 Dir. 2006/118/CE : eaux souterraines
 Dir. 2008/56/EC « DCSMM » : milieu marin

Fuster (2017)

Sources et origines des contaminants chimiques

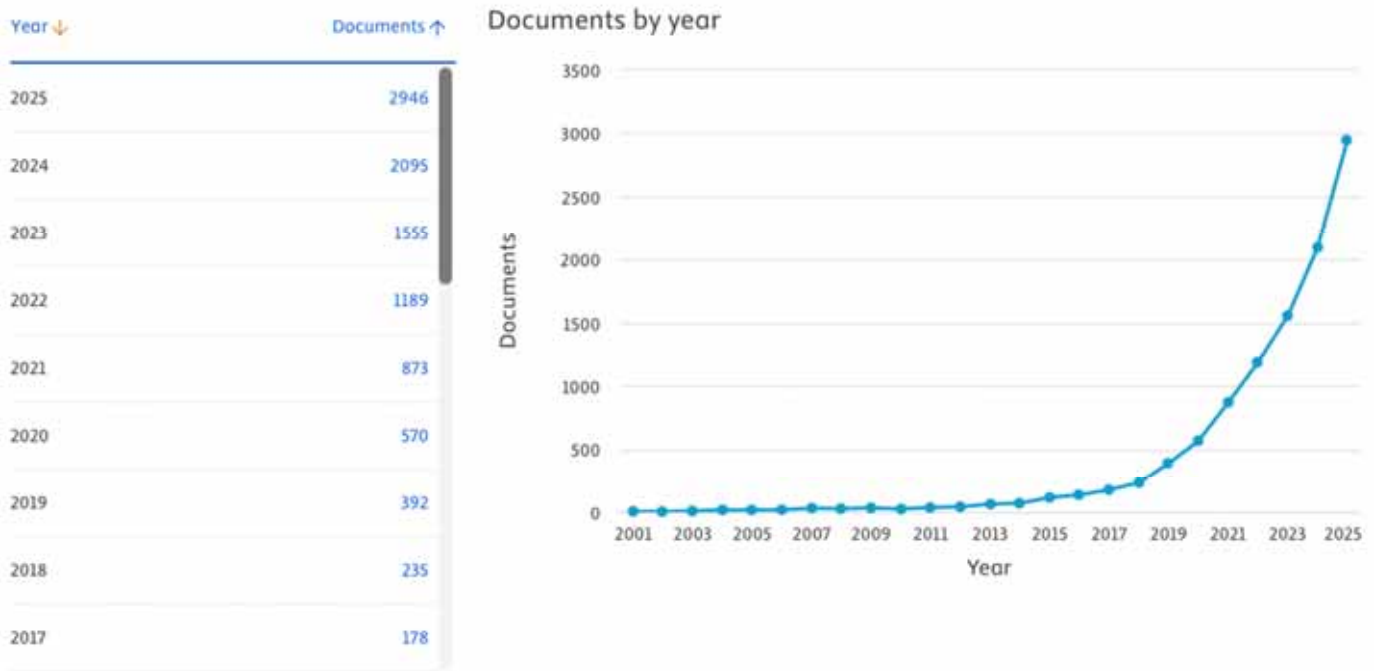


PFAS : Science et société

A collage of media and official documents related to PFAS (Per- and polyfluoroalkyl substances):

- Le Monde:** Article titled 'Rumilly, « capitale mondiale de la poêle » et hot spot de la « pollution éternelle » aux PFAS'.
- Liberation:** Article titled 'Environnement Polluants : ce que contient le « plan d'action » ministériel sur les PFAS'.
- Interview - Académie des sciences:** Document titled 'LA POLLUTION AUX PFAS' by Alain Fischer and Bruno Chaudret.
- ASSEMBLÉE NATIONALE:** 'PROPOSITION DE LOI visant à lutter contre les risques liés aux substances per- et polyfluorées'.
- FRANCE NATION VERTÉ:** Document titled 'Plan d'actions ministériel sur les PFAS'.
- Liberation:** Article titled 'POLLUANTS ETERNELS L'HEURE DU FACE A PFAS'.
- Other:** A newspaper clipping titled 'L'eau potable menacée par un polluant éternel'.

Scopus : mot clef "PFAS" de 2000 à 2025 (10686 publications)

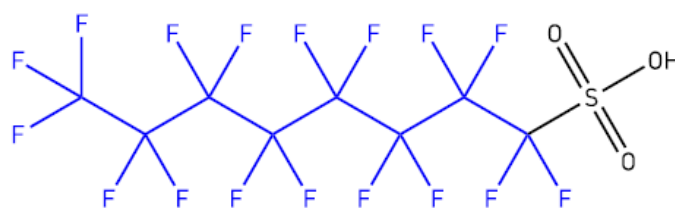


9

Les PFAS : vaste et complexe famille chimique

OCDE 2021

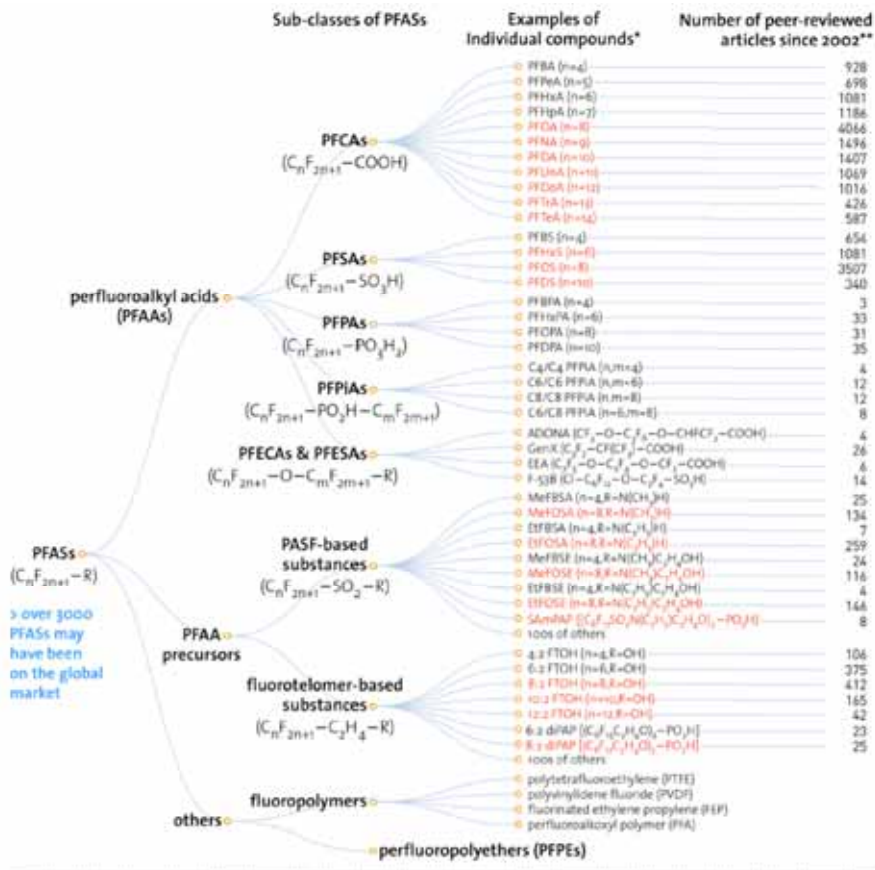
PFAS : **composés organiques fluorés** qui contiennent au moins un atome de carbone méthyle ou méthylène entièrement fluoré (sans autre atome H/Cl/Br/I) soit, à quelques exceptions près, **toute substance chimique contenant au moins un groupe méthyle perfluoré (-CF₃) ou un groupe méthylène perfluoré (-CF₂-).**



perfluorooctanesulfonic acid (PFOS)

Chemical Abstracts Service Registry Number (CASRN) 1763-23-1

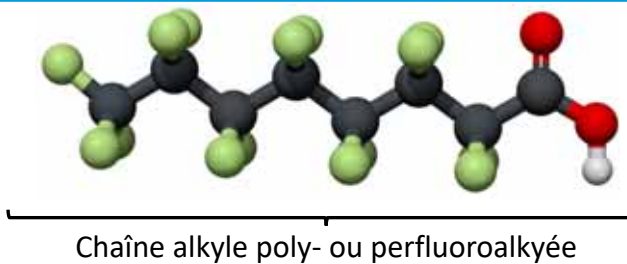
Les PFAS : vaste et complexe famille chimique



- PubChem : 7 millions de composés (nombreux brevets)
- OCDE 2021 : 10-12 000 composés
- US EPA Comp Tox list : 12 000 composés
- OCDE 2018 : 4 730 composés avec un numéro CAS
 - > 1500-3000 PFAS mis sur le marché
- Environ 500 listés dans REACH (> 1 tonne/an)
- Peu/pas d'informations sur l'historique de la production et de l'utilisation
- Non polymères vs polymères
- Per- vs polyfluoroalkylés

Wang, Z, DeWitt JC, Higgins CP, Cousins I. A Never-Ending Story of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)? *Environmental Science & Technology* 2017, <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04806>

Caractéristiques physico-chimiques des PFAS non polymériques



Groupement fonctionnel

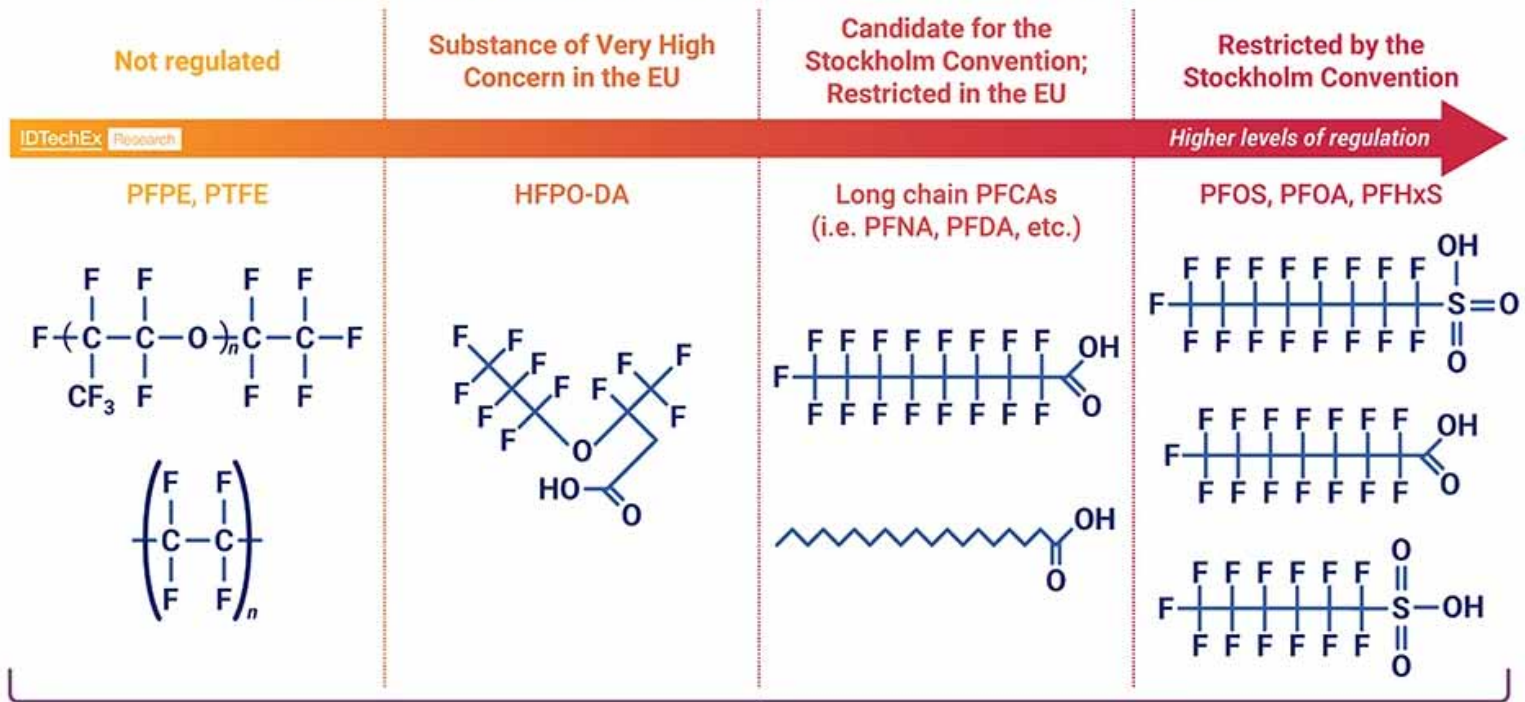
- Caractérisés par la présence d'une chaîne alkyle fluorée (hydrophobe / lipophile)
- Ajout d'un groupement hydrophile : caractère amphiphile (agent tensioactif)
- Liaison carbone-fluor (C-F) très stable + effet protecteur de C-F sur C-C
 - **Très grande stabilité chimique et thermique** (perfluoroalkylés > polyfluoroalkylés)
- **Propriétés atypiques** : repoussent l'eau et les graisses mais hydrosolubles et protéinophiles

• Usages diversifiés



• Sources directes et indirectes; industrielles et domestiques

The Global Spectrum of Regulations for Different PFAS



<https://www.idtechex.com/en/research-article/the-current-status-of-regulations-targeting-the-pfas-problem/32683>

13

Code SANDRE	Abréviation	Nom de la substance	Numero CAS	Directive et arrêté EDCH [1][2]	Arrêté surveillance Eau de Surface [3]	Arrêté surveillance Eau souterraine [3]	Révision Directive Cadre Eau [4]	Arrêté surveillance PFAS ICPE [5]
5347	PFOA	Acide perfluoro-octanoïque	335-67-1	X	X	X	X	X
5977	PFHpA	Acide perfluoro-n-heptanoïque	375-85-9	X		X	X	X
5978	PFHxA	Acide perfluoro-n-hexanoïque	307-24-4	X	X	X	X	X
5979	PFPeA	Acide perfluoro-n-pentanoïque	2706-90-3	X		X	X	X
5980	PFBA	Acide perfluoro-n-butanoïque	375-22-4	X		X	X	X
6025	PFBS	Acide sulfonique de perfluorobutane	375-73-5	X		X	X	X
6507	PFDoA	Acide perfluoro-dodécanoïque	307-55-1	X		X	X	X
6508	PFNA	Acide perfluoro-n-nonanoïque	375-95-1	X		X	X	X
6509	PFDA	Acide perfluoro-décanoïque	335-76-2	X	X	X	X	X
6510	PFUnA	Acide perfluoro-n-undécanoïque	2058-94-8	X		X	X	X
6542	PFHpS	Acide perfluorohéptane sulfonique	375-92-8	X		X	X	X
6547	PFTeDA	Acide Perfluorotétradécanoïque	375-05-7				X	X
6549	PFTriDA	Acide perfluorotridecane sulfonique	72629-94-8	X		X	X	X
6550	PFDS	Acide perfluorodécane sulfonique	335-77-3	X		X	X	X
6561	PFOS	Acide sulfonique de perfluorooctane	1763-23-1	X	X	X	X	X
6830	PFHxS	Acide perfluorohexane sulfonique	355-45-4	X	X	X	X	X
7893	6:2 FTSA	acide 6:2 fluorotélomère sulfonique	27619-97-2					
7946	8:2 FTSA	acide 8:2 fluorotélomère sulfonique	39108-34-4					
7991	6:2 FTAB	6:2 fluorotélomère sulfonamide bétaïne	34455-29-3					
7992	6:2FTSAm	6:2 Fluorotélomère sulfonamido propyl diméthylamine	34455-22-6					
7997	6:2FTOH	3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluorooctan-1-ol	647-42-7				X	X
8000	8:2FTOH	3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-heptafluorodécane-1-ol	678-39-7				X	X
8738	PFPeS	Acide perfluoropentane sulfonique	2706-91-4	X		X	X	X
8739	PFNS	Acide perfluorononane sulfonique	68259-12-1	X		X		X
8740	PFUnDS	Acide perfluoroundécane sulfonique	749786-16-1	X		X		X
8741	PFDoDS	Acide perfluorodécane sulfonique	79780-39-5	X		X		X
8742	PFTriDS	Acide perfluorotridecane sulfonique	791563-89-8	X		X		X
8858	TFA	Acide Trifluoroacétique (TFA)	76-05-1				en discussion	
8981	C604	C604	1190931-41-9				X	X
8982	HFPO-DA	HFPO-DA	13252-13-6				X	X
8983	DONA	DONA	919005-14-4				X	X
8984	PFHxDA	Acide Perfluorohexadécanoïque	67905-19-5				X	X
8985	PFODA	Acide Perfluorooctadécanoïque	16517-11-6				X	X
9362	8:2FTAB	8:2 Fluorotélomère sulfonamide bétaïne	34455-21-5					

- Différentes listes
- Nombre PFAS limité
- "20" PFAS eau EDCH
- 34 substances

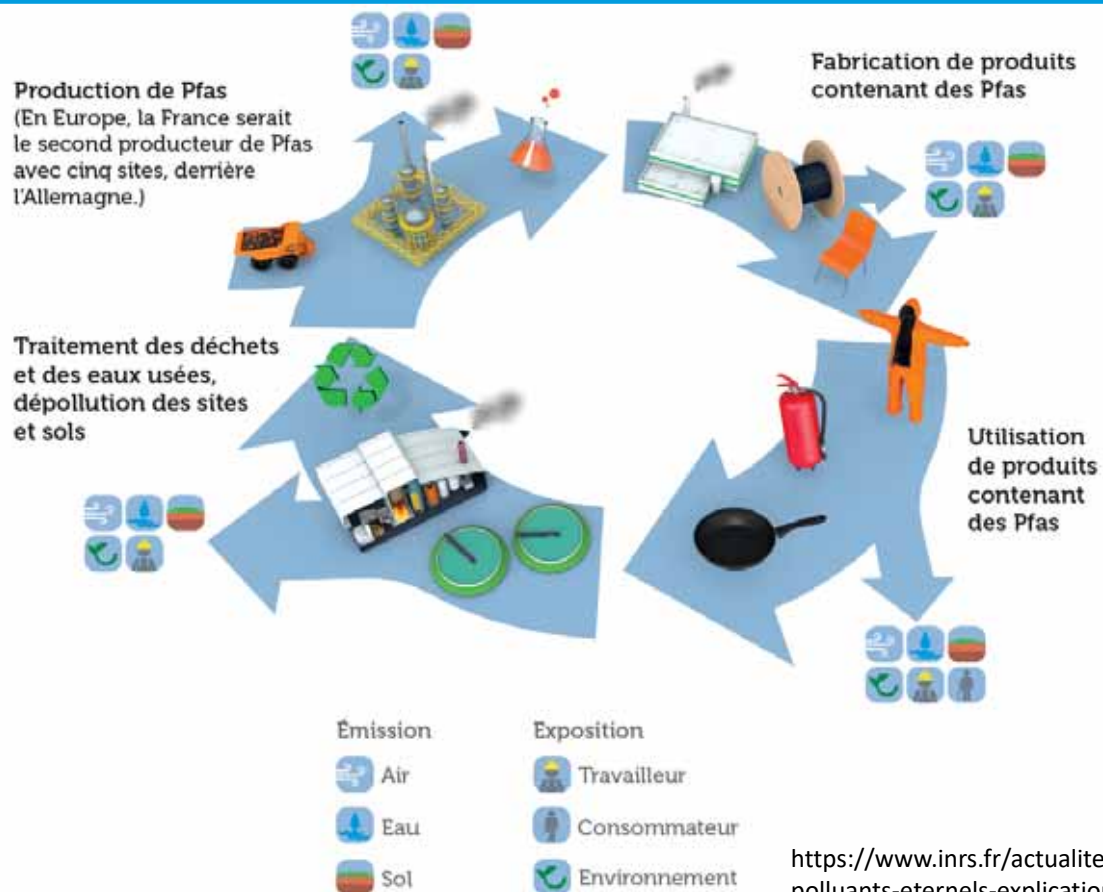
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/note_editoriale_outil_visualisation_PFAS.pdf

14

- Développement de méthodologies analytiques
- Caractérisation de la présence : identité/quantité
- Sources
- Ecodynamique
 - Transfert
 - Réactivité
- Impact

15

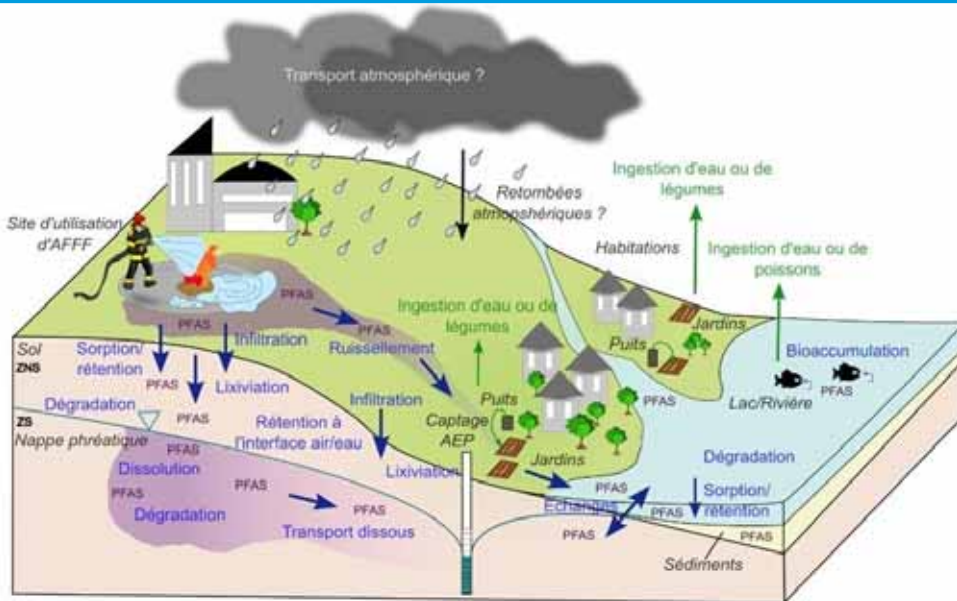
Sources des PFAS



<https://www.inrs.fr/actualites/pfas-polluants-eternels-explications.html>

16

Cycle et dynamique des PFAS



- Mobiles
- Stables-Persistants
- Bioaccumulable
- Toxiques pour certains

<https://www.brgm.fr/fr/actualite/dossier-thematique/pfas-reponses-questions-faq>

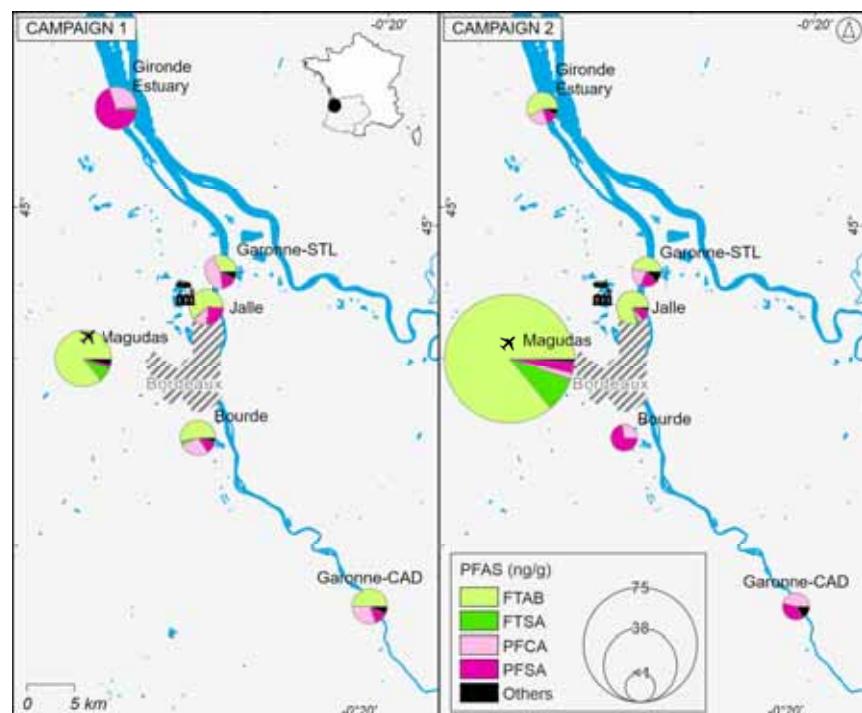
17

Garonne et estuaire de la Gironde

- Détection de PFAS sur 100 % des sites pour les deux campagnes
- Les niveaux de contamination varient de 3,1 ng/g (Garonne-STL) à 22 ng/g (Magudas) dans la classe C1 et de 0,1 ng/g (Bourde) à 75 ng/g (Magudas) dans la classe C2
- Profils moléculaires dominés par le 6:2 FTAB (<0,09-60 ng/g dw), le PFOS (<0,02-6 ng/g dw) et le 6:2 FTSA (<0,2-6,3 ng/g dw)
- [PFAS]_{tot} est homogène dans les échantillons de la Garonne

Empreinte industrielle Industrial fingerprint:

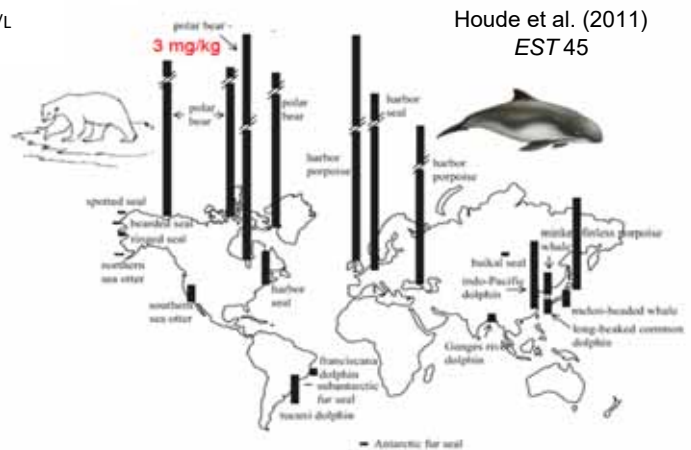
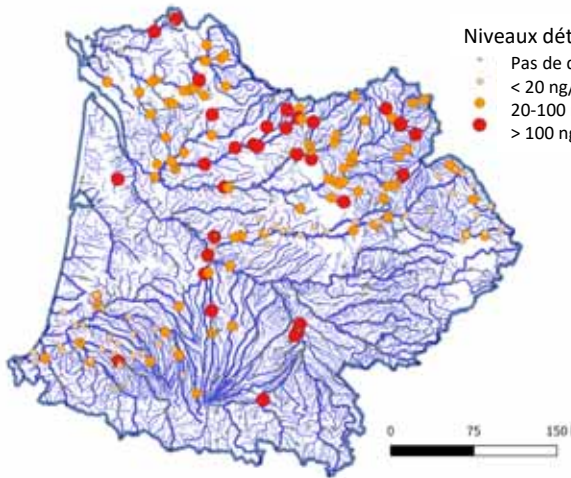
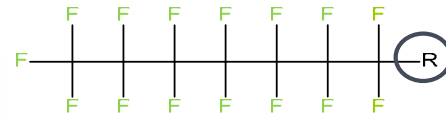
- Niveau de contamination élevé
- Profils dominés par des PFAS issus d'activités humaines (par exemple, aéroports utilisant des mousses anti-incendie)
- Présence de précurseurs des PFAS à des concentrations élevées



Cycle et dynamique des PFAS

De l'échelle locale À l'échelle globale

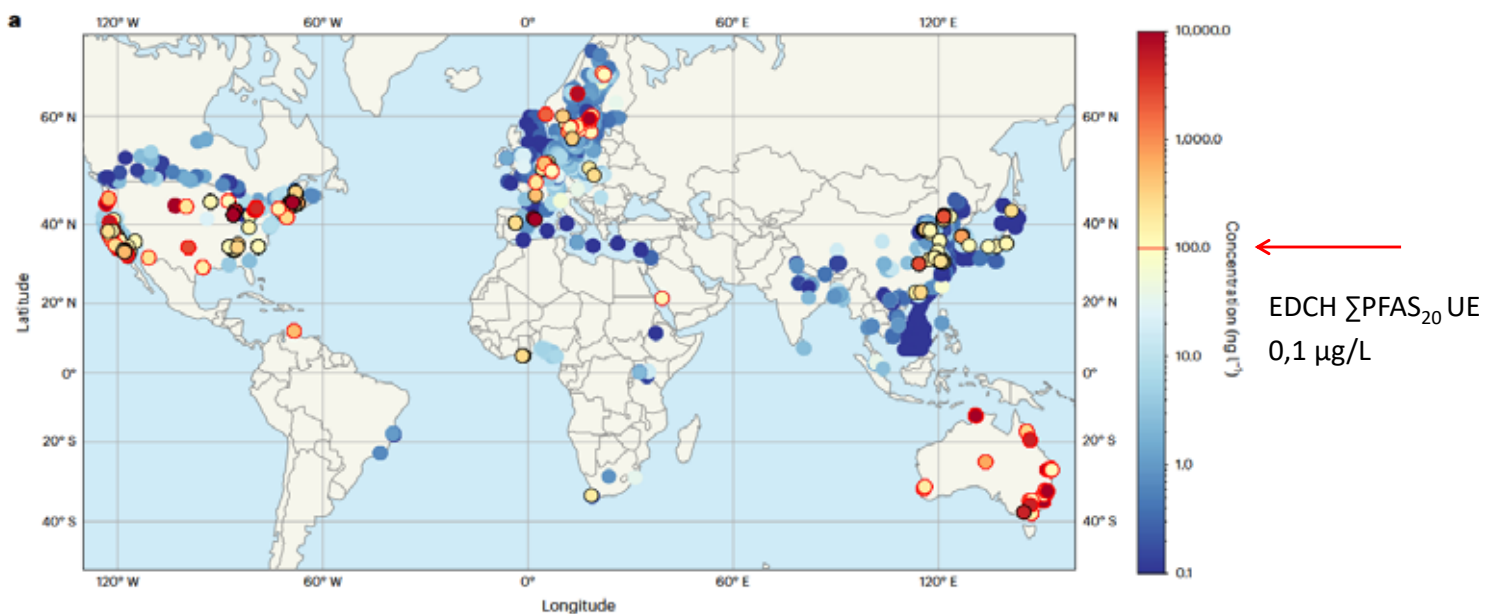
Contamination des rivières du bassin Adour Garonne
PFOS/PFAS (2021)
Données Agence de l'Eau



Niveaux de PFOS dans les mammifères marins à large échelle

Cycle et dynamique des PFAS : Première synthèse à l'échelle globale

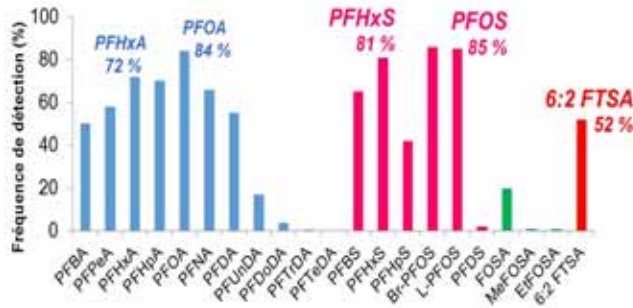
Eaux de surface, Eaux de Boisson, Eaux souterraines



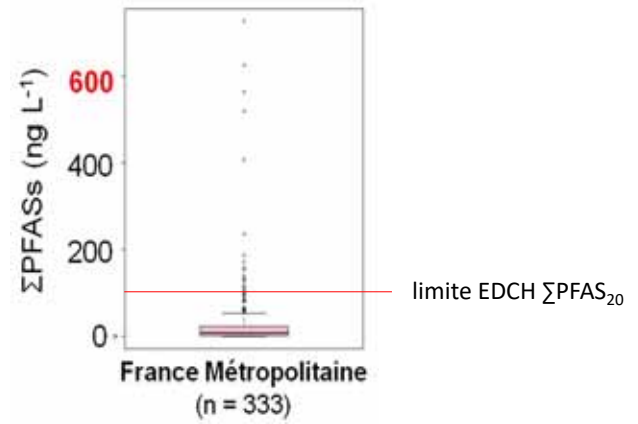
Etude à l'échelle du réseau hydrographique national (Métropole)

Présence généralisée dans les cours d'eau (phase dissoute) - 2012

Fréquence de détection (%) dans la phase dissoute (eaux de surface)



Concentration dans la phase dissoute, Σ PFAS (ng/L) (eaux de surface)



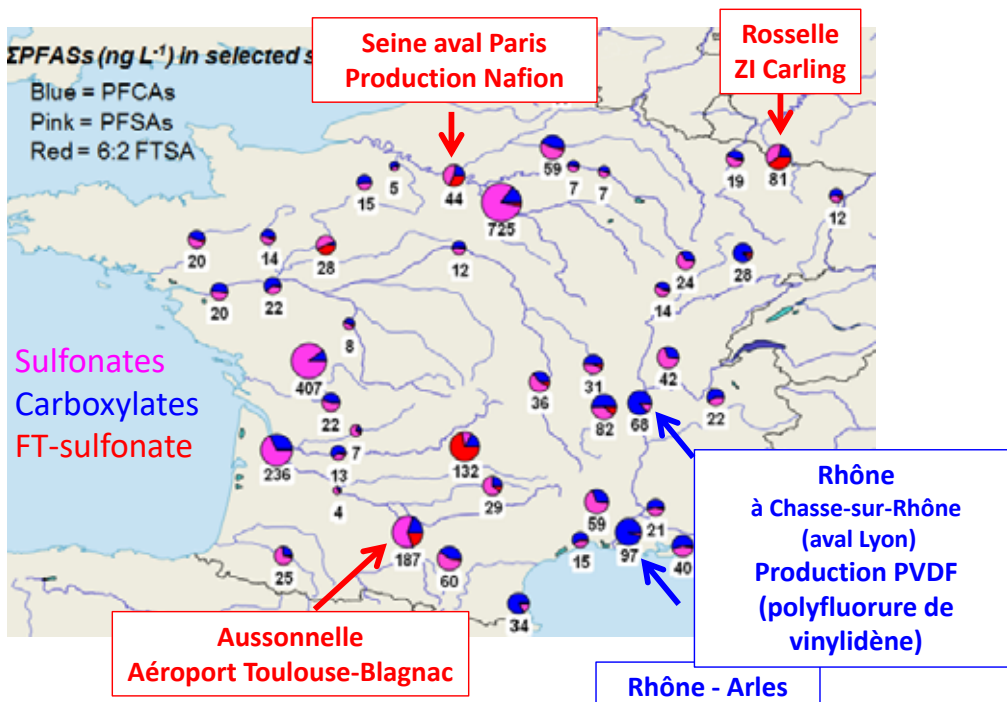
- Etat des lieux et éléments de connaissance pour la prise de décision publique
- Composés ubiquistes
- Médiane Σ PFAS : 8 ng/L
- Prédominance du PFOS & dépassements fréquents NQE (0,65 ng/L) + occasionnel seuil EDCH 2026

Munoz, G.; Giraudel, J.-L.; Botta, F.; Lestremou, F.; Dévier, M.-H.; Budzinski, H.; Labadie, P. Spatial Distribution and Partitioning Behavior of Selected Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Freshwater Ecosystems: A French Nationwide Survey. *Science of the Total Environment* 2015, 517, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.043>.

21

Etude à l'échelle du réseau hydrographique national (Métropole)

Présence généralisée dans les cours d'eau (phase dissoute) - 2012



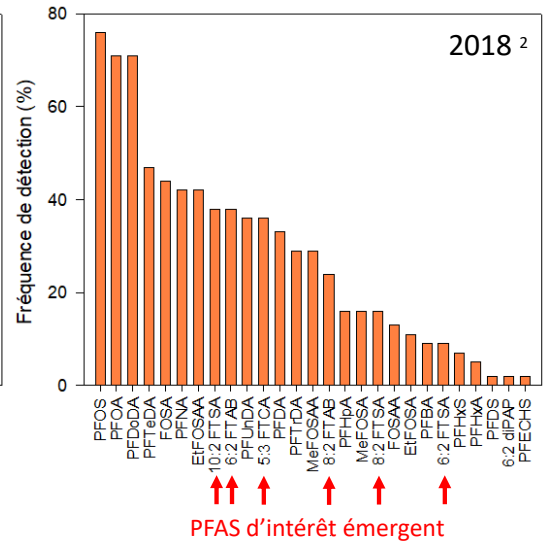
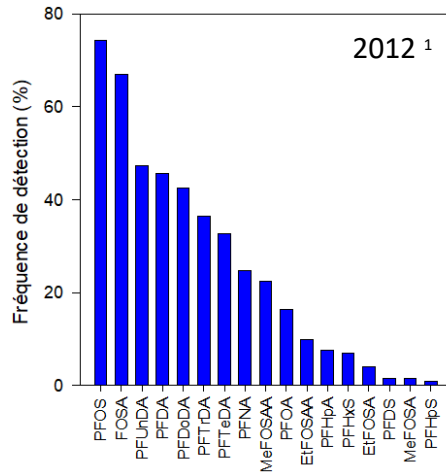
¹ Munoz, G.; Giraudel, J.-L.; Botta, F.; Lestremou, F.; Dévier, M.-H.; Budzinski, H.; Labadie, P. Spatial Distribution and Partitioning Behavior of Selected Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Freshwater Ecosystems: A French Nationwide Survey. *Science of the Total Environment* 2015, 517, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.043>.

² Macorps, N.; Labadie, P.; Lestremou, F.; Assoumani, A.; Budzinski, H. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Surface Sediments: Occurrence, Patterns, Spatial Distribution and Contribution of Unattributed Precursors in French Aquatic Environments. *Science of the Total Environment* 2023, 874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162493>.

22

Etude à l'échelle du réseau hydrographique national (Métropole)

Présence généralisée dans les cours d'eau (sédiments)



- Ubiquistes dans les sédiments
- Liste élargie en 2018

¹ Munoz, G.; Giraudel, J.-L.; Botta, F.; Lestremieu, F.; Dévier, M.-H.; Budzinski, H.; Labadie, P. Spatial Distribution and Partitioning Behavior of Selected Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Freshwater Ecosystems: A French Nationwide Survey. *Science of the Total Environment* 2015, 517, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.043>.

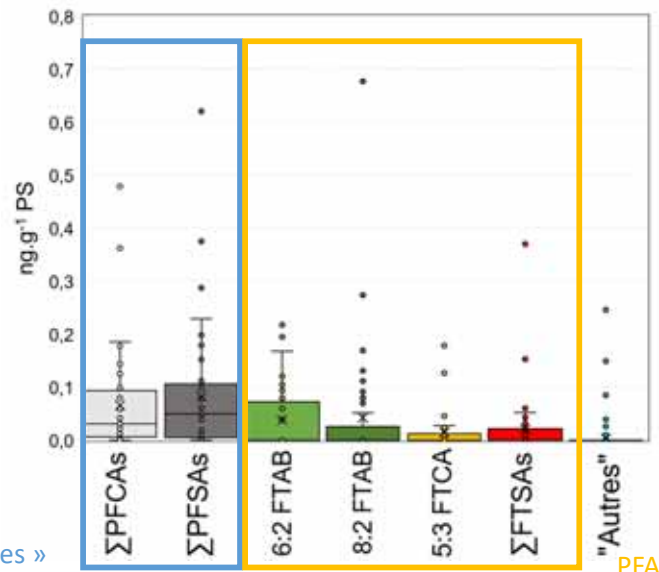
² Macorps, N.; Labadie, P.; Lestremieu, F.; Assoumani, A.; Budzinski, H. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Surface Sediments: Occurrence, Patterns, Spatial Distribution and Contribution of Unattributed Precursors in French Aquatic Environments. *Science of the Total Environment* 2023, 874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162493>.

Etude à l'échelle du réseau hydrographique national (Métropole)

Importance des PFAS d'intérêt émergent



Médiane Σ PFAS = 1,6 ng.g⁻¹ poids sec (PS) (max : 23)



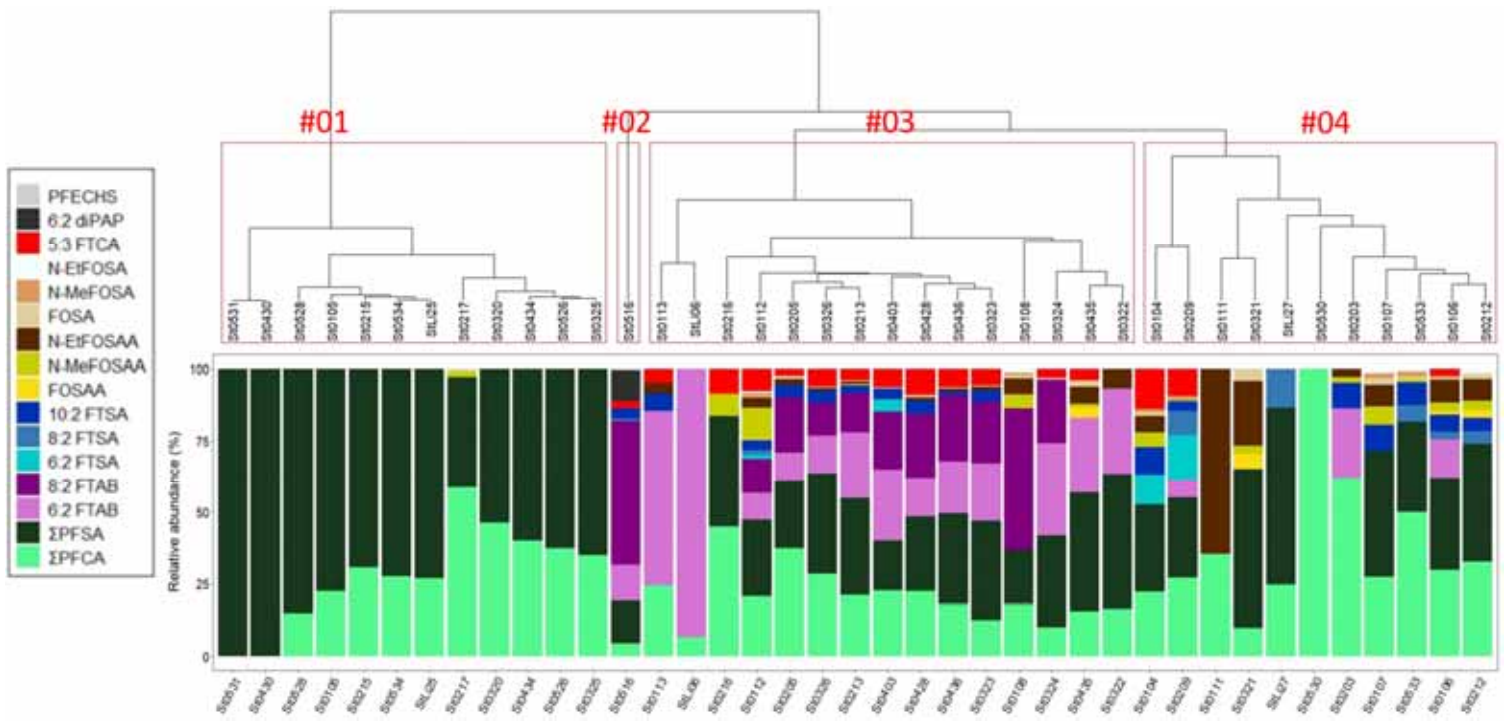
PFAAs
« historiques »

PFAS
« émergents »

Macorps, N.; Labadie, P.; Lestremieu, F.; Assoumani, A.; Budzinski, H. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Surface Sediments: Occurrence, Patterns, Spatial Distribution and Contribution of Unattributed Precursors in French Aquatic Environments. *Science of the Total Environment* 2023, 874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162493>.

Etude à l'échelle du réseau hydrographique national (Métropole)

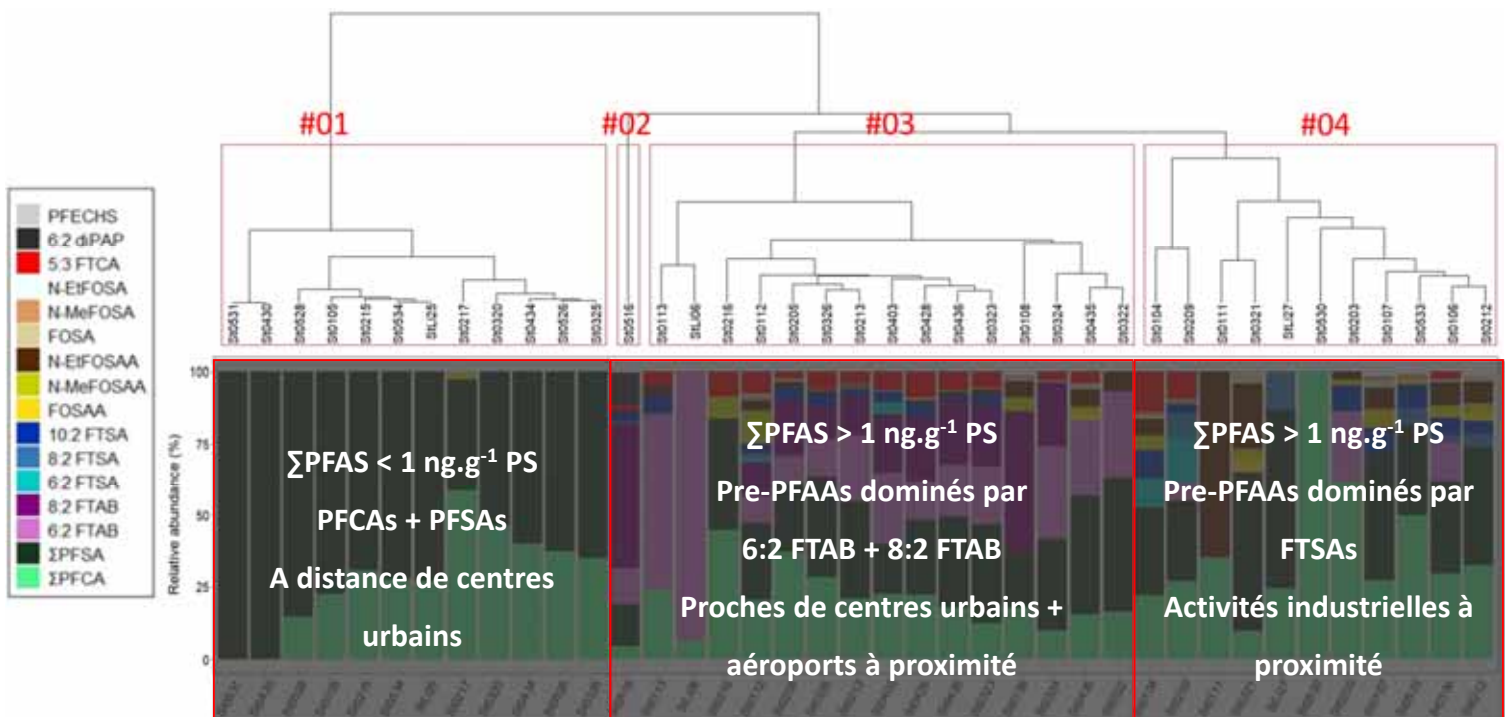
Profils de contamination / activités anthropiques - Approche Classification Ascendante Hiérarchique / SIG



25

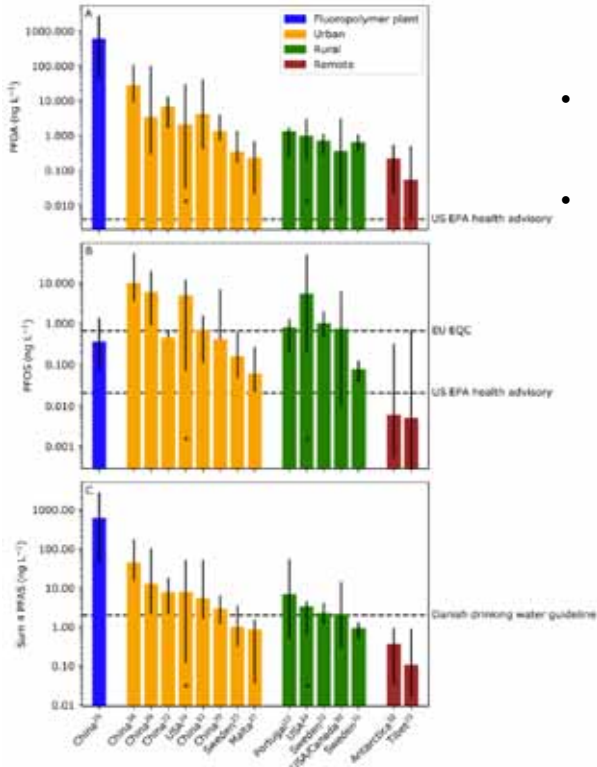
Etude à l'échelle du réseau hydrographique national (Métropole)

Profils de contamination / activités anthropiques - Approche Classification Ascendante Hiérarchique / SIG



26

Contamination généralisée des eaux de pluie



- **Présence avérée à l'échelle planétaire** dans tous les compartiments environnementaux
- Exemple des PFAS dans l'eau de pluie
 - Dépassement des normes environnementales ou sanitaires (EDCH)
 - « Nouvelle » limite planétaire dépassée
 - Impact global santé humaine et santé environnementale

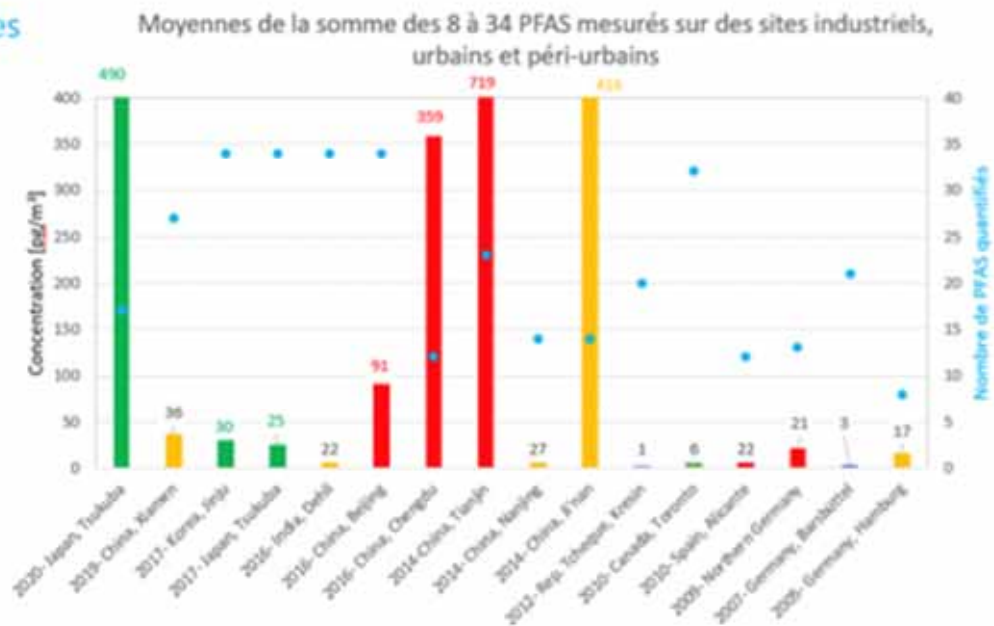


Cousins, I. et al. « Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) ». *Environmental Science & Technology* 56, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02765>.

Contamination généralisée de l'atmosphère

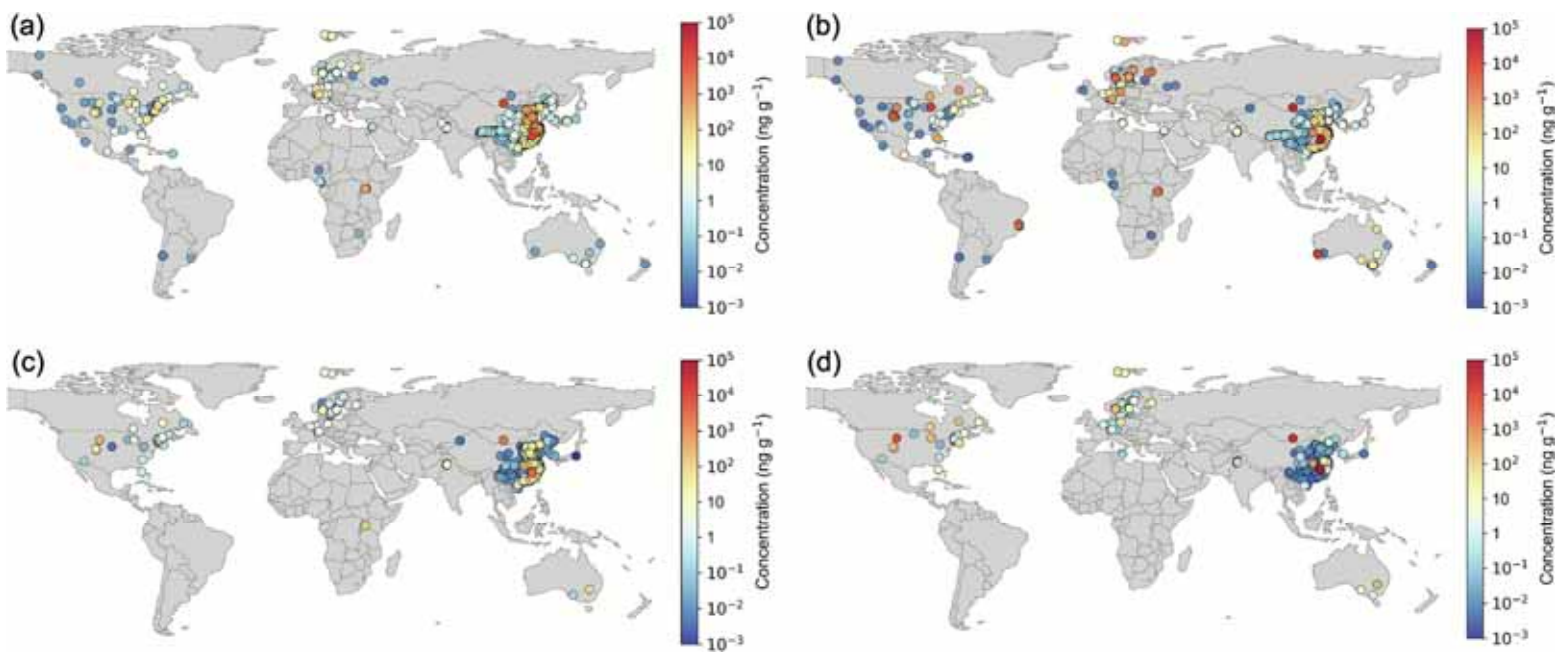
Les PFAS

Mesures existantes



Adapté de Faust 2023

Contamination généralisée des sols

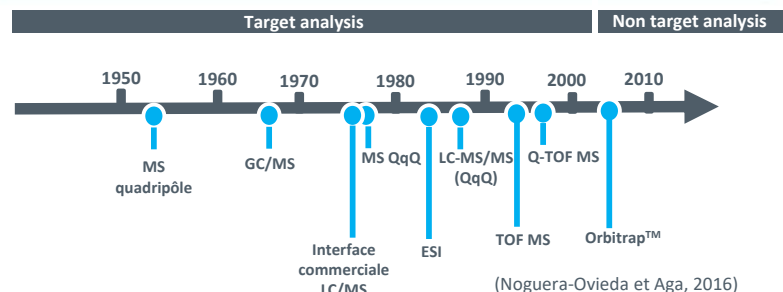
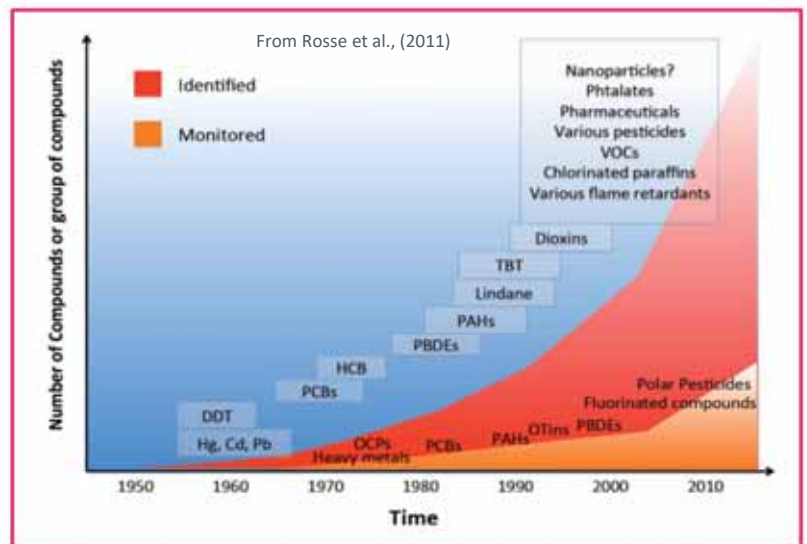
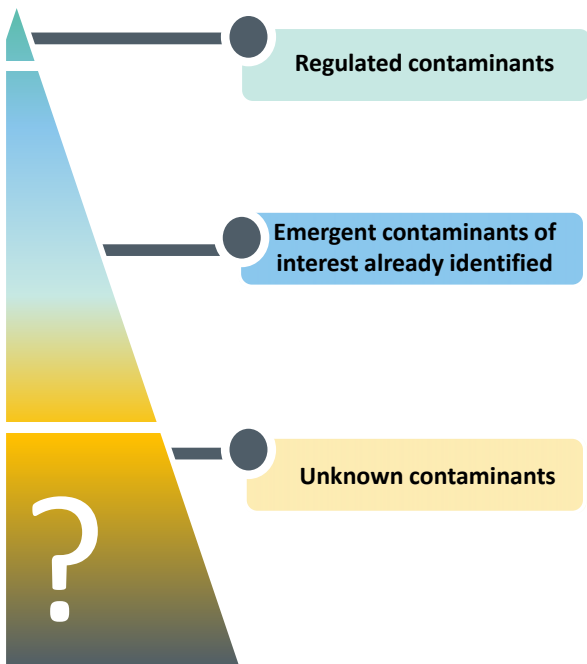


Répartition mondiale des concentrations de PFOA (a), PFOS (b), PFBS (c) et PFHxS (d) dans la couche superficielle du sol

Min Wei, Zhongxing Chen, Kun Yang, Lifeng Cao, Chuntian Qiu, Lianqing Zhou, Zhou Shi, Songchao Chen, Global ecological and health risks of PFAS in surface soil, Environment International, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109925>

29

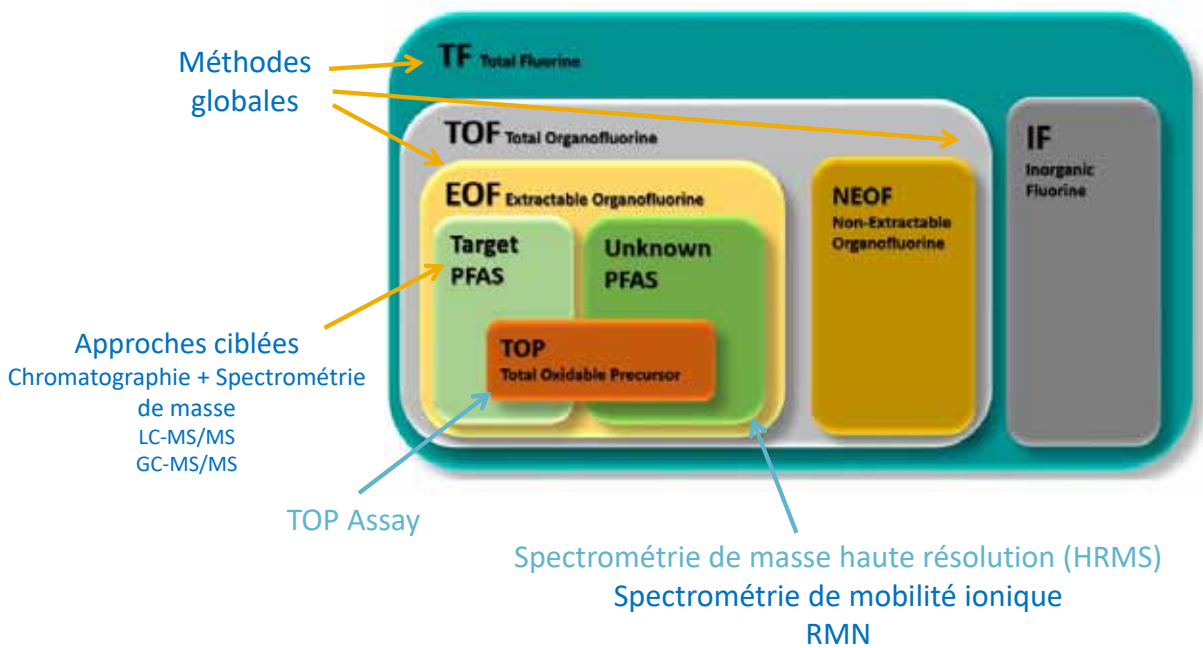
Cycle et dynamique des PFAS



(Noguera-Ovieda et Aga, 2016)

30

Etat des lieux, réactivité, bilans de masse... Nécessité d'approches complémentaires

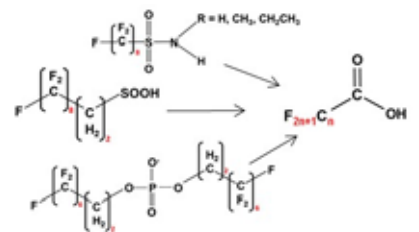
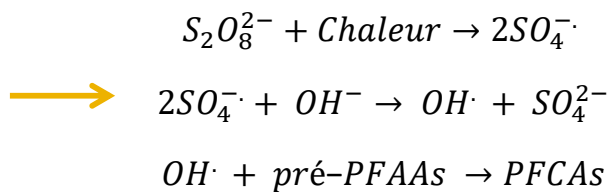


Zarębska M. et Bajkacz S « Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) - recent advances in the aquatic environment analysis ». *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 2023 <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117062>.

31

TOP assay : application au réseau hydrographique national (Métropole)

Approche indirecte

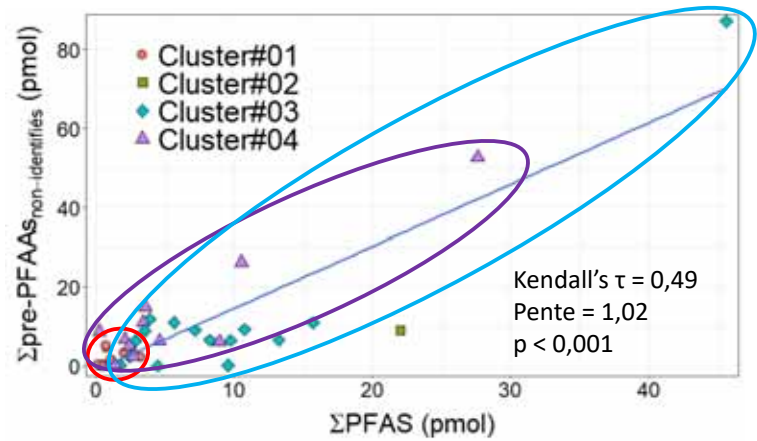
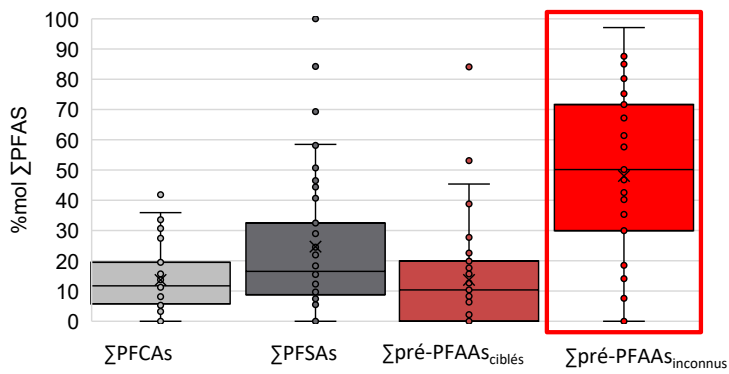


Houtz et al., ES&T, 2013

- Total Oxidizable Precursor Assay (TOP) : oxydation par OH^{\cdot}
- Conversion de précurseurs en acides perfluoroalkylés
- Proxy de la quantité de PFAS réactifs

32

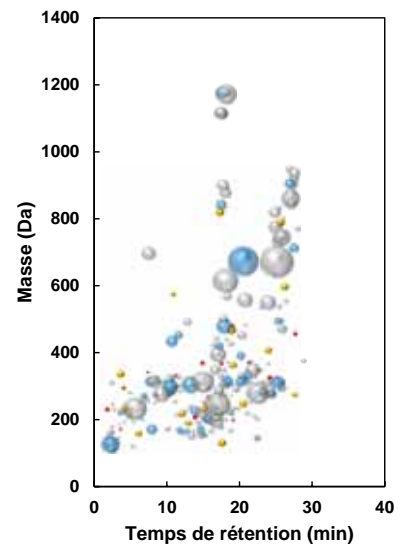
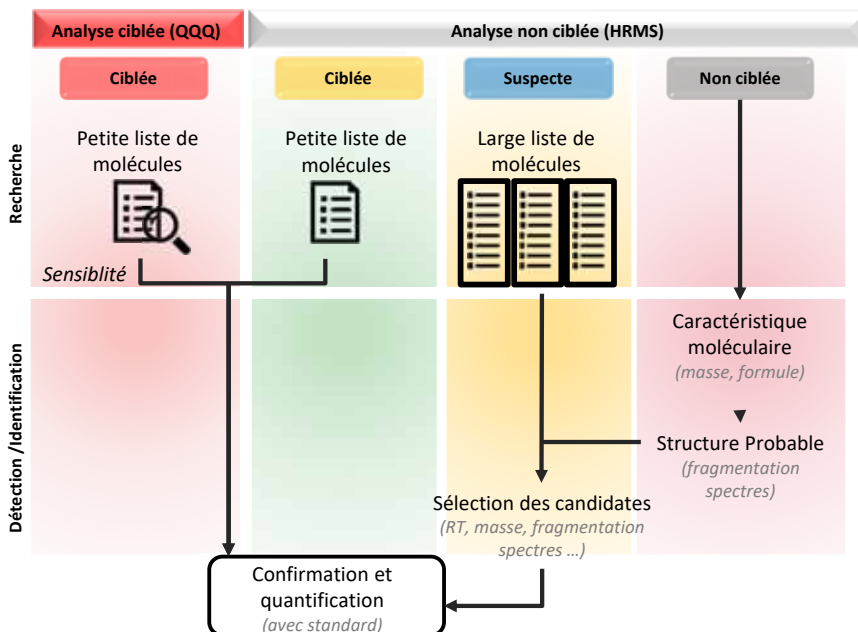
Approche indirecte



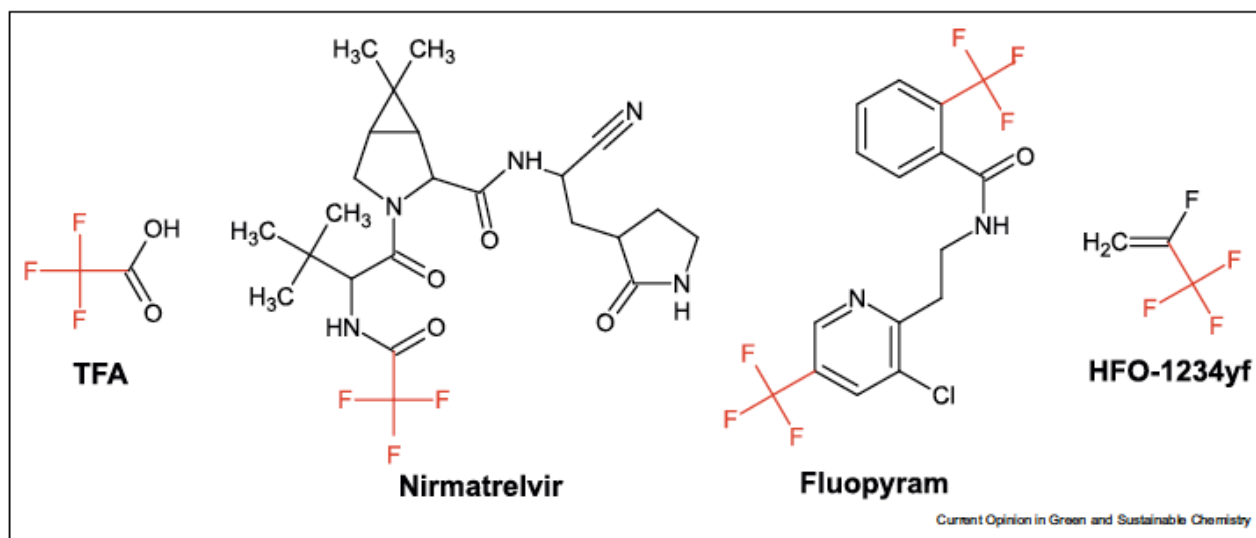
- Contribution médiane pre-PFAAs non-identifiés à Σ PFAS : 50%
- Corrélation pre-PFAAs_{inconnus} vs Σ PFAS : sources communes ?

Macorps, N.; Labadie, P.; Lestremau, F.; Assoumani, A.; Budzinski, H. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Surface Sediments: Occurrence, Patterns, Spatial Distribution and Contribution of Unattributed Precursors in French Aquatic Environments. Science of the Total Environment 2023, 874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162493>.

Stratégies analytiques



Un exemple à méditer

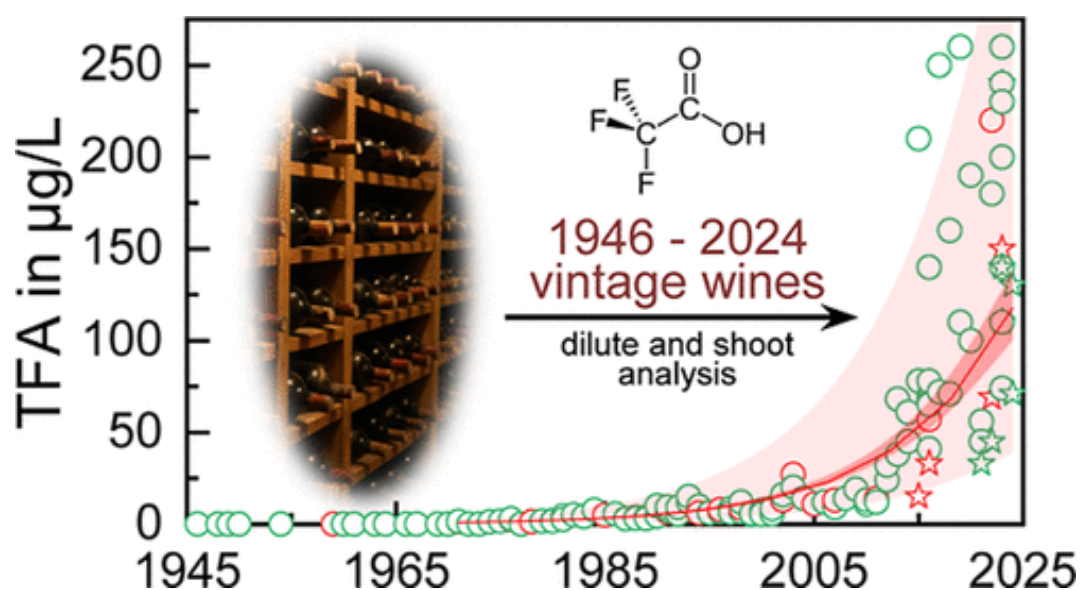


Examples for precursors of trifluoroacetic acid (TFA) through (bio)chemical degradation: the pharmaceutical nirmatrelvir, the pesticide fluopyram, and the refrigerant HFO-1234yf. The C-CF₃ moiety in each molecule is marked in red.

Freeling and Björnsdotter (2023) Assessing the environmental occurrence of the anthropogenic contaminant trifluoroacetic acid (TFA). *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 41, 100807. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100807>

37

Un exemple à méditer : Les vins allemands indicateurs d'une pollution généralisée



Tendance qui correspond à celles observées pour certaines émissions de précurseurs de TFA en Allemagne, notamment les réfrigérants et les propulseurs générateurs de TFA, ainsi que les pesticides contenant du C-CF₃

Freeling and Mira de Orduña Heidinger (2025) Tracking Trifluoroacetate (TFA) through Time: A 78-Year Record from Archived Wines. *Environmental Science and Technology*, 59(49), pp. 26762–26769. <https://doi-org.docelec.u-bordeaux.fr/10.1021/acs.est.5c10868>

38

CONCLUSION ET BESOINS

- Présence ubiquiste
- Contamination globale (limite planétaire)
- Concentrations très variables
- Lien présence-source
- Listes limitées

Mais besoins forts

- Besoin d'élargir le spectre des molécules suivies
- Vision holistique
- Produits de transformation (e.g. question du Reuse)
- Rationalisation/optimisation des usages (Diminuer les apports (quantité et nombre) (350 000 substances chimiques recensées Wang et al., EST, 2020))
- Economie d'échelles
- Fin de vie et ACV globale / Amélioration des traitements

39

AVEC LE CONCOURS DE :

- P. Pardon
- G. Munoz
- L. Peluhet
- N. Macorps
- C. Simonnet-Laprade
- Q. Dubois



40



Merci pour votre attention 😊

